

UNIVERSIDAD DE SANCTI SPIRITUS

“JOSÉ MARTÍ PÉREZ”

FACULTAD DE INGENIERÍA



## Trabajo de Diploma

*Título: Propuesta de un plan de acciones para contribuir al uso eficiente del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.*

*Autor: Maydel Fernández Romero*

*Tutor: Dr.C. Ernesto Luis Barrera Cardoso*

*“Año 58 de la Revolución”*

*2015-2016*



# *Dedicatoria*

## **Dedicatoria**

*Es muy grato tener personas que te apoyen cuando lo necesitas, a esas personas va dedicado este trabajo, en especial:*

*A mi madre, por ser mi paradigma en valores morales y por ser fuente inalcanzable de ayuda y motivación.*

*A mi hermano por su preocupación y consagración.*

*A todas aquellas personas que me apoyaron de forma incondicional a lo largo de estos años de sacrificio.*

*Que con su ejemplo supieron guiarme por el camino correcto hasta llegar a alcanzar este sueño.*



## *Agradecimientos*

# **Agradecimientos**

*Deseo reflejar mi agradecimiento a todos los que de una forma u otra han contribuido a la realización de este trabajo.*

*Mis agradecimientos especiales a mi tutor Dr. C. Ernesto Luis Barrera Cardoso que con gran tesón me ayudó a dar los pasos en este proyecto, sin él no hubiera sido posible la realización de este trabajo.*



*Resumen*

## **Resumen**

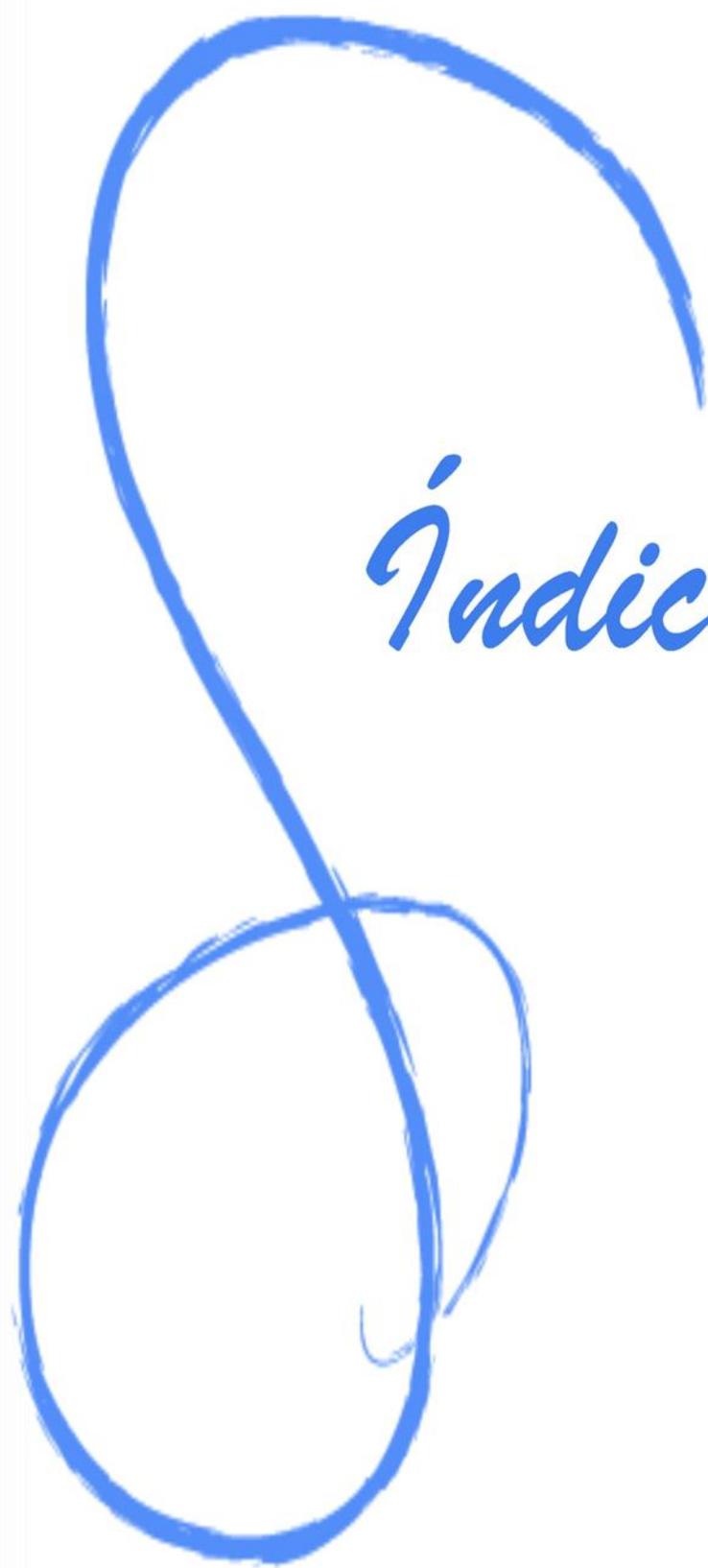
La presente investigación se realizó con el objetivo de proponer un plan de acciones para contribuir al uso eficiente del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen. Se utilizaron como herramientas para el diagnóstico los diagramas de Pareto, el muestreo estadístico, los diagramas causa-efecto y el plan de acciones.

Como resultado, se pudo comprobar que según el inventario 2015 para el municipio de Cabaiguán, la instalación de plantas de biogás continúa en ascenso. Además, los biodigestores de tipo chino son los de mayor cuantía (93%), los que mayor volumen instalado (79%), y los que mayor número de personas benefician (68%). Contradictoriamente, estos digestores son superados por los de tipo MININT e Hindú en el índice número de personas/ volumen de digestión debido a las mayores productividades volumétricas de estos últimos. Se pudo comprobar también que, de los 20 digestores muestreados, 8 (B-11, B-55, B-31, B-34, B-18, B-48, B-5 y B-10) podrían tener emisiones de biogás entre 5 y 25 m<sup>3</sup> diarios. Además, se identificaron las principales causas de las emisiones de metano a la atmósfera que sirvieron de base para proponer 5 acciones, que permitirán una mejor proyección hacia el consumo eficiente del biogás producido en los biodigestores de pequeño y mediano volumen.

## Summary

The present investigation was carried out with the objective of proposing a plan of actions to contribute to the efficient use of the biogás in plants of small and medium volume. They were used as tools for the diagnosis the pareto diagram, the statistical sampling, the diagrams cause-effect and the plan of actions.

As a result, it could be proven that according to the inventory 2015 for the municipality of Cabaiguán, the installation of biogas plants continues in ascent. Also, the biodigestores of Chinese type is those of more quantity (93%), those that bigger installed volume (79 %), and those that bigger number of people benefits (68%). Contradictorily, these digestores is overcome by those of type MININT and Hindu in the index number of people / digestion volume due to the biggest volumetric productivities in these last ones. It could also be proven that, of the 20 digestores muestreados, 8 (B-11, B-55, B-31, B-34, B-18, B-48, B-5 and B-10) they could have biogas emissions between 5 and 25 daily m<sup>3</sup>. Also, the main causes were identified from the methane emissions to the atmosphere that you/they served as base to propose 5 actions that will allow a better projection toward the efficient consumption of the biogas taken place in the biodigestores of small and medium volume.

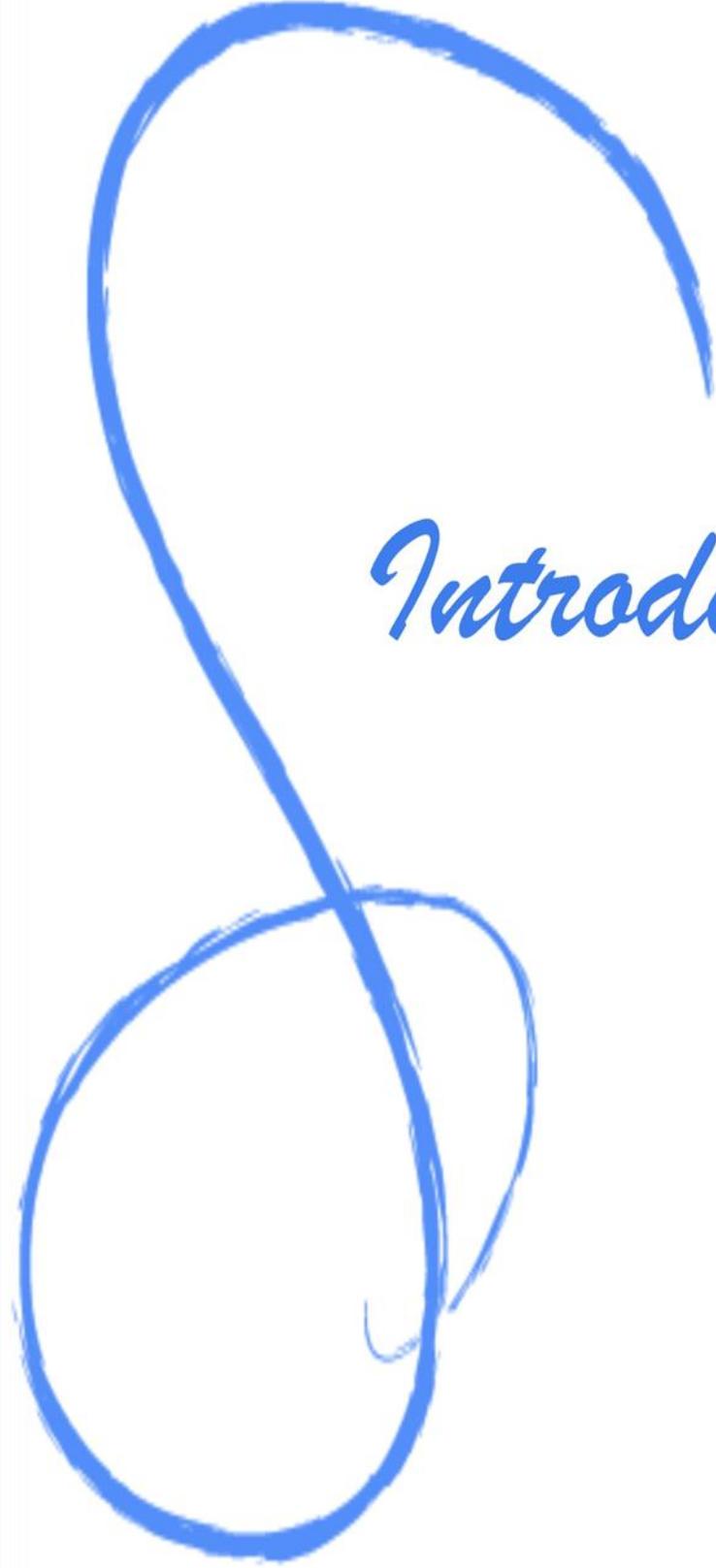


*Índice*

# Índice

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I .....	4
1.1 Fuentes de energía renovables.....	5
1.1.1 Situación actual de las Energías Renovables en Cuba.....	6
1.2 Biogás. ....	7
1.2.1 Cómo se produce el biogás.....	8
1.2.1.1 Parámetros que controlan el proceso.....	9
1.2.2 Degradación anaeróbica. ....	10
1.2.3 Biodigestores.....	12
1.2.3.1 Ventajas de los biodigestores.....	12
1.2.3.2 Tipos de Biodigestores.....	13
1.3 Uso eficiente del biogás. ....	19
1.3.1 Diferentes aplicaciones del uso del biogás. ....	20
1.4 Impacto ambiental. ....	21
1.5 Experiencias de utilización del biogás en Cuba. ....	23
CAPÍTULO II .....	24
Introducción.....	24
2.1. Etapa I: Caracterización de la producción de biogás en el territorio. ....	24
2.1.1 Principios y características del diagrama de Pareto.....	25
2.2 Etapa II: Selección de los biodigestores.....	28
2.2.1 Cálculo del tamaño de la muestra. ....	28
2.2.2 Cálculo del tamaño de los estratos. ....	29
2.2.3. Muestreo aleatorio simple. ....	29
2.3 Etapa III: Determinación del aprovechamiento del biogás. ....	30

2.3.1 Parámetros de diseño de los biodigestores. ....	30
2.3.2 Procedimiento de cálculo. ....	30
2.3.3 Discusión de los resultados.....	32
2.4 Etapa IV: Elaboración del plan de acciones. ....	32
2.4.1 Diagrama de Causa y Efecto.....	32
2.5 Definición del plan de acción.....	35
CAPITULO III .....	36
Introducción.....	36
3.1 Caracterización de la producción de biogás a pequeña y mediana escala en Sancti Spíritus.....	36
3.2 Tipo de plantas más usadas en el municipio de Cabaiguán. ....	38
3.3 Volumen de digestión por tecnología. ....	39
3.4 Número de personas que se benefician.....	39
3.5 Índice número de personas beneficiadas/volumen de digestión.....	40
3.6 Aplicación de la herramienta. ....	41
3.6.1 Plan de Muestreo. ....	41
3.7 Análisis de la demanda de biogás en los biodigestores. ....	42
3.8 Plantas identificadas con emisiones de metano.....	43
3.9 Diagrama de Sankey.....	44
3.10 confección del diagrama de Causa y Efecto. ....	48
3.11 confección del plan de acciones.....	50
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES.....	53
BIBLIOGRAFIA .....	54
ANEXOS .....	60



# *Introducción*

## Introducción

La dependencia actual del petróleo para hacer frente a los hábitos de consumo energético de la humanidad, junto con el aumento de la población, hacen prever el agotamiento de los combustibles fósiles a lo largo de este siglo. Se estima que hacia el año 2025 estarán consumidas casi el 88% de las reservas originales de petróleo y hacia el 2050 estarán agotados el petróleo y el gas natural (Climático, 2015).

En los últimos años, la energía y los biocombustibles se han transformado en tema prioritario para los países de América Latina y el Caribe, producto de la alta volatilidad en los precios del petróleo, de las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de los países de independizar su matriz energética. Por tal motivo, existe una tendencia hacia la sustitución combustibles fósiles por renovables.

La producción de biogás representa uno de los recursos energéticos más sostenibles y con mayor potencial de crecimiento. En ellas el biogás producido es considerado como una fuente de energía renovable, compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. Este gas se genera a partir de la biodegradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Como otros combustibles, el biogás cuenta con múltiples aplicaciones, desde la generación de electricidad o calor, hasta carburante en vehículos adaptados para ello y en una menor escala para la cocción de alimentos, la iluminación y la refrigeración (Europa, 2014).

Según el último informe presentado en 2012 por la EBA (European Biogas Association), Alemania es la primera potencia europea en este sector alcanzando las 8.700 plantas de producción de biogás. Destaca de igual manera el gran crecimiento de esta fuente renovable en países como Francia, Reino Unido e Italia. Este último consiguió hacer **cambios en su legislación** para poder introducir biogás en la red de gas natural y asegurar así su distribución. Pese a los esfuerzos realizados, la importancia de España como productora de biogás industrial es bastante discreta, situándose en el puesto 22 de los 28 países que conforman la Unión Europea.

La FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, destaca que América Latina produce alrededor del 40% de los biocombustibles en el

mundo, siendo una fuente de energía renovable de fácil implementación, sobre todo en sectores rurales. Allí se ha destacado que el aprovechamiento de los residuos orgánicos de las actividades agropecuarias para la producción de biogás, puede ser una excelente oportunidad para la sustentabilidad de los pequeños productores de la región.

Es conocido que el metano, principal componente del biogás, es un importante gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global de 34 CO<sub>2</sub>-equivalente durante un horizonte de 100 años (Basis., 2013). Por tal motivo, la producción de biogás ha sido reportada también como una alternativa para la mitigación del cambio climático, teniendo en cuenta que el metano generado puede ser utilizado para producir energía (Aye. L. and E. R. Widjaya, 2006, Contreras A. M, 2009, Rocha. M. H, 2010, Afrane. G. and A. Ntiamoah, 2011).

A pesar de esto, en las plantas industriales, que operan bajo regímenes de máximo aprovechamiento de biogás, se reportan emisiones de este gas entre el 2 y 6% debido a escapes, deficiencias de las tecnologías, y exceso de producción de biogás cuando la demanda es baja (Afrane. G. and A. Ntiamoah, 2011).

Los biodigestores de mediano y pequeño volumen han sido muy difundidos en las zonas rurales de los países en vía al desarrollo. En Cuba existen actualmente más de 1800 biodigestores en operación que son empleados fundamentalmente para el tratamiento de excretas vacunas y porcinas. Además, existe un potencial para la construcción de varios miles de plantas que podrían contribuir no solo a la producción de energía sino también a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Sagastume-Gutiérrez A, 2016). Por tal motivo, conocer la eficiencia del aprovechamiento del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen resulta una necesidad. Esto permitiría estimar las emisiones de metano que resultan de la implementación de estas alternativas, así como proponer acciones para evitar su ocurrencia.

Esta situación problemática nos llevó a proponernos el siguiente problema científico:

**Problema científico.** La falta de un diagnóstico sobre la utilización del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen, limita proponer acciones para contribuir a su uso eficiente.

**Objetivo General.** Proponer un plan de acciones para contribuir al uso eficiente del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.

**Objetivos Específicos.**

- I. Analizar los postulados teóricos que sustentan el uso eficiente del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.
- II. Diagnosticar la situación actual del aprovechamiento del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.
- III. Confeccionar un plan de acciones para contribuir al uso eficiente del biogás en estas plantas.

Por lo cual planteamos la siguiente **Hipótesis**, si se realiza un diagnóstico sobre la utilización del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen, entonces se podrán proponer acciones para contribuir a su uso eficiente.

**Variable independiente:** el diagnóstico sobre la utilización del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.

**Variable dependiente:** la propuesta de acciones para contribuir a su uso eficiente.

**Objeto de estudio:** la producción de biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.

**Campo de acción:** el aprovechamiento del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.



# *Capitula* I

## CAPITULO I

El presente capítulo fue estructurado según el hilo conductor que se muestra en la figura 1.1, donde se hace referencia a los conceptos básicos sobre fuentes de energía renovable, biomasa, así como el uso eficiente del biogás y su impacto en el medio ambiente. La revisión de la bibliografía nos permitió determinar el estado del arte y la práctica sobre la producción de biogás a pequeño y mediano volumen, permitiendo sentar las bases teórico – prácticas de la investigación.

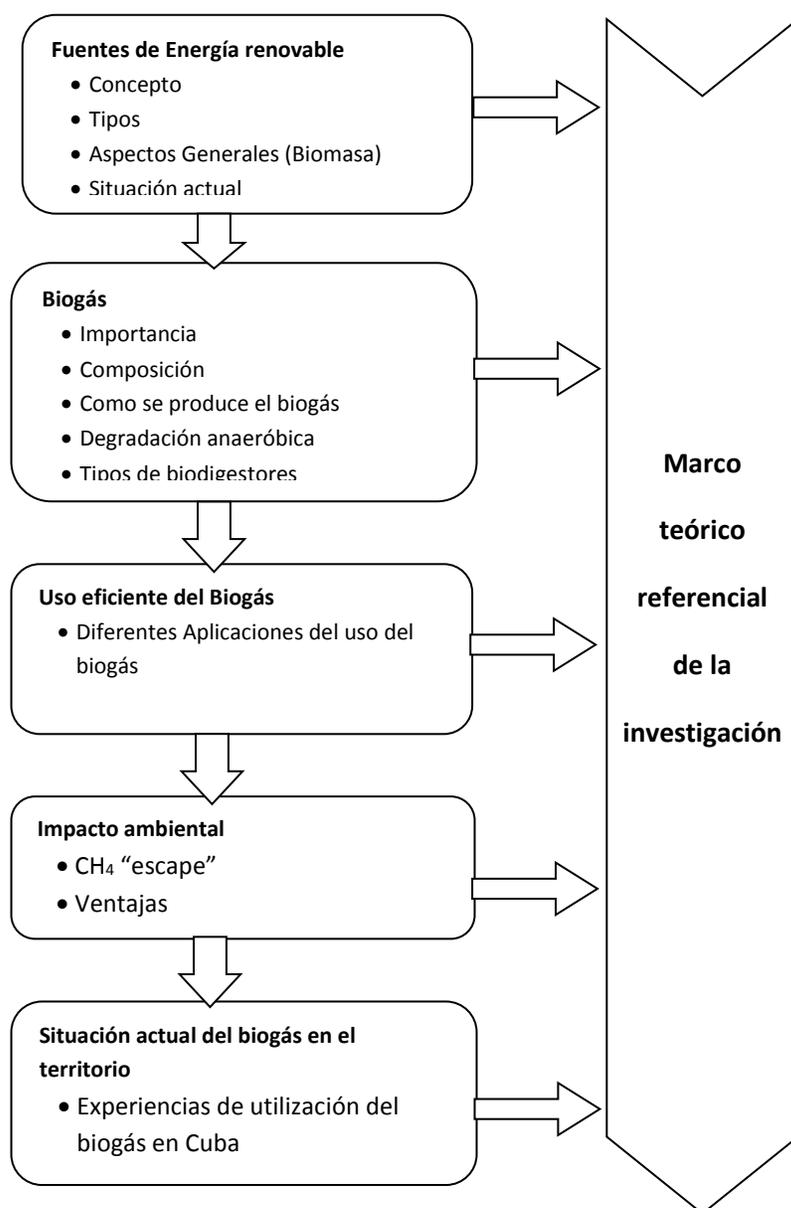


Figura 1.1 Hilo conductor del marco teórico de la investigación. Fuente: Elaboración propia.

## **1.1 Fuentes de energía renovables.**

El uso de las energías renovables no es un hecho novedoso, sin embargo la aparición de los combustibles fósiles las relegó por muchos años al olvido (Borroto Bermúdez J, 1999). En la actualidad el panorama ha cambiado, por una parte los problemas medioambientales y por otra parte, la convulsa situación del mundo del petróleo (portador energético fundamental en la actualidad).

Las energías renovables son energías limpias que contribuyen a cuidar el medio ambiente. Frente a los efectos contaminantes y el agotamiento de los combustibles fósiles, las energías renovables son ya una alternativa, son aquellas que, tras ser utilizadas, se pueden regenerar de manera natural o artificial. Algunas de estas fuentes renovables están sometidas a ciclos que se mantienen de forma más o menos constante en la naturaleza. Existen diversas fuentes de energía que son consideradas como renovables y las mismas se pueden clasificar en (Vargas. C, 2007):

- Energía mareomotriz (mareas)
- Energía hidráulica (embalses)
- Energía eólica (viento)
- Energía solar (Sol)
- Energía geotérmica (Interior de la tierra)
- Energía de la biomasa (vegetación)

Dentro de las vías con que cuenta la humanidad para aliviar los problemas energéticos y ambientales, está un mayor aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, dentro de las que se destaca el uso de la biomasa.

Dentro de la **biomasa** residual, se encuentra una fuente de energía explotada durante las penurias económicas y energéticas producidas durante y después de la última guerra mundial. Se trata del gas del estiércol, gas de los pantanos o gas de granja, producido por fermentación del estiércol de animales y de residuos agrícolas en general. Por su origen biológico se le conoce mundialmente como biogás, que es una mezcla de gases. El proceso de fermentación anaeróbica que produce el biogás, genera también una mezcla residual que es un rico fertilizante orgánico de mayor

calidad, y que puede ser utilizado en los residuos vegetales o ser distribuido sobre los campos como fertilizante de considerable valor (Contreras. L, 2006).

Además, la producción de biogás tiene otros efectos económicos, sociales y ambientales, conocidos por la inmensa mayoría de los hombres que se dedican a esta labor y constituyen preocupación cada vez más alta por parte de estos, puesto que sería muy beneficioso para toda la humanidad, que la generación de energía partiera de este sistema. Lo anterior lo reafirma el hecho de que habría una reducción notable en la emisión de gases de efecto invernadero y la reducción de cargas contaminantes en más del 90 % y del DQO en un 60 – 70 %, así como la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>“fósil”, debido al efecto dañino que tiene para el medio ambiente los métodos generadores de energía predominantes en la actualidad (Herminia. et al, 2006). Es evidente también, la reducción de olores y de emisiones de gases de efluentes aplicados al terreno en más del 75%, la reducción de la atracción de moscas y ratones, así como la mejoría de la capacidad de separación de sólidos en los residuos y se logra una disminución de más del 60-75% de sólidos volátiles como consecuencia del proceso referido (Herminia. et al, 2006).

Para lograr la generalización de este proceso, que conllevará a la humanidad a nuevos horizontes energéticos, factibles a su bienestar, implica la existencia también de nuevas fuentes de empleo y, por supuesto, que la dependencia actual en cuanto al consumo energético y la cocción de alimentos sea sustituida por éste, más económico y sobre todo renovable.

Por tal motivo, el aprovechamiento de los residuos orgánicos para la producción de energía utilizando el biogás como combustible es una alternativa energética renovable que podría ser a su vez compatible con el medio ambiente.

### **1.1.1 Situación actual de las Energías Renovables en Cuba.**

En Cuba, donde la generación eléctrica depende en un 99% de los combustibles fósiles, reviste especial importancia el uso de otras fuentes energéticas, como la generación de energía a partir de biomasas (Renovable.cu, 2012). Estas fuentes renovables de energía tienen un potencial estimado en nuestro país en el orden de las 176 000 toneladas de combustible equivalentes anuales, provenientes de residuales

porcinos y ganaderos, desechos de la producción de azúcar, alcohol, despulpadoras de café y vertederos sanitarios, que contribuyen en gran medida a la contaminación ambiental (ONE, 2013).

Resulta necesario continuar profundizando en los estudios de evaluación e identificación de las tecnologías más correctas para la utilización de las fuentes de energía desde la realidad de cada territorio, así como sus impactos ambientales y las nuevas potencialidades de recursos nacionales especialmente en aquellos de carácter renovable que contribuyan a impedir el continuo deterioro del medioambiente, proponiendo las tecnologías más adecuadas para su aprovechamiento y sistematizando en cada territorio.

Cuba por su situación económica, pretende incrementar la utilización de la biomasa para la generación de energía renovable; ya existe un gran conocimiento de esta energía en toda la población cubana, lo que propicia un incremento en su uso como se muestra en el (Anexo 1 y 2). En la provincia de Sancti Spiritus también se ha incrementado la producción de biogás, especialmente en el medio rural. Numerosos tipos de digestores han sido instalados mediante esfuerzos propios de los campesinos y proyectos extensionistas financiados por COSUDE y PENUD.

## 1.2 Biogás.

Se llama biogás al gas que se produce mediante un proceso metabólico de descomposición de la materia orgánica sin la presencia del oxígeno (esto es, en un ambiente anaeróbico). Este biogás es combustible, tiene un valor calórico alto de 4 700 a 5 500 kcal/m<sup>3</sup> (Werner, 1989), se genera en medios naturales o en dispositivos específicos. Está **compuesto** por un 54%-70% de metano CH<sub>4</sub> y un 27%-45% de dióxido de carbono CO<sub>2</sub>, conteniendo pequeñas cantidades de nitrógeno N<sub>2</sub>, sulfuro de hidrógeno H<sub>2</sub>S e hidrógeno H<sub>2</sub> (tabla 1.1). En casos puntuales hemos detectado la presencia de trazas de compuestos orgánicos, hidrocarburos superiores al metano como, propano, butanos, esto es muy variable y dependerá de múltiples factores. La llama producida por el biogás al ser quemado es de color azul pálido, casi invisible a la luz del día (Werner, 1989).

**Tabla 1.1.** Composición química del biogás.

Componente	Porcentaje %
Metano (CH <sub>4</sub> )	54 - 70 %
Bióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	27 - 45 %
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	0.5 - 3 %
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	1 - 10 %
Acido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	0.1 %

Fuente:(Werner, 1989).

### 1.2.1 Cómo se produce el biogás.

Como se señaló anteriormente, el biogás se produce mediante el proceso de fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire o sea en condiciones anaeróbicas, quedando como residuo el proceso de lodo estabilizado que es un excelente mejorador de suelos con un alto valor fertilizante. Debido a esto último, es factible procesar los desechos animales y residuos agrícolas que se encuentran presentes en el medio rural para producir gas combustible, sin afectar el uso actual que se le da a estos materiales, los que generalmente se reincorporan a los terrenos de cultivo.

En la práctica, los desechos mezclados con agua se introducen a un recipiente cerrado llamado digestor, que es donde se realiza el proceso de generación de biogás. Cuando el digestor es de carga diaria, como se verá más adelante, todos los días se carga con una cantidad dada de desechos mezclados con agua y del digestor sale un volumen de lodos fertilizantes igual al de la mezcla alimentada; el biogás se genera en forma continua durante todo el día. Cuando se trata de un digestor que trabaja a régimen de "lote", se carga todo de una sola vez, no descargándose hasta después de dos o tres meses, cuando se vacía el residuo y se aplica al campo; en este caso la cantidad de biogás producida es mayor en las primeras semanas y va bajando a medida que

transcurre el tiempo, por lo que casi siempre se instalan varios digestores los que se encargan en forma alternada, con objeto de disponer siempre de la cantidad requerida de biogás.

### **1.2.1.1 Parámetros que controlan el proceso.**

A continuación se da una breve explicación de los parámetros que controlan el proceso. Es conveniente aclarar que a pesar de que es recomendable operar los sistemas lo más cerca posible de las condiciones óptimas para lograr una buena eficiencia de generación de biogás, esto no siempre es factible en el medio rural. Por lo tanto, se deberán buscar las mejores condiciones dentro de las posibilidades existentes en el sitio, manteniendo la operación sencilla y sin complicaciones para el usuario.

La fermentación anaeróbica de la materia orgánica se lleva a cabo por la acción de diversas familias de bacterias. Usualmente se consideran dos etapas de dicho proceso, según (Planthogar.net).

#### **1ra. Etapa: formación de ácidos**

#### **2da. Etapa: formación de gases**

En la primera etapa la materia prima es atacada por las bacterias formadoras de ácidos, mismas que convierten los desechos en compuestos más simples como los ácidos acético, butírico y propiónico. En la segunda etapa los ácidos formados en la primera son convertidos a metano y bióxido de carbono por acción de otro grupo de bacterias.

Todos estos procesos se llevan a cabo simultáneamente dentro del digestor, al cual sólo se alimenta la materia prima en las condiciones adecuadas. Tomando en cuenta que las bacterias son el ingrediente esencial del proceso, es necesario mantenerlas en condiciones que permitan asegurar y optimizar su ciclo biológico. A continuación analizaremos detalladamente los parámetros que influyen directamente en la formación del metano.

## Temperatura

El proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15 hasta 60 grados centígrados. Sin embargo, para que las bacterias formadoras de metano trabajen en forma óptima, se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilan entre 30 y 60 grados centígrados, dependiendo del tipo de bacterias que se adapten y desarrollen (Planthogar.net).

## Rangos

Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen dos rangos de temperatura, el mesofílico de 30 a 40 grados centígrados y el termofílico de 55 a 60 grados centígrados.

Rango Mesofílico (30- 40 °C): Las bacterias que se desarrollan en este rango de temperatura se reproducen fácilmente y pueden permanecer activas si no ocurren cambios súbitos de temperatura. La temperatura óptima es de 35 °C y la mayoría de los desechos orgánicos se pueden digerir a esta temperatura produciendo biogás.

Rango Termofílico (55 – 60 °C): Este rango de temperatura, en el que produce mayor cantidad de biogás que en el anterior y en tiempos más cortos, en general sólo es usado en las grandes instalaciones a nivel industrial, ya que se requiere de un control muy preciso. Las bacterias termofílicas son muy sensibles a los cambios de temperatura, y en los pequeños sistemas resulta antieconómico mantenerlos a esta temperatura controlada, especialmente en climas fríos.

### **1.2.2 Degradación anaeróbica.**

La degradación **anaeróbica** es un proceso biológico natural que se desarrolla en ausencia de oxígeno y en reactores (también llamados digestores), cerrados y compactos. En ellos se desarrollan las bacterias que utilizan la materia orgánica contaminante de los efluentes entrantes, para sus necesidades energéticas y su reproducción. De esta forma, el carbono y el hidrógeno son transformados en biogás rico en metano (CH<sub>4</sub>), de alto valor energético.

La producción de biogás por digestión anaeróbica es un modo considerado muy útil para tratar residuos biodegradables ya que produce un combustible de alto valor energético, el biogás, genera un efluente limpio, y produce residuos sólidos que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico.

Otros enfoques del mecanismo de **degradación anaeróbica** se describe en tres pasos básicos (Pastor Alcañiz, 2008), (ver Anexos 3):

- Hidrólisis: el material particulado es convertido en compuestos solubles que luego pueden ser hidrolizados aún más a moléculas simples que son utilizadas por las bacterias que llevan a cabo la acidogénesis.
- Fermentación: en esta etapa, también conocida como acidogénesis, los ácidos grasos, aminoácidos y azúcares formados en el paso anterior son degradados aún más. Los principales productos de la fermentación son el acetato, el hidrógeno y el dióxido de carbono.
- Metanogénesis: esta fase es llevada a cabo por una clase de microorganismos anaeróbicos denominados metanógenos. Existen dos grupos de microorganismos metanógenos: los acetoclásticos (degradan el acetato a metano y dióxido de carbono) y los utilizadores de hidrógeno (generan metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono). El desarrollo de los organismos metanogénicos se ve inhibido en presencia de oxígeno disuelto.

Las siguientes ecuaciones ilustran, de forma resumida, el proceso metanogénico (Pastor Alcañiz, 2008):



Para estimar la producción de metano con base en la cantidad de contaminantes orgánicos removidos (expresados como DQO) es el siguiente:

$$CH_4 = B_0 \times MCF \times DQO_d$$

Siendo:

**Bo:** máxima capacidad de producción de metano del agua residual o lodo (0,25 kg CH<sub>4</sub>/kg DQO)

**MCF:** factor de corrección de metano, que representa la fracción de materia orgánica que será degradada en condiciones anaeróbicas, depende de las condiciones de oxigenación del medio

**DQO<sub>d</sub>:** demanda química de oxígeno degradada, que representa el contenido de materia orgánica del agua servida que es degradada durante el tratamiento en esa unidad (kg DQO/m<sup>3</sup>).

Todo este proceso de degradación anaeróbica ocurre dentro de los biodigestores, que son reconocidos a nivel mundial por su gran uso y por su fácil construcción.

### 1.2.3 Biodigestores.

Un **biodigestor** es un sistema natural que toma ventaja de la digestión anaeróbica y que transforma biomasa o materia orgánica degradable, en biogás y/o fertilizantes. En principio, todos los materiales orgánicos pueden ser fermentados o digeridos, sin embargo, solo sustratos líquidos u homogéneos pueden ser considerados para plantas de biogás simples.

#### 1.2.3.1 Ventajas de los biodigestores.

- Mejora la capacidad fertilizante del estiércol. Todos los nutrientes tales como nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio así como los elementos menores son conservados en el efluente. En el caso del nitrógeno, buena parte del mismo, presente en el estiércol en forma de macromoléculas es convertido a formas más simples como amoníaco (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), las cuales pueden ser aprovechadas directamente por la planta (Vera. A. G, 1996).
- El efluente es mucho menos oloroso que el afluente.
- Control de patógenos. Aunque el nivel de destrucción de patógenos variará de acuerdo a factores como temperatura y tiempo de retención, se ha mostrado

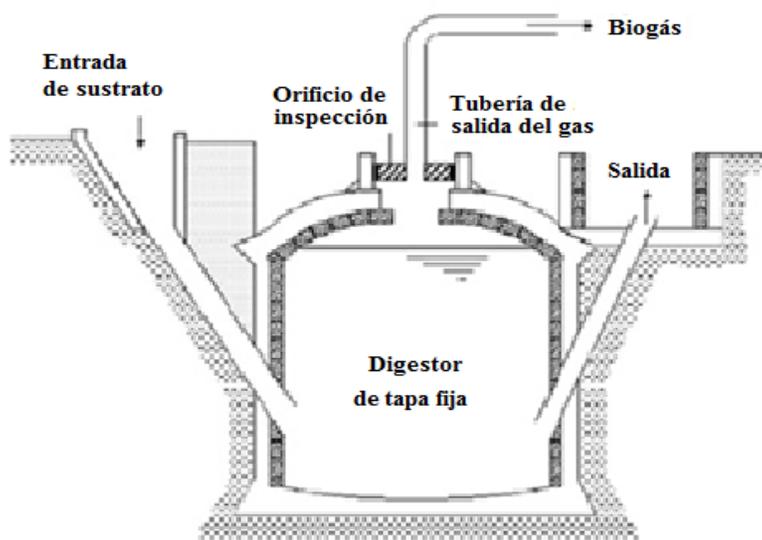
experimentalmente que alrededor del 85 % de los patógenos no sobreviven el proceso de biodigestión (Marchain. U, 1992).

### 1.2.3.2 Tipos de Biodigestores.

Existen diferentes **tipos de biodigestores**, pero los más usados en Cuba son:

- Digestor de tapa fija o de tipo Chino.
- Digestor de campana flotante o de tipo Hindú
- Digestor tubular o de bolsa de polietileno
- Digestor híbrido o tecnología MININT

Los digestores de **tapa fija o tipo Chino** (figura 1.2) consisten en un sistema cerrado, construido usualmente de mampostería y bajo el nivel de la tierra. Estos minidigestores poseen una tapa fija en forma de domo que contiene al biogás en su interior, una entrada para alimentar el sustrato y una salida del digestato que usualmente actúa como tanque de compensación.



**Figura 1.2:** Esquema general de un digestor de tapa fija o de tipo Chino.

El espacio que contiene al gas debe ser hermético por lo cual se aplican pinturas sintéticas u otras que garanticen la hermeticidad requerida (Nzila, Dewulf et al. 2012). La construcción de este tipo de digestores requiere de excesivo trabajo y de una rigurosa supervisión de especialistas. Su estructura de mampostería es propensa a la porosidad y agrietamiento (a veces irreparables) dificultando la necesaria hermeticidad y requiriendo el uso de materiales para el sellado. Existen varios diseños de digestores de tapa fija como son el modelo de la India Deebandhu, el Akut y el CAMARTEC cada uno de los cuales tiene un domo de forma esférica como característica central (Nzila, Dewulf et al. 2012). En Cuba se han desarrollado varios modelos adaptados a los recursos existentes, entre los que se destaca en modelo GBV (Guardado, 2007).

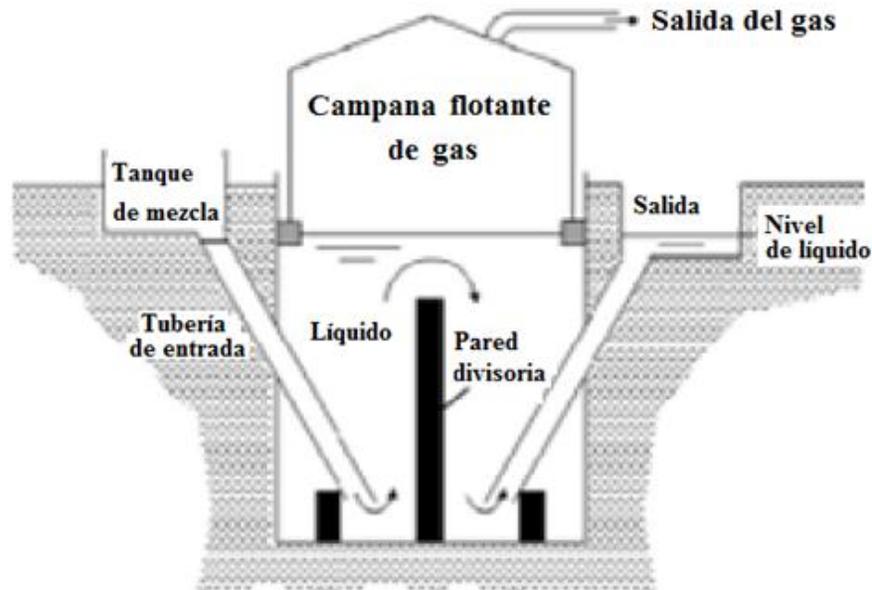
Este tipo de digestor puede ser operado de forma continua o discontinua. Cuando la producción de gas comienza el líquido que se encuentra en el interior del digestor se desplaza hacia el tanque de compensación (salida) mientras que el biogás producido se almacena en el domo. Cuando el biogás es extraído, una cantidad proporcional de líquido regresa hacia el interior del digestor. Por tal motivo, la presión de gas dentro del digestor no permanece constante, incrementándose con la cantidad de biogás almacenado y con la diferencia de alturas entre el nivel interior y exterior del líquido. La fluctuación de esta presión puede complicar el uso final del biogás (Nzila, Dewulf et al. 2012).

Los digestores de tipo Chino pueden manejar sustratos de alto contenido de fibra de conjunto con excremento animal, poseen una vida útil estimada entre 15 y 20 años; y pueden llegar a alcanzar de 6 a 91 m<sup>3</sup> en aplicaciones domésticas y hasta 740 m<sup>3</sup> en aplicaciones industriales (Nzila, Dewulf et al. 2012). En Cuba sus máximos volúmenes a escala doméstica se reportan en el orden de los 70 m<sup>3</sup> y no se conocen experiencias de su aplicación a escala industrial. Su productividad volumétrica oscila entre 0.2 y 0.5 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de digestor al día, la cual constituye la más baja reportada para digestores de pequeño formato (minidigestores). Una vez concluida su construcción se procede a cubrirlas con tierra hasta el tope, para su aislamiento térmico y para contrarrestar la presión interna. Las experiencias en Cuba reportan presiones de trabajo de entre 75 y 90 mm de columna de agua para su uso directo en la cocción de

alimentos (Guardado, 2007). La eficiencia de remoción de materia orgánica es también una de las más bajas reportadas (máximo 50%) debido a su forma cilíndrica que no garantiza el recorrido uniforme del sustrato dentro del digestor, originando cortos circuitos hidráulicos (Montalvo, 2003). Sus costos de inversión pueden variar en función del escenario, la fuente de adquisición de los recursos y la necesidad de contratación de mano de obra.

Los digestores de **campana flotante o de tipo Hindú** (figura 1.3) están formados por un cilindro de mampostería en su parte inferior (con un tope para apoyar la campana) y una campana flotante que almacena el gas en la parte superior. La campana de gas es usualmente construida de metal con planchas de acero de entre 2 y 2.5 mm de espesor, siendo soldadas algunas abrazaderas en su interior como un medio de ruptura de la espuma cuando se ésta se rota. Luego de la eliminación de las suciedades y el óxido en la superficie del metal, la campana debe ser cubierta con pintura de aceite o sintética para protegerla de la corrosión (Nzila. Dewulf et al, 2012). Por tanto, es recomendable aplicar mantenimiento a la campana anualmente para lograr una vida útil de la misma de entre 8 y 12 años. Algunos materiales recomendables son las planchas de acero galvanizado, los plásticos (fibra de vidrio reforzada y planchas de plástico) y el ferro-cemento con recubrimiento para garantizar la hermeticidad del gas.

Los digestores de tipo Hindú son fáciles de entender y operar. Ellos proporcionan gas a una presión relativamente constante ( $\approx 0.1$  bar) y el volumen de gas almacenado se identifica por la posición de la campana. A medida que la producción de gas aumenta la campana metálica se desplaza hacia arriba, indicando un incremento de la cantidad de biogás contenida en el digestor. La campana se encuentra guiada por un marco de mampostería que le proporciona estabilidad y la mantiene erecta, pudiendo estar flotando dentro del líquido que se encuentra en el interior del digestor o en una chaqueta de agua separada (figura 1.3). En este último caso se ha estimado una mayor vida útil de la campana ya que permite que se apliquen capas de aceite usado.

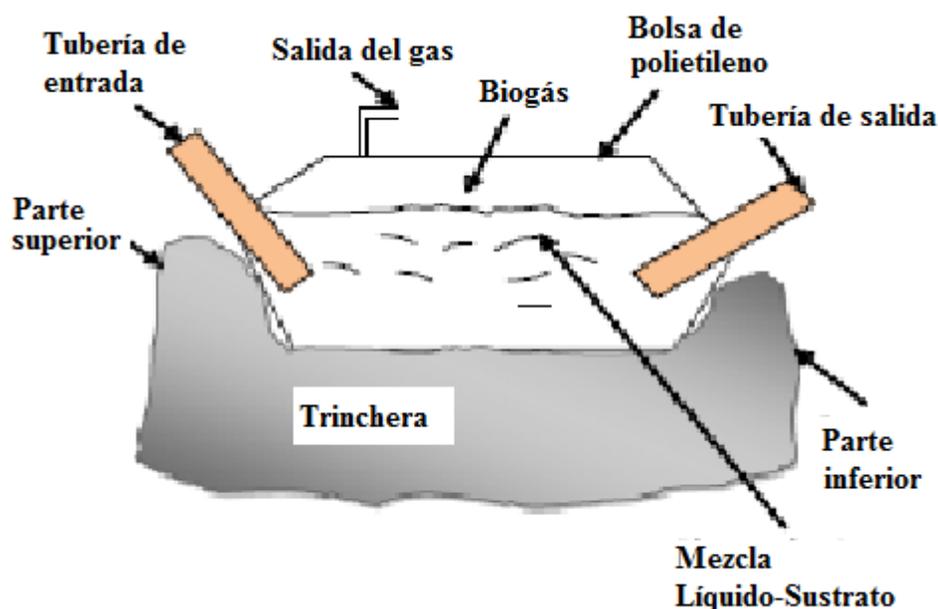


**Figura 1.3:** Esquema general de un digestor de campana flotante o de tipo Hindú.

Los digestores de tipo Hindú alcanzan tamaños de entre 5 y 70 m<sup>3</sup> a escala doméstica, mientras que volúmenes de hasta 248 m<sup>3</sup> han sido reportados como de uso industrial (Nzila. Dewulf et al, 2012). En Cuba no se conocen experiencias de su aplicación a escala industrial. Su productividad volumétrica es ligeramente superior (0.3-0.6 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de digestor al día) a la de los digestores de tipo Chino, lo cual se debe a la forma uniforme en que fluye la materia orgánica dentro del digestor (Nzila. Dewulf et al, 2012). Al igual que los de tipo chino, los costos de inversión pueden variar en función del escenario, la fuente de adquisición de los recursos y la necesidad de contratación de mano de obra.

Los digestores **tubulares o de bolsa de polietileno** (figura 1.4), están formados por una bolsa “resistente a las condiciones ambientales”. La bolsa es considerada como frágil y susceptible a daños mecánicos y a los cambios de la temperatura ambiental, por lo que su vida útil se considera de entre 2 y 5 años (Nzila. Dewulf et al, 2012). La exposición extrema a temperaturas bajas puede reducir considerablemente la producción de biogás debido a su insuficiente aislamiento con el medio exterior,

mientras que las altas temperaturas ambientales pueden catalizar la producción de otros compuestos volátiles diferentes del metano. Este tipo de plantas requiere, por lo tanto, de protección y posible aislamiento térmico contra condiciones climáticas extremas lo cual incrementa los costos de instalación de los mismos (Nzila. Dewulf et al, 2012). Aun así, los recursos necesarios para construir las bolsas de polietileno son considerados menores que los que se necesitan para construir digestores de tipo Chino e Hindú.



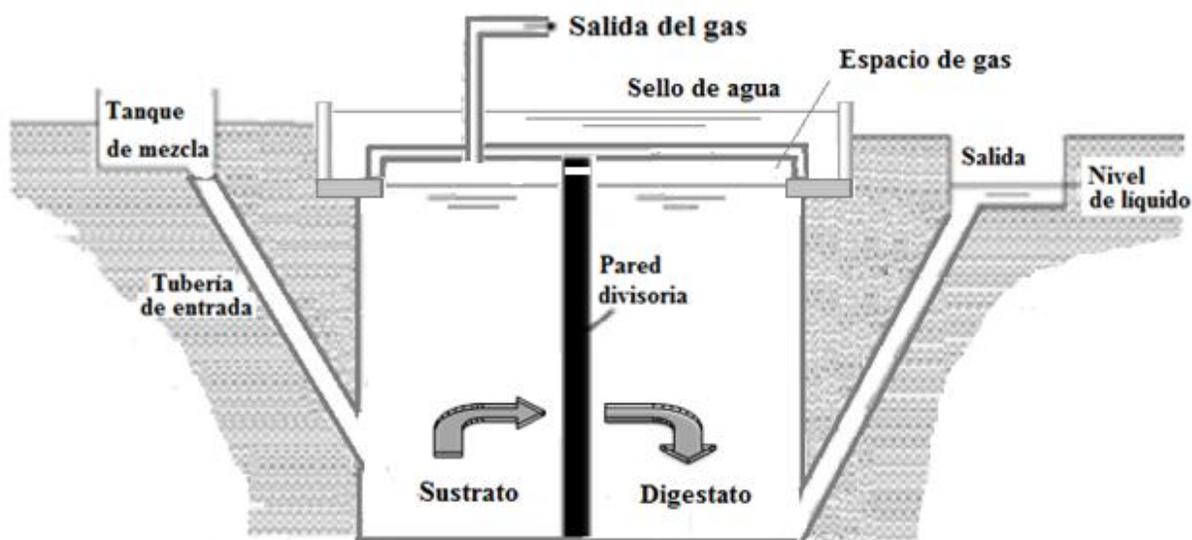
**Figura 1.4:** Esquema general de un digestor tubular o de bolsa de polietileno.

El principio de funcionamiento es muy sencillo, los sustratos son alimentados por la tubería de entrada y ocupan la parte inferior de la bolsa mientras que el tope sirve como contenedor del biogás generado durante la operación. La presión de trabajo es usualmente alcanzada colocando pesos sobre la bolsa. Una vez digerido el sustrato alimentado, el digestato abandona la bolsa por la tubería de salida (Nzila. Dewulf et al, 2012).

A diferencia de los de tipo Chino e Hindú, este tipo de digestor no admite residuales fibrosos, están diseñados fundamentalmente para el tratamiento de excretas (Nzila.

Dewulf et al, 2012). Los volúmenes máximos que pueden alcanzar oscilan entre los 5 y 20 m<sup>3</sup> por lo que su aplicación se ve limitada a escenarios con baja disponibilidad de sustratos (ej., centros porcinos de 150 cerdos equivalentes). Estos digestores pueden producir entre 0.3 y 0.8 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de digestor al día, con eficiencias de remoción de DQO de entre 65 y 70% (Sosa, 2005, Nzila. Dewulf et al, 2012). Son muy útiles para soluciones rápidas por sus cortos períodos de instalación y se puede reciclar el material plástico una vez culminada su vida útil (Nzila. Dewulf et al, 2012).

Los digestores **híbridos**, también conocidos y patentados como **tecnología MININT** (figura 1.5), han sido difundidos en Cuba a escala doméstica e industrial con resultados satisfactorios. Al igual que los de tipo Chino consisten en un sistema cerrado, construido usualmente de mampostería y bajo el nivel de la tierra.



**Figura 1.5:** Esquema general de un digestor híbrido o tecnología MININT.

Estos digestores poseen una tapa fija, que a diferencia de los de tipo Chino, tiene una forma plana. Como todos los demás, poseen una entrada para alimentar el sustrato y una salida de digestato que a escala doméstica actúa como tanque de compensación. Para garantizar la hermeticidad de estos digestores y evitar salideros de gas se coloca un sello de agua en la parte superior de su tapa que forma un estanque que puede ser utilizado para la acuicultura o para otros usos (Hermida, 2014). Debido a la forma plana

de sus estructuras, su construcción no requiere de excesivo trabajo o de una rigurosa supervisión de especialistas.

Los digestores híbridos combinan en su principio de funcionamiento el de los digestores de tipo chino pues son de tapa fija, el de los de bolsas de polietileno pues en su interior funcionan como digestores secuenciales o de flujo pistón y el de los de tipo Hindú ya que tienen en su interior un laberinto marcado por paredes verticales. En ellos los sustratos son alimentados por la tubería de entrada y ocupan la parte inferior del digestor mientras que, en el tope, un espacio de unos 30 cm sirve como contenedor del biogás generado durante la operación (figura 1.5), (Hermida, 2014). La presión de trabajo es usualmente alcanzada según el tanque de compensación a escala doméstica (al igual que los de tipo Chino).

Estos digestores pueden ser utilizados para tratar una gran variedad de residuales ya sean diluidos o concentrados y han sido aplicados en el país a residuales de la industria azucarera, excretas bovinas y porcinas y residuos vegetales (e.j., restos de la producción del tomate). A escala doméstica sus volúmenes oscilan entre los 3 y 50 m<sup>3</sup>, mientras que a escala industrial alcanzan volúmenes de hasta 1000 m<sup>3</sup>. La productividad volumétrica de gas de estos digestores oscila entre 1.0 y 1.2 m<sup>3</sup> de biogás por m<sup>3</sup> de digestor al día, siendo la mayor reportada dentro de los minidigestores existentes en Cuba (Hermida, 2014). Este hecho permite la asimilación de mayores cargas orgánicas para lograr iguales eficiencias de remoción.

### **1.3 Uso eficiente del biogás.**

A escala pequeña y mediana, el biogás ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar en combustión directa en estufas simples. Sin embargo, también puede ser utilizado para iluminación, para calefacción y como reemplazo de la gasolina y del combustible diesel en motores de combustión interna, según plantea (Oria, 2010).

El uso del biogás en comunidades rurales satisface las necesidades de energía para la cocción de alimentos, utilizando residuos porcinos, vacunos u otros ha tenido un crecimiento en los últimos años dado por la depresión económica de los países donde

el combustible usado para estos fines se ha visto afectado, según plantea (López. and Romero, 2006).

Existen otros ejemplos del aprovechamiento del biogás como fuente de energía pero con estos elementos se puede afirmar que constituye una excelente oportunidad el aprovechamiento de los residuos biodegradables, para eliminar las cargas contaminantes de estos y disminuir el consumo de energía.

### 1.3.1 Diferentes aplicaciones del uso del biogás.

El fin de la captación de biogás por medio de digestores es el aprovechamiento energético del mismo, utilizándolo como combustible para accionar motores de combustión interna, quemadores y demás fines calóricos, así como para lámparas de iluminación. Existe actualmente una variedad de dispositivos de aplicación del biogás que van desde simples hornillas hasta micro turbinas generadoras de electricidad.

- **Motores**

El desarrollo de **motores** utilizando como combustible al biogás, ha llevado al uso de aplicaciones como el bombeo, riego y transmisión de potencia mecánica. Una aplicación muy útil con motores accionados por medio de biogás es la de desplazamiento de líquidos y hasta sólidos por medio de una motobomba como la que se muestra en el (Anexo 4), (Equipamentos, AMC).

- **Generadores**

El generador eléctrico a base de biogás, es una vía más para el aprovechamiento de biogás con un fin ecológico, el mismo contribuye a la generación de una energía limpia y satisface las necesidades de la sociedad; como se ilustra en el (Anexo 5).

- **Quemadores**

El uso calórico es una de las aplicaciones directas de la producción de biogás, el cual es utilizado para calentar agua, alimentos, y cualquier fin que requiera este tipo de aplicación (después de limpiarlo del CO<sub>2</sub> contenido en el biogás), se puede considerar como un combustible ideal. La aplicación de tipo calórico más común es la cocción de alimentos por medio de quemadores (hornillas) y cocinas, calentadores, etc. como los que se muestran a continuación.

- ✓ **Cocina de dos quemadores a base de biogás**, son aquellas que brindan una opción más para las cocinas cubanas, como se muestra en el (Anexo 6), (Quemador de cocina de biogás).
- ✓ **Arrocera a base de biogás** es de gran utilidad para los hogares, la misma es de nueva generación, como se ilustra en el (Anexo 7), (Olla de arroz de biogás).
- **Lámparas.**

La iluminación también se ha convertido en una opción para aplicaciones del biogás, a continuación se presenta una lámpara a base de biogás con encendido electrónico marca Shenzhen Puxin Science & Technology Co, Ltd. como se muestra en el (Anexo 8), (Hannover Biogas lamp).

- **Microturbinas.**

Las microturbinas son uno de los tipos de aplicaciones para el biogás más recientes, son prácticas, un recurso renovable muy innovador y eficiente en la generación de energía eléctrica, con los que se obtiene bajas emisiones de gases de efecto invernadero, poca contaminación de ruidos y bajo costo de mantenimiento, como la que se muestra a continuación en el (Anexo 9), (Capstone Microturbine Biogas).

#### **1.4 Impacto ambiental.**

El uso del biogás en el mundo ha contribuido de manera significativa a la disminución del deterioro ambiental, algunos países han buscado reunir esfuerzos para combatir la contaminación del aire, sin embargo, algunas sustancias químicas como el metano ( $\text{CH}_4$ ) son contribuyentes al deterioro de la capa de ozono por la emisión de gases de efecto invernadero. Cuba no ha sido ajena a esta problemática global y para ello se ha vinculado de manera activa en el remplazo de las sustancias agotadoras de la capa de ozono y en la ejecución de mecanismos de desarrollo limpio para la reducción del cambio climático generado por los gases de efecto invernadero.

El metano ( $\text{CH}_4$ ) es un hidrocarburo limpio renovable, surge fundamentalmente de la descomposición de la materia orgánica en ambientes pobres en oxígeno, y sus principales productores son el ciclo digestivo del ganado, ciertos cultivos, los vertederos en menor proporción, los incendios forestales, la actividad de las termitas y otros

insectos. Es también es el responsable del 16 % del “gas de efecto invernadero”, lo que significa que su presencia en la atmósfera afecta la temperatura y el sistema climatológico de la Tierra. Se considera que es un gas potente debido a que es 21 veces más eficaz para atrapar el calor dentro de la atmósfera que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en un período de más de 100 años, y tiene una vida atmosférica corta de aproximadamente entre 9 a 15 años (Steinfeld. B, 2008). Una de las técnicas para la recuperación del metano es la utilización de los digestores de escala pequeña.

Las emisiones de este gas de efecto invernadero (Tabla 1.2), se estiman en 500 millones de toneladas por año, de las cuales entre 70 y 120 millones provienen de la actividad bovina, siendo la especie que más contribuye a estas emisiones (Steinfeld. B, 2008).

**Tabla 1.2.** Concentraciones de los principales gases de efecto invernadero.

<b>Gas</b>	<b>Concentraciones preindustriales (1750)</b>	<b>Concentraciones troposféricas (2008)</b>	<b>Potencial del calentamiento global *</b>
Dióxido de Carbono	277 mg L <sup>-1</sup>	386 mg L <sup>-1</sup>	1
Metano	600 µg L <sup>-1</sup>	1728 µg L <sup>-1</sup>	34
Óxido nitroso	270-290 µg L <sup>-1</sup>	318 µg L <sup>-1</sup>	293

Potencial del calentamiento global directo (PCG) relativo al CO<sub>2</sub> en un horizonte temporal de 100 años, y este depende de su capacidad de absorción, reflexión, radiación y del tiempo de duración del efecto. Fuente: (Steinfeld. B, 2008).

Con una buena utilización del metano obtendremos varios aspectos positivos tanto para la atmósfera como para el ser humano.

- Disminución de olores.
- Disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Reemplazo de combustibles no renovables por un combustible renovable.

Se ha calculado que un 1 m<sup>3</sup> de biogás utilizado para cocinar evita la deforestación de 0.335 ha de bosques con un promedio de 10 años de vida de los árboles (Sasse. L, 1989).

### **1.5 Experiencias de utilización del biogás en Cuba.**

En los países tropicales la energía de biomasa puede desempeñar un papel fundamental. La política de la utilización de fuentes de energía renovables (Berriz. L, 2000) se viene empleando desde las décadas de los setenta y desde los años ochenta se ejecutaron varias plantas de biogás en diferentes provincias (Guardado. A, 1995), destacándose la provincia Villa Clara con la creación del Grupo de Biogás en el año 1993, con la función de crear una cultura a todos los niveles sobre el uso y los beneficios de la tecnología del biogás.

El potencial de biogás en Cuba en las condiciones actuales está en el orden de 152 mil toneladas de combustible convencional por año, proveniente de unas 78 toneladas de vertimientos biodegradables que constituyen hoy en día, en su conjunto, una de las principales fuentes de contaminación del país (Lugones. B, 2003). Por esta razón, se puede percibir el interés constante de la población rural y urbana, principalmente, sobre el tema de obtención de biogás a través de digestión anaerobia de materia orgánica.

Sin embargo, en las plantas industriales, que operan bajo regímenes de máximo aprovechamiento de biogás, se reportan emisiones de este biogás entre el 2 y 6% debido a escapes, deficiencias de las tecnologías, y exceso de producción de biogás cuando la demanda es baja (Afrane. G. and A. Ntiamoah, 2011). La situación de las emisiones de metano en plantas de biogás de pequeño y mediano volumen, instaladas en el medio rural cubano, no ha sido reportada en la literatura. Por tal motivo, resulta de particular interés su determinación, como una vía para la proyección hacia la mitigación de dichas emisiones, proponiendo alternativas de máximo aprovechamiento del biogás.



## *Capitula* II

## **CAPÍTULO II**

### **Introducción**

En este capítulo se exponen las técnicas y herramientas empleadas para el cumplimiento de los objetivos trazados. Para ello se llevaron a cabo cuatro etapas:

- Etapa I: Caracterización de la producción de biogás en el territorio
- Etapa II: Selección de los biodigestores
- Etapa III: Determinación del aprovechamiento del biogás
- Etapa IV: Elaboración del plan de acciones

#### **2.1. Etapa I: Caracterización de la producción de biogás en el territorio.**

Se utilizó el inventario de biodigestores del municipio de Cabaiguán actualizado hasta el año 2015. En este inventario se describe el tipo de tecnología utilizada (Chino, Hindú, Pistón, MININT), su volumen de digestión, las personas a las que beneficia y los residuos utilizados. Por tal motivo, durante la caracterización, se mostró el crecimiento de la producción de biogás en el municipio de Cabaiguán, los principales tipo de biodigestores que han sido construidos allí, los volúmenes de producción que ellos tienen instalado, la productividad de biogás esperada, el número de personas que benefician y el índice número de personas beneficiadas/volumen de digestión.

Para mostrar estos resultados se utilizaron diagramas de Pareto, con el objetivo de establecer una comparación cuantitativa y ordenada de elementos o factores según su contribución a un determinado efecto. En las plantas de biogás de pequeño y mediano volumen; se tomó como referencia para este estudio el inventario del 2015 del municipio de Cabaiguán, en el cual está reflejado las tecnologías más utilizadas en el municipio, sus volúmenes de digestión y a las personas que benefician dichas plantas. El objetivo de esta comparación es clasificar dichos elementos o factores en dos categorías: los problemas muy importantes de los menos importantes, estableciendo un orden de prioridades.

### 2.1.1 Principios y características del diagrama de Pareto.

El principio de Pareto se basa en que el 80% de los problemas son provenientes de apenas el 20% de las causas, según (Pareto, 1848).

A continuación se comentan una serie de características que ayudan a comprender la naturaleza de la herramienta.

#### Priorización

Identifica los elementos que más peso o importancia tienen dentro de un grupo.

#### Unificación de criterios

Enfoca y dirige el esfuerzo de los componentes del grupo de trabajo hacia un objetivo prioritario común.

#### Carácter objetivo

Su utilización, fuerza al grupo de trabajo a tomar decisiones basadas en datos y hechos objetivos y no en ideas subjetivas.

Aquí se comentan una serie de características fundamentales de las tablas y los diagrama de Pareto, como son:

Simplicidad: Tanto la tabla como el diagrama de Pareto no requieren de cálculos complejos ni técnicas sofisticadas de representación gráfica.

Impacto Visual: El diagrama de Pareto comunica de forma clara, evidente y de un “vistazo”, el resultado del análisis de comparación y priorización.

Los **pasos** para realizar este **diagrama de Pareto** según (Pareto, 1848) son:

**Paso 1.** Determinar el problema o efecto a estudiar.

**Paso 2.** Investigar los factores o causas que provocan ese problema y como recoger los datos referentes a ellos.

**Paso 3.** Anotar la magnitud (por ejemplo: euros, número de defectos, etc.) de cada factor. En el caso de factores cuya magnitud es muy pequeña comparada con la de los otros factores incluirlos dentro de la categoría “Otros”.

**Paso 4.** Ordenar los factores de mayor a menor en función de la magnitud de cada uno de ellos.

**Paso 5.** Calcular la magnitud total del conjunto de factores.

**Paso 6.** Calcular el **porcentaje total** que representa cada factor, así como el **porcentaje acumulado**.

El primero de ellos se calcula como:

$$\% = (\text{magnitud del factor} / \text{magnitud total de los factores}) \times 100$$

El porcentaje acumulado para cada uno de los factores se obtiene sumando los porcentajes de los factores anteriores de la lista más el porcentaje del propio factor del que se trate. Una vez completado este paso tenemos construida la (tabla 2.3) de pareto.

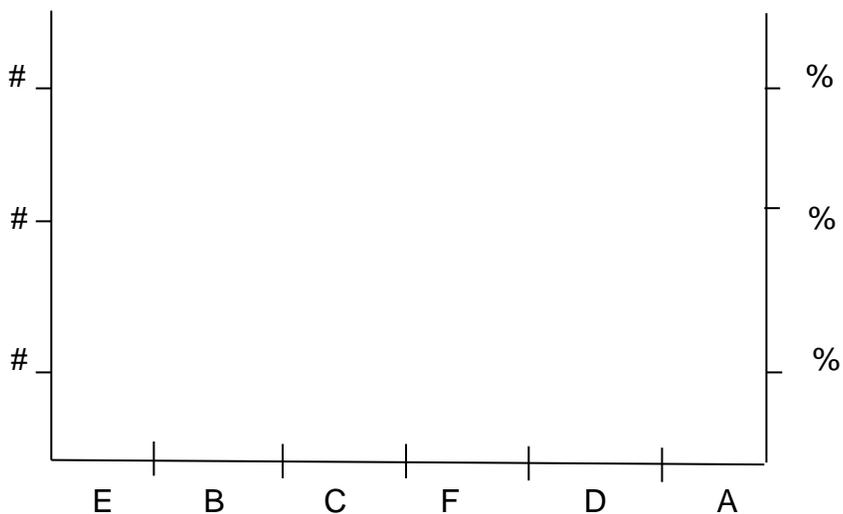
**Tabla 2.3.** Wilfredo Pareto, Tabla de Pareto. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Categorías</b>	<b>No</b>	<b>No. acumulado</b>	<b>% del total</b>	<b>% acumulado</b>
E	#	#	%	%
B	#	#	%	%
C	#	#	%	%
F	#	#	%	%
D	#	#	%	%
A	#	#=	%	%=
TOTAL	#=		%=	

**Paso 7.** Dibujar dos ejes verticales y un eje horizontal. Situar en el eje vertical **izquierdo** la magnitud de cada factor. La escala del eje está comprendida entre cero y la magnitud total de los factores. En el **derecho** se representan el porcentaje acumulado de los factores, por tanto, la escala es de cero a 100. El punto que representa a 100 en el eje derecho está alineado con el que muestra la magnitud total

(Características)

(Porcentaje acumulado)

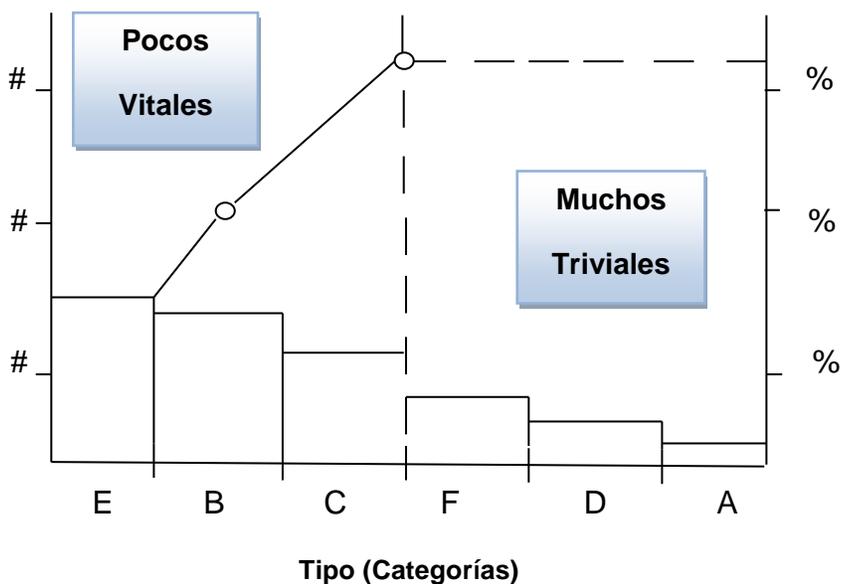


Tipo (Categorías)

Figura 2.1. Wilfredo Pareto, Grafico de Pareto. Fuente: Elaboración Propia.

(Características)

(Porcentaje acumulado)



Tipo (Categorías)

Figura 2.2. Wilfredo Pareto, Grafico de Pareto. Fuente: Elaboración Propia.

de los factores detectados en el eje izquierdo. Por último, el eje **horizontal** muestra los factores empezando por el de mayor importancia, como se muestra en la (figura 2.1).

**Paso 8.** Se trazan las barras correspondientes a cada factor. La altura de cada barra representa su magnitud por medio del eje vertical izquierdo, como se muestra en la (figura 2.2).

**Paso 9.** Se representa el gráfico lineal que representa el porcentaje acumulado calculado anteriormente. Este gráfico se rige por el eje vertical derecho.

**Paso 10.** Escribir junto al diagrama cualquier información necesaria, sea sobre el diagrama o sobre los datos.

## 2.2 Etapa II: Selección de los biodigestores.

### 2.2.1 Cálculo del tamaño de la muestra.

Una vez caracterizada la producción de biogás durante el periodo del 2012 -2015 en el municipio de Cabaiguán, se procedió a seleccionar la muestra.

Cuanto mayor es el tamaño de la población, mayor será el de la muestra necesaria para obtener un resultado fiable. No obstante, esta relación no es proporcional. Así, el tamaño de la muestra varía de forma mucho menos significativa que el de la población. Incluso si se considera que la población tiende estadísticamente a finita y cuya variable principal es de tipo cualitativo; para el cálculo del tamaño de la muestra se aplica la expresión (2.1) a continuación (Vivanco. M, 2005).

$$n = \frac{NZ^2 * pq}{d^2 (N - 1) + Z^2 * pq} \quad (2.1)$$

Donde:

p = proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población de referencia y fue tomada 0.8.

q = proporción de la población de referencia que no presenta el fenómeno en estudio (1- p) y fue tomada 0.2

N = Tamaño de la población

Z = Es la desviación del valor medio que aceptamos para lograr el nivel de confianza deseado. En función del nivel de confianza que busquemos, usaremos un valor

determinado que viene dado por la forma que tiene la distribución de Gauss. Se utilizó un nivel de confianza del 95%, con  $Z=1,96$ .

$d$  = nivel de precisión absoluta. Referido a la amplitud del intervalo de confianza deseado en la determinación del valor promedio de la variable en estudio. Este valor fue tomado como 0.15.

### 2.2.2 Cálculo del tamaño de los estratos.

Teniendo en cuenta la existencia de varios tipos de biodigestores en el municipio de Cabaiguán, se realizó un muestreo estratificado para lograr que cada tecnología esté proporcionalmente representada en la muestra final. Para esto se utilizó la siguiente expresión (Vivanco. M, 2005):

$$fh = \frac{n}{N} \tag{2.2}$$

Donde,  $fh$  es la fracción del estrato,  $n$  el tamaño de la muestra y  $N$  el tamaño de la población.

Una vez determinada la cantidad de plantas a muestrear en cada estrato, se realizó un muestreo aleatorio simple dentro de los estratos.

### 2.2.3. Muestreo aleatorio simple.

El muestreo aleatorio simple es el más conocido. Este tipo de muestreo garantiza que cada elemento constituyente de la población tenga la misma probabilidad de ser muestreado, con independencia de cualquier otro elemento. Puede realizarse con o sin reposición de los elementos muestreados a la población. En este trabajo el muestreo aleatorio simple se realizó sin reposición de cada uno de los miembros de los estratos. Para ello primeramente se enumeraron cada uno de los elementos y posteriormente se utilizó el SPSS 15 para Windows y de esta forma quedaron seleccionadas las plantas a muestrear por tipo de tecnología.

## 2.3 Etapa III: Determinación del aprovechamiento del biogás.

### 2.3.1 Parámetros de diseño de los biodigestores.

Primeramente, se recopilaron de la literatura los parámetros de operación de las plantas existentes (biodigestores Chino, Hindú, MININT, y de bolsa o flujo pistón) en el municipio de Cabaiguán (tabla 2.1). Los parámetros recopilados fueron: producción volumétrica de biogás ( $m^3 m^{-3}R \cdot d$ ), la eficiencia de remoción de DQO (%) y la carga orgánica asimilable ( $kg DQO m^{-3}R \cdot d$ ).

**Tabla 2.1.** Parámetros de diseño y operación de biodigestores de mediano y pequeño volumen. Fuente: Elaboración Propia.

Parámetros	Unidades	Chino	Hindú	MININT	Referencia
<b>Eficiencia remoción DQO</b>	%	50	65	65	(Nzila, Dewulf et al. 2012); (Guardado 2007; (Hermida, 2014)
<b>Productividad de Biogás</b>	$m^3 m^{-3}R d^{-1}$	0.2 - 0.5	0.3 - 0.6	0.8 -1.0	(Nzila, Dewulf et al. 2012); (Guardado 2007; (Hermida, 2014)
<b>Carga orgánica Volumétrica</b>	$kg SV m^{-3}R d^{-1}$	1	1	2	(Chacon, 2007)
<b>Vida útil</b>	Años	15 - 20	15-dic	15 - 20	(Nzila, Dewulf et al. 2012); (Guardado 2007; (Hermida, 2014)
<b>Volumen máximo</b>	$m^3$	70	70	1000	(Nzila, Dewulf et al. 2012); (Guardado 2007; (Hermida, 2014)

Estos parámetros se utilizaron para estimar la producción de biogás en cada uno de los biodigestores seleccionados mediante balances de materiales. Para esto se tuvo en cuenta un principio básico de la ingeniería: "la materia ni se crea ni se destruye, sino que se transforma.

### 2.3.2 Procedimiento de cálculo.

Para la determinación de los balances de materiales primeramente se determinó la  $DQO_{total\_alimentada}$  ( $kg DQO d^{-1}$ ) a estos reactores, según la expresión 2.3.

$$DQO_{total\_alimentada} = \frac{V * Co * 100}{Er} \quad (2.3)$$

Siendo, V el volumen total de la planta (m<sup>3</sup>), Co la carga orgánica volumétrica (kg DQO m<sup>-3</sup> R \* d), y Er la eficiencia de remoción de DQO (%).

De esta forma, la DQO<sub>total\_removida</sub> (kg DQO d<sup>-1</sup>) se determinó por la ecuación 2.4 y brindó como información la materia orgánica total que las bacterias son capaces de degradar en cada biodigestor.

$$DQO_{total\_removida} = \frac{Er * DQO_{total\_alimentada}}{100} \quad (2.4)$$

La diferencia entre la DQO alimentada y removida arrojó la cantidad de materia orgánica que abandona la planta en el efluente (DQO<sub>efluente</sub>, kg DQO d<sup>-1</sup>) del biodigestor (digestato).

$$DQO_{efluente} = DQO_{total\_alimentada} - DQO_{total\_removida} \quad (2.5)$$

Es conocido que la DQO removida en una planta de biogás es fundamentalmente transformada en metano (90%) y el restante valor es utilizada para el crecimiento microbiano (10%). Por lo tanto, la siguiente expresión determinó el metano producido para su utilización (kg DQO d<sup>-1</sup>).

$$DQO_{CH_4} = DQO_{total\_removida} \quad (2.6)$$

El metano producido en kg DQO d<sup>-1</sup> puede ser calculado también como kmol de CH<sub>4</sub> d<sup>-1</sup>, teniendo en cuenta que 1 kmol CH<sub>4</sub> equivale a 64 kg DQO. Así mismo, se determinó el metano producido en m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, teniendo en cuenta el volumen molar de los gases (22.4 m<sup>3</sup> kmol<sup>-1</sup>). Finalmente, se asumió una composición de metano en el biogás del 60% (Werner, 1989), para determinar el volumen de biogás (V<sub>biogás</sub>, m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>) según la expresión 2.7.

$$V \text{ biogás} = \frac{m^3 CH_4}{0,6} \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta este volumen de biogás y el volumen del biodigestor reportado en el inventario del municipio de Cabaiguán, se calculó la productividad volumétrica ( $P_v$ ,  $m^3 m^{-3} R^{-1} d$ ) para ajustarla con los parámetros de diseño reportados en la tabla 2.1.

$$P_v = \frac{V \text{ biogás}}{V \text{ digestor}} \quad (2.8)$$

Teniendo en cuenta que 1  $m^3$  de biogás satisface la demanda de una vivienda de cinco personas, se calculó el biogás que se consume en cada biodigestor. El número de personas a que brinda servicio cada biodigestor, se pudo obtener del inventario de biodigestores del municipio Cabaiguán del 2015.

Por tanto, el sobrante de biogás (60% metano) en cada biodigestor se pudo calcular como la diferencia entre biogás producido ( $V_{\text{biogás}}$ ) y biogás consumido ( $V_{\text{consumido}}$ ).

### 2.3.3 Discusión de los resultados.

Una vez determinado el aprovechamiento del biogás en los biodigestores seleccionados mediante el muestreo, se realizaron diagramas de Pareto para mostrar las plantas que representaron el 80% del total de biogás y metano emitido a la atmósfera.

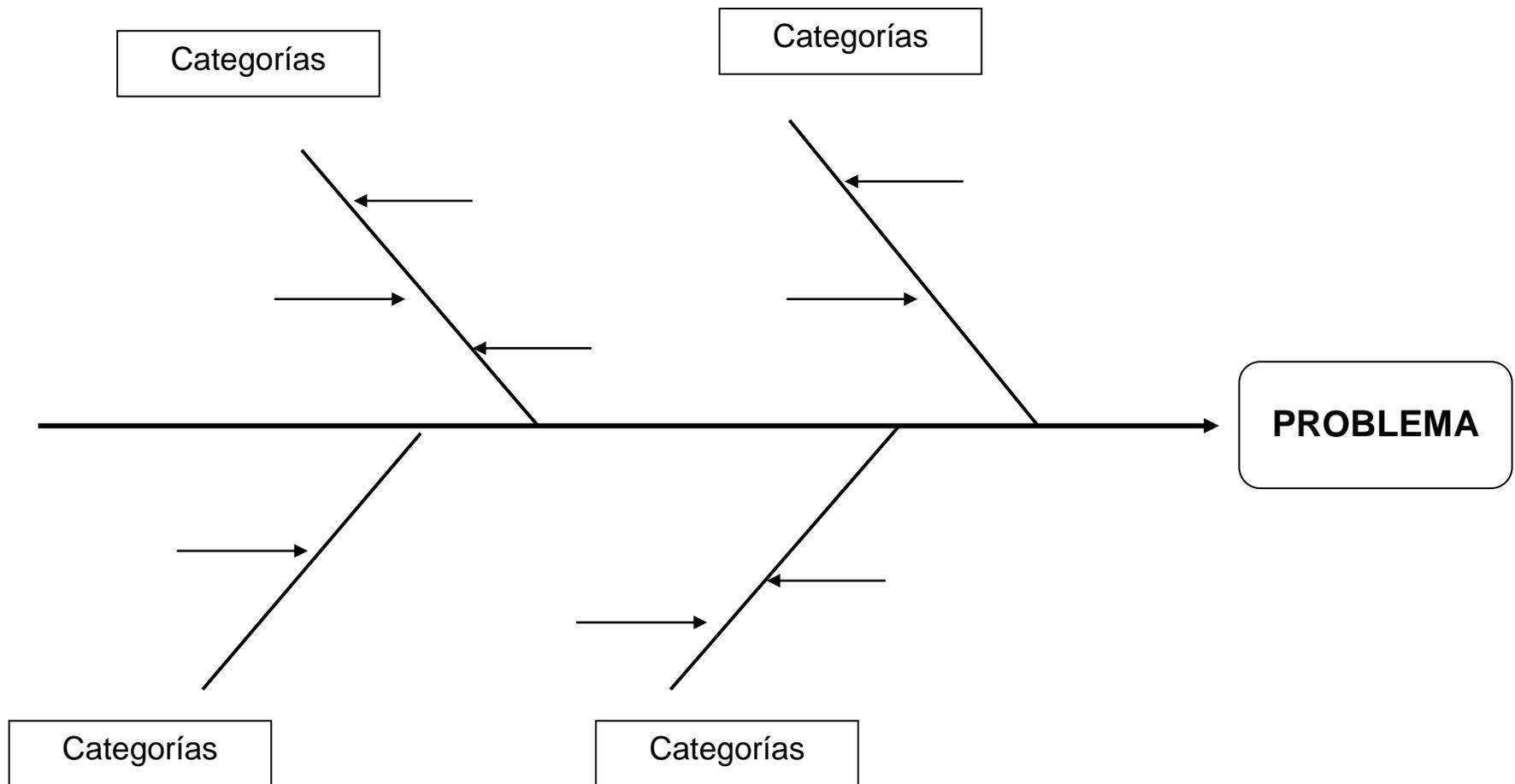
## 2.4 Etapa IV: Elaboración del plan de acciones.

### 2.4.1 Diagrama de Causa y Efecto.

El Diagrama de Causa-Efecto o Ishikawa se utilizó para identificar las causas del bajo aprovechamiento del biogás en las plantas de pequeño y mediano volumen. La naturaleza gráfica del diagrama permitió organizar gran cantidad de información sobre el problema y determinar exactamente las posibles causas. Su realización se llevó a cabo mediante los siguientes pasos según (Watson. Greg, 2004):

- **Identificar el problema:** el problema (el efecto que generalmente está en la forma de una característica de calidad) es algo que queremos mejorar o controlar.
- **Registrar la frase que resume el problema:** escribir el problema identificado en la parte extrema derecha del papel y dejar espacio para el resto del diagrama hacia la izquierda. Dibujar una caja alrededor de la frase que identifica el problema (algo que se denomina algunas veces como la cabeza del pescado), (figura 2.3).
- **Dibujar y marcar las espinas principales:** las espinas principales representan el input principal/ categorías de recursos o factores causales. No existen reglas sobre que categorías o causas se deben utilizar. Para este estudio se subdividieron las categorías como problemas de tipos técnicos, organizativos, de métodos y de materiales.
- **Dibujar una caja alrededor de cada título:** el título de un grupo para su Diagrama de Causa y Efecto puede ser diferente a los títulos tradicionales; esta flexibilidad es apropiada y se invita a considerarla.
- **Realizar una lluvia de ideas de las causas del problema:** este es el paso más importante en la construcción de un Diagrama de Causa y Efecto. Las ideas generadas en este paso guiarán la selección de las causas de raíz. La misma se llevó a cabo durante el diagnóstico de recorrido de manera que ambas técnicas sirvieron de base para la determinación de las causas. Fue importante que solamente causas y no soluciones del problema fueran identificadas. El propósito de la herramienta fue siempre estimular ideas.

Figura 2.3: Diagrama de Causa-Efecto o Ishikawa. Fuente: Elaboración propia.



## 2.5 Definición del plan de acción.

Un plan de acción es una presentación resumida de las tareas que deben realizarse por ciertas personas, para contribuir al uso eficiente del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen. Para su elaboración se asignó un responsable que supervise y ejecute los planes de acción marcados en los plazos previstos, utilizando un monto de recursos asignados con el fin de lograr un objetivo dado.

Todo Plan de acciones debe contener tareas a realizar de forma inmediata para el caso que se produzcan desviaciones de los objetivos propuestos durante su periodo de vigencia. En este epígrafe se definieron que acciones concretas se deben tomar para mitigar las causas que provocaron el efecto.

En este Plan de Acción o Programa vienen detallados los siguientes aspectos:

- Acciones específicas que van a tomarse.
- Personas responsables y participantes de llevarlas a cabo.
- Fecha de cumplimiento de dichas acciones.
- Observaciones relevantes en cada una de ellas.

**Tabla 2.4** Plan de acciones para el uso eficiente del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen. Fuente: Elaboración Propia

No	Acción	Fecha de Cumplimiento	Participantes	Responsables	Observaciones
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					

De esta forma se han descrito los materiales más importantes y los métodos desarrollados durante el período evaluativo correspondiente a esta tesis. Los resultados obtenidos y su discusión se muestran en el siguiente capítulo.



# *Capitula* III

## **CAPITULO III**

### **Introducción**

El capítulo tiene como objetivo, mostrar el resultado principal en el análisis de los aportes y potencialidades del uso del biogás de las plantas de pequeño y mediano volumen para un mejor desarrollo sostenible de la provincia de Sancti Spíritus, mediante un análisis descriptivo de las plantas de biogás existentes en el territorio, a partir de un balance detallado de cada una de estas.

### **3.1 Caracterización de la producción de biogás a pequeña y mediana escala en Sancti Spíritus.**

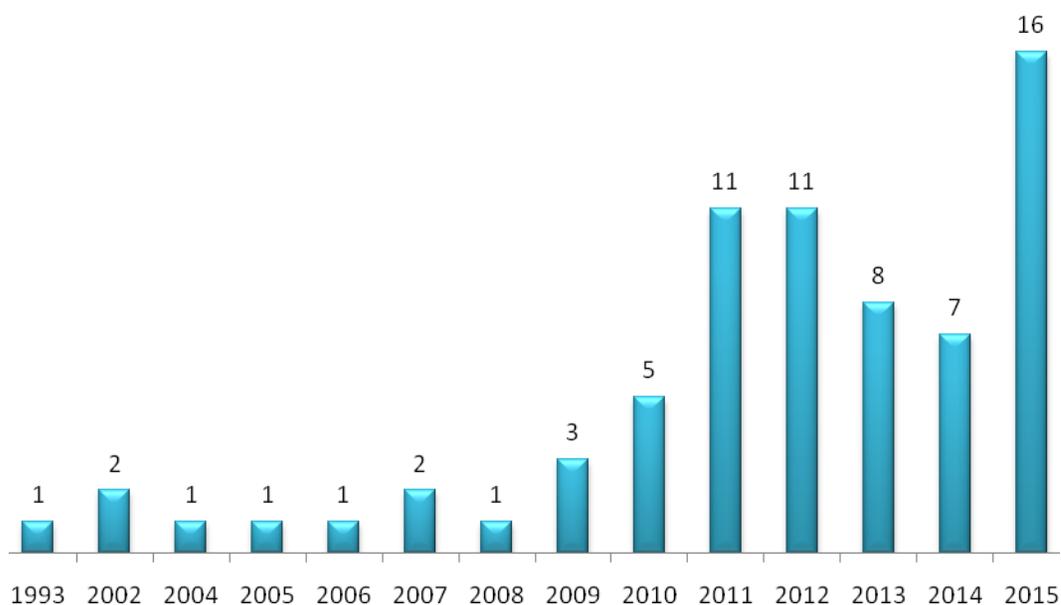
A partir de 1990 se produce un nuevo incremento, causado por la crisis energética del país que tuvo lugar en los años del período especial; ante esta situación varios productores o personas individuales montaron sus propias plantas con el fin de obtener un combustible estable, barato y limpio para cocinar (Contreras. L, 2006), como es el caso de Pedro Espineira ubicado en La Aurora con una instalación de 22 años de funcionamiento ininterrumpido, con residual de vacuno, con tecnología hindú, con un volumen de 2.5m<sup>3</sup>, se beneficia 5 viviendas y fue instalada en el año 1993.

A inicios del 2000, donde se habían construido aproximadamente 16 plantas en dicha fecha. Este incremento ocurre por una mayor conciencia ambiental de los actores, al ver la necesidad de tratar los residuales generados y obtener, además, una energía alternativa.

Después de un censo realizado en el año 2015 de digestores construidos y puesto en marcha en el territorio de Cabaiguán (Anexo 10), se demostró que la experiencia en el diseño, construcción y explotación de plantas de biogás de pequeño y mediano volumen ha ido en incremento porque se ha ganado una mayor divulgación y conocimiento de los beneficios que puede aportar la tecnología de digestión anaerobia de residuos orgánicos. Donde se habían construido 86 plantas según reporte de (Ordaz, 2014) en la provincia de Sancti Spíritus, hoy contamos con 70 plantas solamente en el municipio de Cabaiguán lo que significa un gran incremento de uso

del biogás, por lo que se percibe una mayor conciencia ambiental de los actores, y ver la necesidad de tratar los residuales generados y obtener una energía alternativa.

El objeto de estudio se ha centralizado en el municipio de Cabaiguán, en el cual se realizó un censo con el objetivo de reducir la carga orgánica vertida en los diferentes lugares de nuestra provincia, disminuir la deforestación por el uso discriminado de leña con fines energéticos. En la actualidad existen 70 plantas de biogás en el municipio de Cabaiguán, la mayoría son de nueva construcción del año 2013 al 2015 ver (figura 3.1).

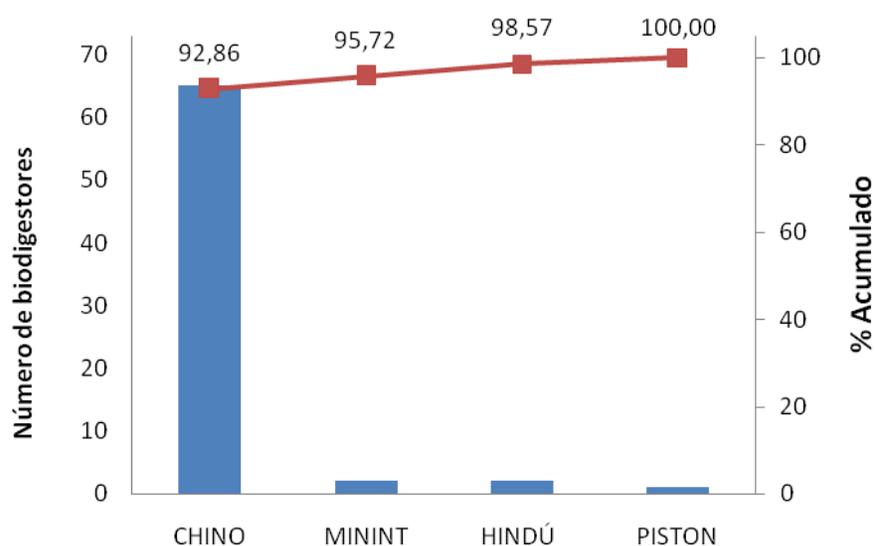


**Figura 3.1** Total de Biodigestor por año. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en el figura 3.1 existen 70 plantas de biogás en el municipio de Cabaiguán desde 1993 hasta el 2015; en los años del 2011 al 2015 comienza una nueva evolución en la construcción de instalaciones para dar tratamientos a diferentes residuos. Se aprecia que en los años 2011 y 2012 se comportó por igual la construcción de las plantas de biogás a diferencia que en 2013 y 2014 hubo un descenso en dichas construcciones, para el 2015 fueron construidos 16 biodigestores de los cuales se encuentran funcionando en estos momentos y beneficiando a 436 personas.

### 3.2 Tipo de plantas más usadas en el municipio de Cabaiguán.

Para el sector privado económicamente es más factible la construcción de plantas de biogás de pequeñas y mediana escala, reconocidas por su estabilidad, eficiencia y simplicidad de operación (Chino, Hindú, Pistón, MININT). Como se representa en el figura 3.2, la tecnología que prevalece son los biodigestores de tipo chino con una cantidad de 65, después le sigue MININT e hindú con 2, y los de flujo pistón con 1. Por los tanto, los biodigestores de tipo chino representan casi el 93% del total de plantas instaladas en el municipio de Cabaiguán. Teniendo en cuenta el postulado de Pareto, actuando sobre los digestores de tipo chino se pueden solucionar el 80% de los problemas existentes en la producción de biogás a pequeña y mediana escala.



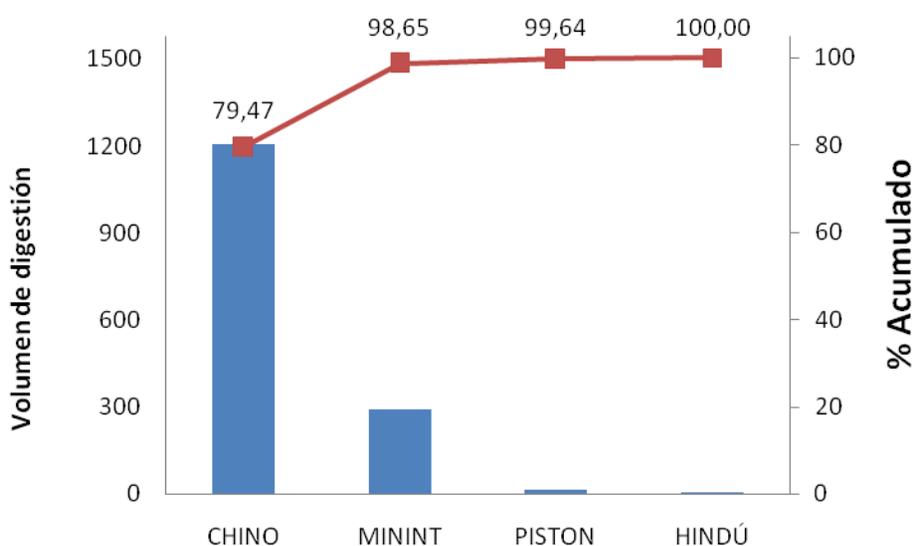
**Figura 3.2** Tipos de plantas. Fuente: Elaboración Propia.

Sin embargo, la variable número de biodigestores no es suficiente ya que pueden existir mayores volúmenes de digestión en otras tecnologías, beneficiando a un mayor número de personas. Por tal motivo, se hace necesario estudiar otras variables como son:

- El volumen de digestión instalado por tipo de tecnología
- El número de personas a que brindan servicio

### 3.3 Volumen de digestión por tecnología.

El volumen de digestión es el espacio del biodigestor empleado para la degradación de la materia orgánica presente en un residual. Este elemento es usualmente utilizado para el diseño de las plantas y permite estimar la cantidad de recursos necesarios para su construcción y por ende el costo de inversión de las mismas. En el figura 3.3 se muestra que cerca del 80% del volumen de digestión instalado se corresponde también con la tecnología de tipo chino, seguido por la tecnología MININT que posee el 19% del volumen de digestión total existente en Cabaiguán.

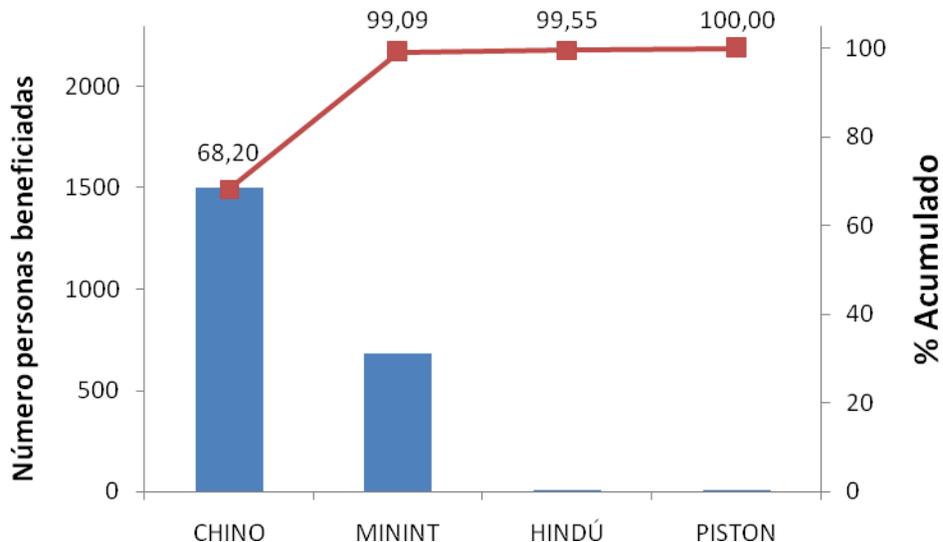


**Figura 3.3** El volumen digestión por tecnología.

Por lo tanto, actuando sobre los digestores de tipo chino también se puede abordar el 80% del volumen de digestión instalado en la pequeña y mediana escala.

### 3.4 Número de personas que se benefician.

El número de personas beneficiadas con cada tipo de tecnología es un elemento importante a considerar. Aunque el 93% de los biodigestores instalados en Cabaiguán son de tipo chino, representando también el 80% del volumen de digestión instalado, ellos solo benefician al 68.2% del total de personas beneficiadas con la producción de biogás a pequeña y mediana escala (figura 3.4).



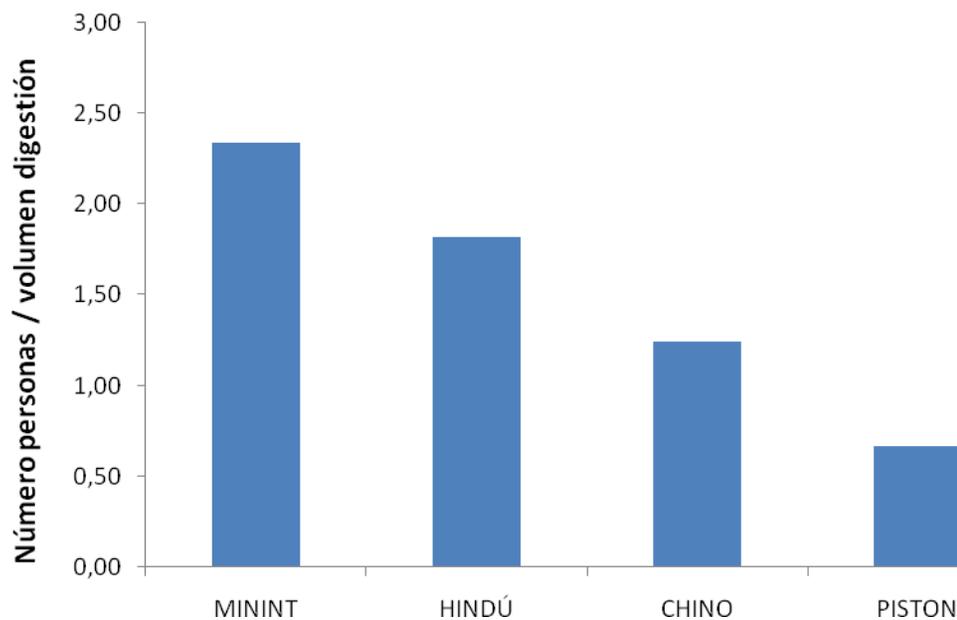
**Figura 3.4** Número de personas que se benefician.

Por esta razón, para actuar el 80% de las personas beneficiadas con la producción de biogás a pequeña y mediana escala, es importante incluir también a la tecnología MININT, que representó cerca del 31% del total.

### 3.5 Índice número de personas beneficiadas/volumen de digestión.

El índice número de personas beneficiadas/volumen de digestión visualiza la capacidad de una tecnología para producir biogás con 1 m<sup>3</sup> de digestión, por lo cual constituye un indicador de la eficiencia del biodigestor. La figura 3.5 mostró el comportamiento de este índice para cada tipo de tecnología. Contradictoriamente, los biodigestores más difundidos y que mayores volúmenes de digestión poseen benefician un menor número de personas por cada m<sup>3</sup> de digestión que los de tipo MININT e Hindú.

Este comportamiento está asociado a los bajos índices de productividad volumétrica reportados para los biodigestores de tipo Chino (0.5 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> R d<sup>-1</sup>), mientras que los de tipo Hindú y MININT poseen mayores productividades volumétricas (0.6 y 1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>R d<sup>-1</sup>, respectivamente).



**Figura 3.5** Número de personas beneficiadas por volumen de digestión.

### 3.6 Aplicación de la herramienta.

#### 3.6.1 Plan de Muestreo.

Para determinar el plan de muestreo, primeramente, se identificaron la totalidad de los digestores en el municipio de Cabaiguán. A partir de enero del año 1993 hasta el primer semestre del año 2015, se pudo constatar la existencia de un total de 70 biodigestores, agrupadas en 4 tipos de tecnología. Teniendo en cuenta el elevado número de plantas instaladas, se decidió trabajar con una porción de la población de los biodigestores del municipio Cabaiguán. A partir de la población de estudio, se calculó el tamaño de la muestra según la ecuación (2.1) definida en el epígrafe 2.2 del capítulo anterior, dando como resultado 20 biodigestores a muestrear. Los cálculos realizados para el muestreo se exponen en el Anexo 11.

Debido a la existencia de 4 tipos de tecnologías se decidió conformar cuatro estratos (Chino, Hindú, MININT y Pistón). De aquí se tomó una muestra estratificada según el tipo de tecnología cuyos resultados se muestran en la tabla 3.2. Como se pudo observar es necesario tomar una muestra de 18 digestores Chinos, 1 Hindú y 1 MININT. Note que los digestores de bolsa o flujo pistón dieron un número cercano a cero y se decidió no incluirlos en este estudio.

**Tabla 3.2.** Estratificación de los estratos. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Tipos de Biodigestores (estratos)</b>	<b>Estratificación</b>
Chino	18
Hindú	1
MININT	1

Para garantizar que exista la misma probabilidad de ser elegido durante el muestreo, se utilizó el método de muestreo aleatorio simple. El listado de la población objeto de estudio, se introdujo en el paquete estadístico SPSS 15 para Windows, y se seleccionó una muestra aleatoria hasta completar exactamente 20 biodigestores según el número de plantas por estrato de la tabla 3.2. Los resultados de las plantas seleccionadas se muestran en la tabla 3.3 (Ver también inventario de plantas en Anexo 12).

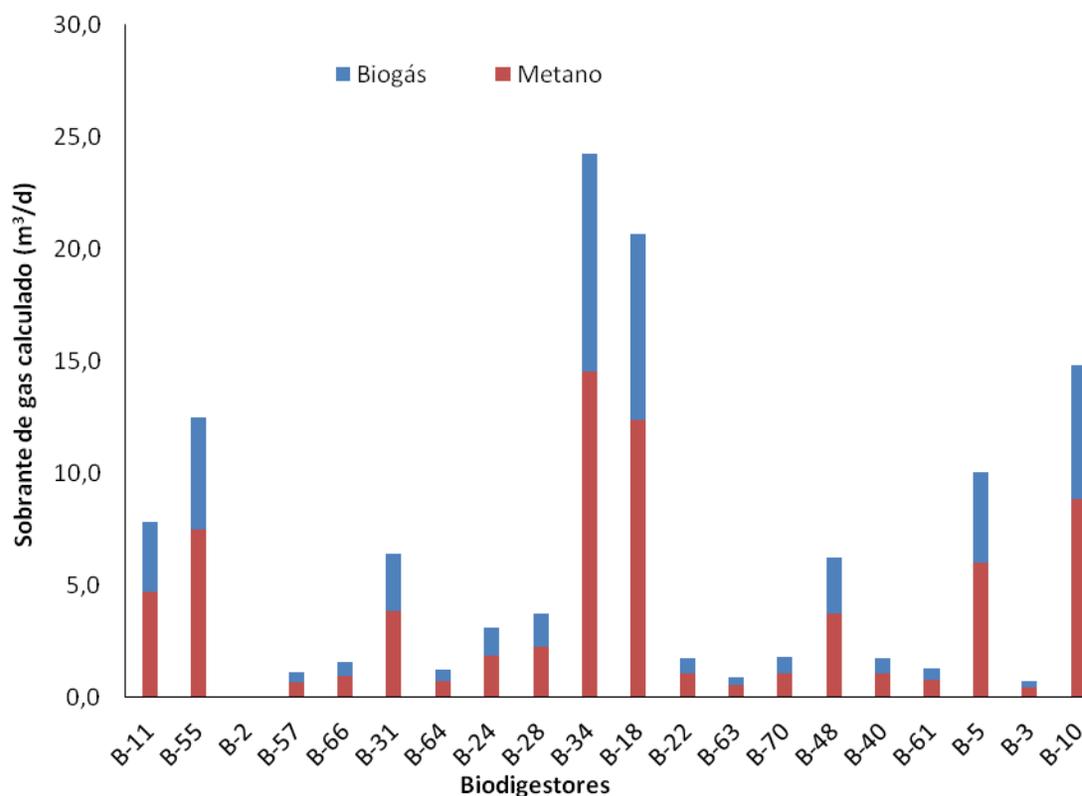
**Tabla 3.3.** Muestreo aleatorio simple. Fuente: Elaboración Propia.

<b>Tipos de Biodigestores</b>	<b>Estratificación</b>	<b>Muestreo aleatorio simple</b>
Chino	18	<b>B-11; B-55; B-2; B-57; B-66; B-31; B-64; B-24; B-28; B-34; B-18; B-22; B-63; B-70; B-48; B-40; B-61; B-5</b>
Hindú	1	<b>B-3</b>
MININT	1	<b>B-10</b>

### **3.7 Análisis de la demanda de biogás en los biodigestores.**

Al analizar la demanda de biogás en cada biodigestor, se pudo observar que sólo el digestor de tipo Chino B-2 opera de acuerdo al biogás demandado (figura 3.7). Es decir, los cálculos teóricos muestran que este biodigestor no produce sobrante de biogás (Anexo 12). Aunque se observó que la mayoría de los digestores seleccionados producen un exceso de biogás, 9 (B-57, B-66, B-64, B-22, B-63, B-70, B-40, B-61 y B-3) de los 20 biodigestores seleccionados producen sobrantes por cercanos a 1 m<sup>3</sup> de

biogás, lo cual podría resultar adecuado teniendo en cuenta que se parte de cálculos teóricos de producción-demanda (figura 3.7).

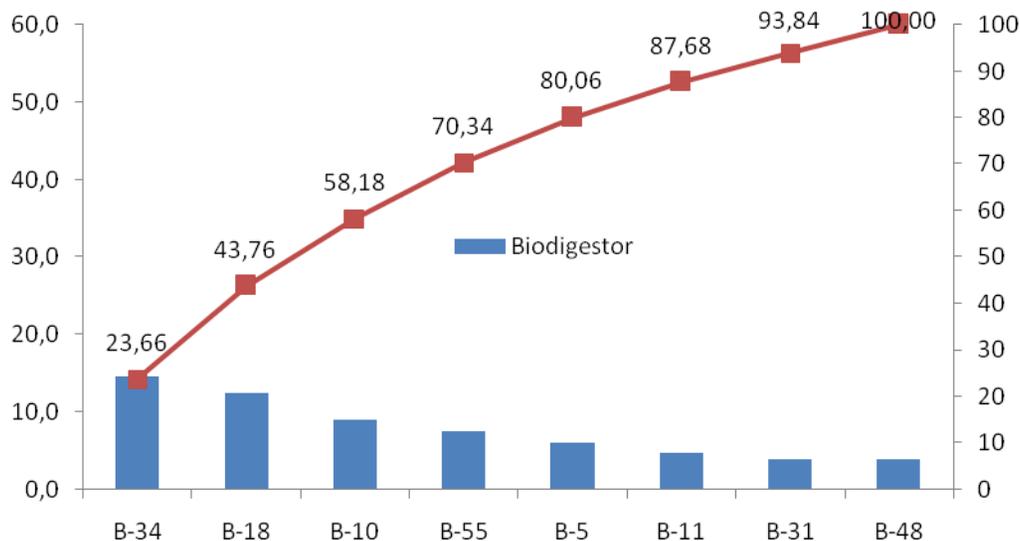


**Figura 3.7.** Sobrante de gas calculado (m³/d).

Sin embargo, se observó que 8 (B-11, B-55, B-31, B-34, B-18, B-48, B-5 y B-10) de los biodigestores podrían generar entre 5 y 25 m³/d de biogás en exceso, lo cual constituye un indicador de prioridad para el seguimiento y control de dichas plantas (figura 3.7).

### 3.8 Plantas identificadas con emisiones de metano.

A partir de la identificación de los 8 biodigestores con emisiones de biogás por encima de 5 m³/d se realizó un diagrama de Pareto para identificar los que determinan el 80% de las emisiones de metano (figura 3.8). De esta forma se evidenció, que los biodigestores B-34, B-18, B-10, B-55 y B-5 emiten el 80% del metano total excedente en estas 8 plantas.



**Figura 3.8** Sobranse de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>/d).

### 3.9 Diagrama de Sankey.

Los diagramas de Sankey son comúnmente utilizados para mostrar los flujos de cualquier proceso. Las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 mostraron los diagramas de Sankey para los digestores B-34, B-10 y B-55, respectivamente.

Según los datos reportados en el inventario de los biodigestores para el municipio de Cabaiguán y los cálculos realizados en esta investigación; el biodigestor B-34 (Tipo Chino) convierte el 50% de la materia orgánica alimentada al reactor en metano (figura 3.9). Esta planta brinda servicios de cocción a un total de 10 personas (desayuno, almuerzo y comida) (Anexo 10) lo que representa una demanda de metano equivalente al 3.8% de la materia orgánica contenida en el sustrato y un 7.6% del total de metano producido. Por esta razón, se estimó que más del 92% del metano generado en el digestor B-34 es emitido a la atmósfera.

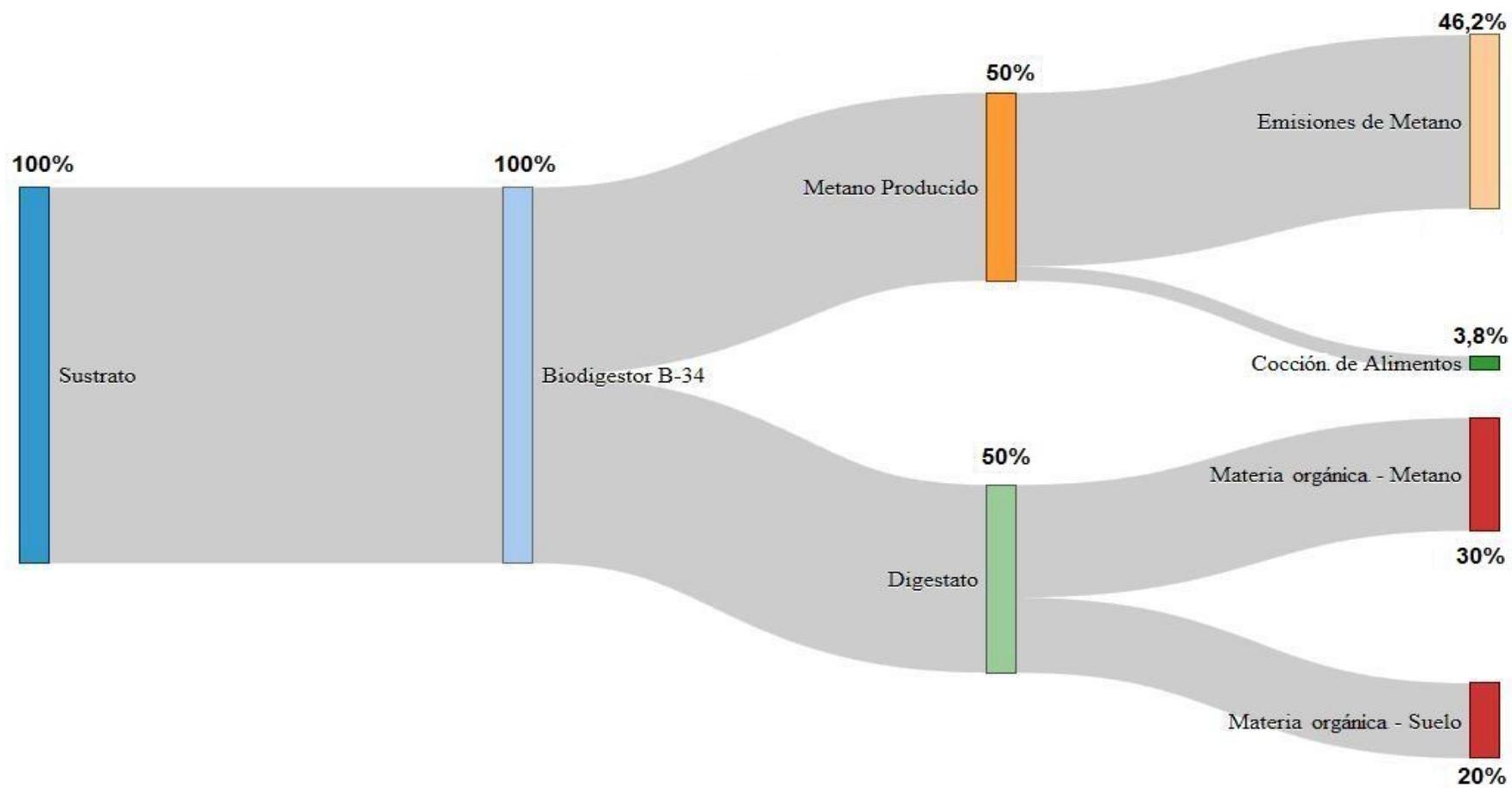


Figura 3.9 Biodigestor B-34 (Chino).

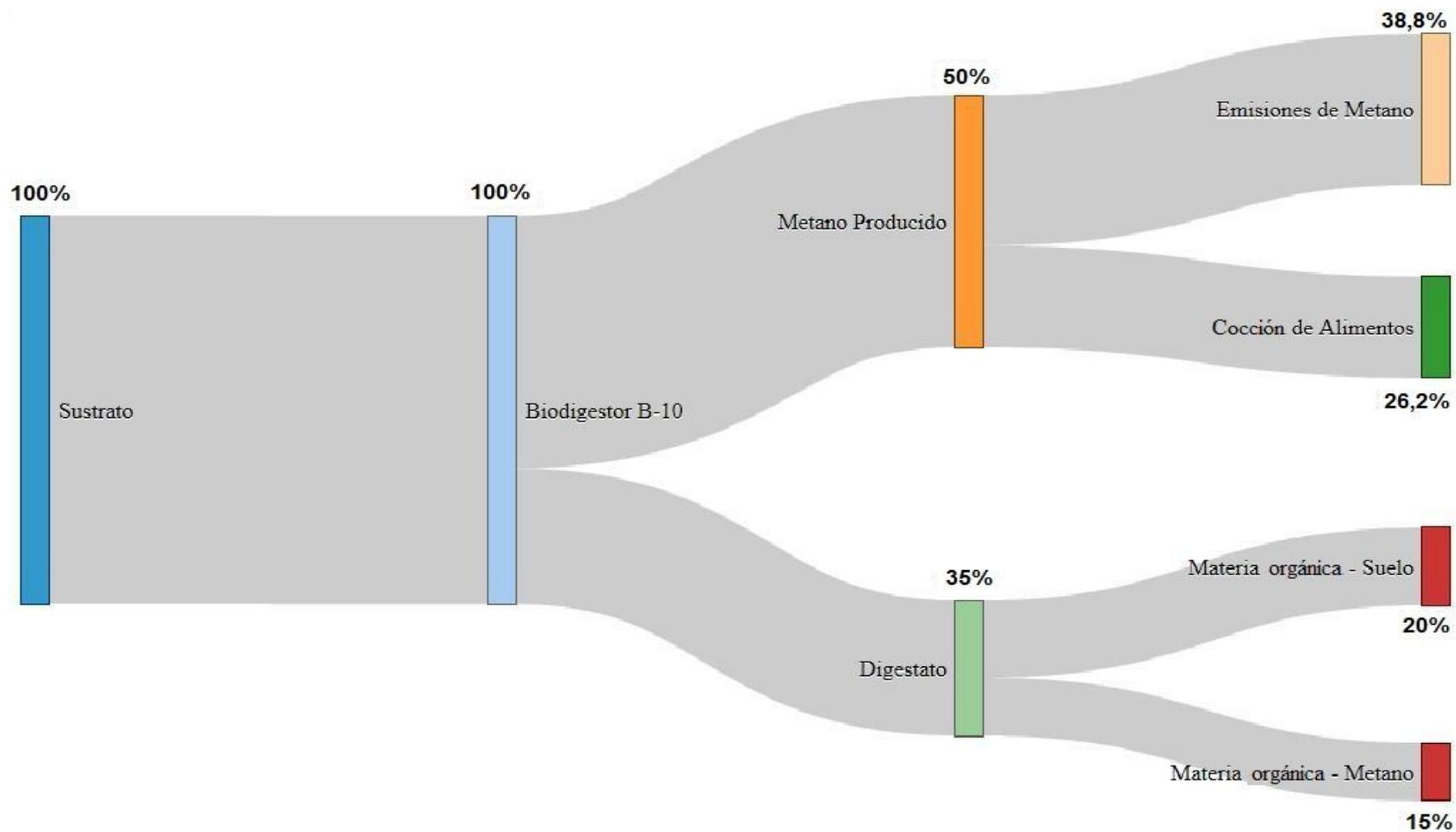


Figura 3.10 Biodigestor B -10 (MININT).

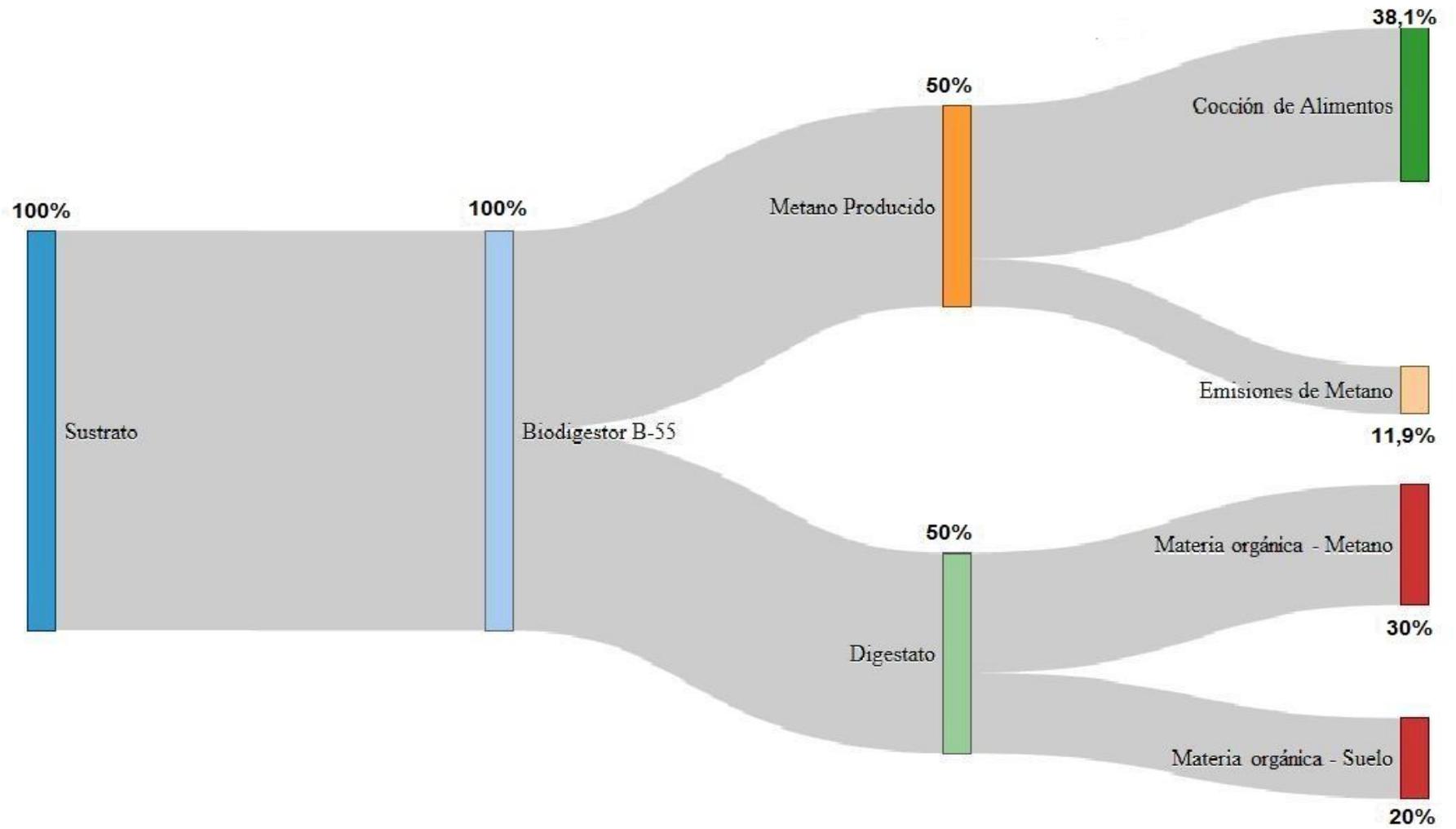


Figura 3.11 Biodigestor B -55 (Chino).

Por otra parte, el 50% de la materia orgánica presente en el sustrato abandona el biodigestor como efluente sólido-líquido (digestato). De aquí, un 60% podría ser transformada a metano (considerando que el 80% del sustrato es biodegradable) durante la descomposición del digestato, lo que evidencia que cerca del 76% de la materia orgánica se emite al medio ambiente en el biodigestor B-34. Un comportamiento muy similar se observó para el biodigestor B-18 (Anexo 13).

Sin embargo, el biodigestor B-10 (Tipo MININT) mostró una mayor conversión de la materia orgánica a metano (65%), así como un mejor aprovechamiento del metano generado (26.2%) durante la etapa de cocción de los alimentos (figura 3.10). No obstante, se estimó que el 53.8% de la materia orgánica contenida en el sustrato es enviada a la atmósfera durante la operación de biodigestor B-10.

Otros biodigestores como el B-55 (Tipo Chino) tuvo emisiones totales de metano inferiores al 42% de la materia orgánica alimentada, con un aprovechamiento para la cocción de los alimentos superior al 38% (figura 3.11). El diagrama de Sankey para el biodigestor B-5 (Tipo Chino) se mostró en el Anexo 14.

### **3.10 Confección del diagrama de Causa y Efecto.**

A partir de estas deficiencias detectadas se confeccionó el diagrama causa efecto (figura 3.12), que permitió identificar con mayor exactitud las principales causas del bajo aprovechamiento del metano producido en los biodigestores de pequeño y mediano volumen, de una manera gráfica. Las principales causas detectadas se distribuyeron entre las de tipo organizativas, técnicas, materiales y de métodos.

Dentro de las causas de tipo técnicas se encontraron:

- Sobredimensionamiento del biodigestor: puede conllevar a producciones de biogás superiores a las demandadas.
- Existencia de fugas: pueden ocurrir debido a grietas en la cúpula o por la propia naturaleza de los digestores.
- Uso de tecnologías de baja eficiencia: conlleva a bajas conversiones de la materia orgánica a metano y altas emisiones durante la descomposición del digestato.

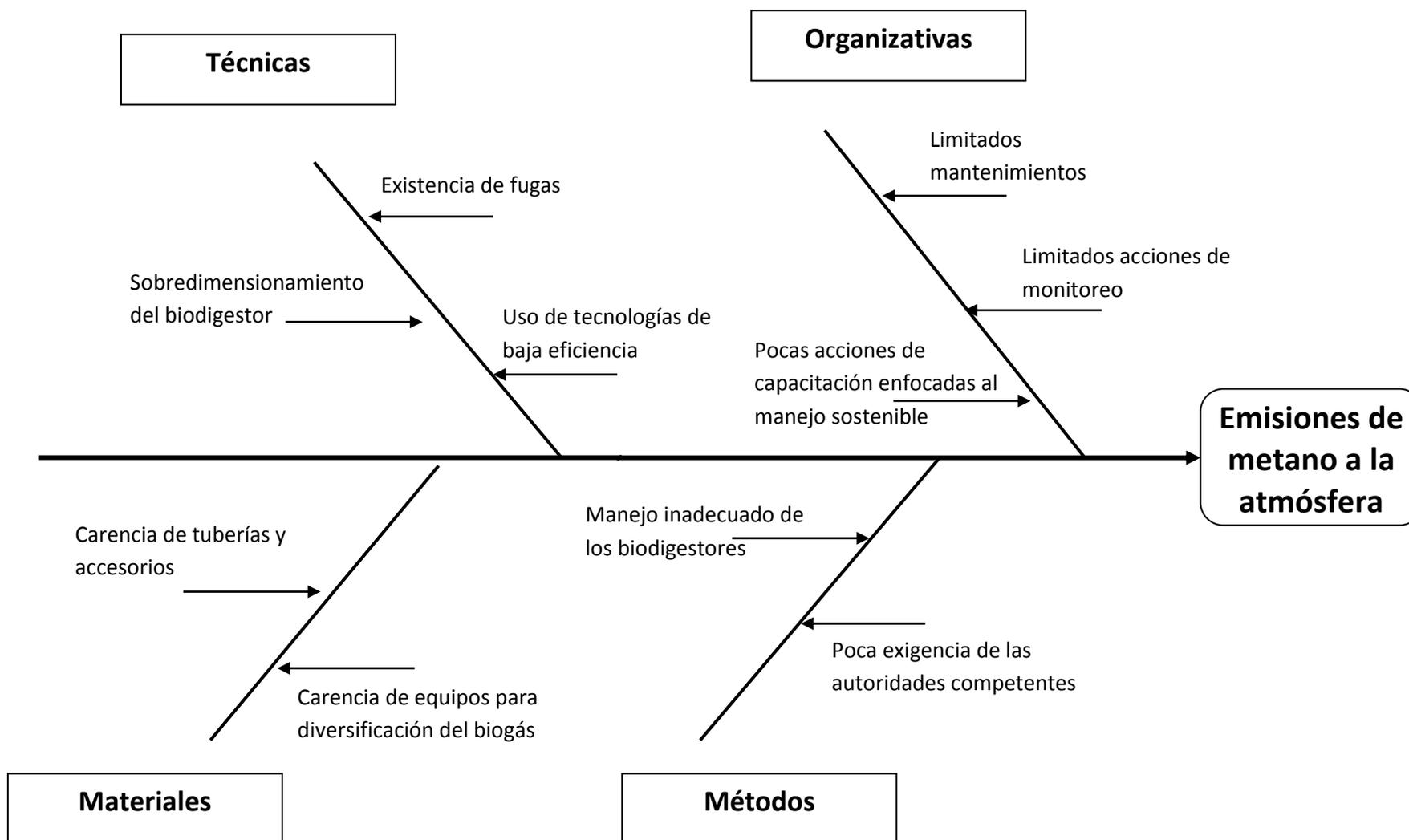


Figura 3.12 Diagrama Causa-Efecto. Fuente: Elaboración Propia.

Dentro de las causas de tipo organizativas se encontraron:

Limitados mantenimientos: reducen la capacidad de conversión de la materia orgánica a metano, e incrementan las probabilidades de correnca de fugas. Limitadas acciones de monitoreo: conllevan al desconocimiento sobre el funcionamiento de la planta.

Pocas acciones de capacitación enfocadas al manejo sostenible: reduce la percepción de los usuarios de la tecnología sobre el uso eficiente del metano producido y el aprovechamiento de la materia orgánica.

Dentro de las causas de tipo materiales se encontraron:

Carencia de tuberías y accesorios: limitan las posibilidades de crear redes de gas y de reparación de fugas.

Carencia de equipos para diversificación del biogás: limita las posibilidades de uso final del biogás.

Dentro de las causas por los métodos empleados se encontraron:

Manejo inadecuado de los biodigestores: también puede ocasionar una reducción en la capacidad de conversión de la materia orgánica a metano.

Poca exigencia de las autoridades competentes: reduce la necesidad de los usuarios de operar eficientemente las plantas y aprovechar todo el biogás producido.

### **3.11 Confección del plan de acciones.**

Las principales causas detectadas en el diagrama de causa-efecto, sirvieron de base para la confección de un plan de acción que se mostró en la (tabla 3.4). Allí se mostraron un total de 5 acciones que serán propuestas para su proyección hacia el consumo eficiente del metano producido en los biodigestores de pequeño y mediano volumen. En sentido general las acciones proponen contribuir al manejo eficiente de los biodigestores analizados para eliminar los excedentes de biogás, y contribuir a dar un mejor uso a esta fuente de energía renovable.

**Tabla 3.4** Plan de acciones para el uso eficiente del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen. Fuente:  
Elaboración Propia

No	Acción	Fecha de Cumplimiento	Participantes	Responsables	Observaciones
1	Proponer a la UEB que se valoren alternativas para ofertar equipos que permitan diversificar el uso final del biogás y así aprovechar la capacidad de producción del biodigestor.	Septiembre – Diciembre 2016	Miembros de la UEB y productores	Director UEB	
2	Evaluar la factibilidad técnica y económica de la inexistencia de recursos materiales.	Septiembre – Diciembre 2016	Dpto. Económico UEB, UNISS	J´ Dpto Económico UEB	
3	Evaluar el impacto ambiental de la inexistencia de recursos materiales.	Septiembre – Diciembre 2016	Especialista en medio ambiente, UNISS	Director UEB	
4	Proponer la creación de equipos de trabajo que garanticen el mantenimiento de los biodigestores.	Septiembre – Diciembre, 2016	Miembros de la UEB, productores, UNISS	Director UEB	
5	Continuar capacitando el personal del establecimiento para la adecuada operación de los biodigestores.	Permanente	Miembros de la UEB, productores UNISS	Director UEB	Esta capacitación se actualiza anualmente



*Conclusiones*

## **Conclusiones**

Las conclusiones que se obtuvieron de la realización de este trabajo fueron las siguientes:

1. El estudio bibliográfico permitió demostrar que la producción de biogás es una alternativa energética renovable que se emplea a nivel mundial. Esta tecnología, a pequeña y mediana escala, constituye una solución viable para el medio rural cubano, siendo necesario la estimación de las emisiones de metano como una vía para incrementar eficiencia y reducir los impactos asociados.
2. El diagnóstico permitió estimar que las emisiones de metano a la atmósfera de los biodigestores del municipio de Cabaiguán oscilan entre 5 y 25 m<sup>3</sup>/d, lo que representó un bajo aprovechamiento del metano producido en 8 de las 20 plantas analizadas.
3. Se identificaron como las causas del bajo aprovechamiento del metano las de tipo técnicas como (Sobredimensionamiento del biodigestor, la existencia de fugas y el uso de tecnologías de baja eficiencia); se identificaron también las de tipo organizativas encontrándose (Limitadas acciones de monitoreo, limitados mantenimientos, y pocas acciones de capacitación enfocadas al manejo sostenible); dentro de las causas de tipo materiales se encontraron las (Carencias de equipos para diversificación del biogás, y la carencia de tuberías y accesorios); y por ultimo dentro de las causas por los métodos de encontraron el ( manejo inadecuado de los biodigestores, y la poca exigencia de las autoridades competentes).
4. Se propusieron un total de 5 acciones que permitirán la proyección hacia el mejor aprovechamiento del biogás en plantas de pequeño y mediano volumen.



*Recomendaciones*

## **Recomendaciones**

Como parte de la continuidad de este trabajo investigativo se recomienda:

- Discutir el plan de acciones con los organismos competentes.
- Presentar los resultados finales en el municipio de Cabaiguán para divulgar la situación actual y las perspectivas que existen para el incremento de la producción de energía en los biodigestores de pequeño y mediano volumen.
- Monitorear los biodigestores utilizando técnicas de laboratorio para confirmar los resultados obtenidos.



# *Bibliografía*

## **Bibliografía**

1. Afrane. G. and A. Ntiamoah. (2011). Comparative Life Cycle Assessment of Charcoal, Biogas, and Liquefied Petroleum Gas as Cooking Fuels in Ghana. *Journal of Industrial Ecology* 15(4): 539-549.
2. Angelidaki, I. A. (1997). Angelidaki, I., Ahring, B.K. Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future. III curso de Ingeniería Ambiental , pág. 336-342. Lleida, octubre de 1997.
3. Aye. L. and E. R. Widjaya. (2006). Environmental and economic analyses of waste disposal options for traditional markets in Indonesia. *Waste Management* 26: 1180–1191.
4. Barrera, E. (2007). Propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos.
5. Barrera, E. (2007). Propuestas tecnológicas para producir biogás con fines energéticos. Un estudio de caso en la granja Remberto Abad Alemán. Tesis en opción al grado académico de máster en eficiencia energética, centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Facultad de Ingeniería mecánica, Universidad de Cienfuegos «Carlos Rafael Rodríguez», Cienfuegos, Cuba.
6. Basis., T. P. (2013). *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
7. Berriz. L. (2000). *Cuba y las fuentes renovables de energía*” Cuarta edición, 2000, La Habana Editora de CUBASOLAR. Disponible en:[http://www.cubaenergia.cu/proye\\_enere/proyect\\_enere.htm](http://www.cubaenergia.cu/proye_enere/proyect_enere.htm), Consultado el 29/6/2015.
8. Borroto Bermúdez J. (1999). *Energización de comunidades rurales ambientalmente sostenibles.* Universidad de Cienfuegos. Facultad de Ingeniería Mecánica. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Ediciones LTDA Colombia. pág. 108.

9. Capstone Microturbine Biogas. (s.f.). Global trade strats here. Capstone Microturbine Biogas., Disponible en: Alibaba.com, [http://www.alibaba.com/product-detail/CAPSTONE-MICROTURBINE\\_50020051400.html?spm=a2700.7724838.0.0.QM9h4E](http://www.alibaba.com/product-detail/CAPSTONE-MICROTURBINE_50020051400.html?spm=a2700.7724838.0.0.QM9h4E), consultado el 27/6/2015.
10. Chacon, J. G. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. Cuba Solar, pág 66.
11. Climático, P. d. (2015). Climático, Proyecto de Educación Ambiental Cambio. Camino del cierre de los ciclos del petróleo y del gas natural: Disponible en: <http://unidades.climantica.org/es/unidades/02/crise-enerxetica-e-cambio-climatico/o-esgotamento-dos-combustibles-fosiles-e-o-cambio-climatico/1>, consultado el 20/04/2015.
12. Contreras A. M, e. a. (2009). Comparative Life Cycle Assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. Journal of Cleaner Production 17: 772–779.
13. Contreras. L. (2006). Producción de biogás con fines energéticos de lo histórico a lo Estratégico. Publicado en Revista Futuros , No. 16, Vol. IV.
14. El uso familiar doble quemador de cocina de biogás. (2010). Cocina de biogás, Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/3-5l-family-use-double-burner-bio-cooker-60104484402.html?spm=a2700.7787047.0.0.0F>, consultado el 25/9/2015.
15. Equipamentos, M. e. (AMC). Motobomba de biogás b4t 817 ch bio.man, marca branco. Disponible en: <http://www.amcmotores.com.br/area/produto.asp?intProId=539&des=MOTOBOMBA%20BIOG%C1S%20%20B4T%20817%20CH%20BIO.MAN%20MARCA%20BRANCO%A0Motores%20e%20Equipamentos%20para%20venda,%20loca%E7%E3o%20e%20manuten%E7%E3o>, consultado el 25/06/2015.
16. Europa, L. e. (28 de 02 de 2014). El biogás, la energía renovable con mayor potencial en España y en Europa. Disponible en: <http://twenergy.com/a/el->

- biogas-la-energia-renovable-con-mayor-potencial-en-espana-y-en-europa-1131, consultado el 20/04/2015.
17. Guardado, J. A. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas . Ciudad de La Habana, Cuba.
  18. Guardado. A. (1995). Urbina Pedro (venezolano). "Sistemas de ciclo cerrado, una alternativa para la agricultura sustentable". Conferencia latinoamericana de Agricultura Sustentable. Coro, Falcón, Venezuela, Pág. 21-28 Julio 1995.
  19. Hannover Biogas lamp, t. b. (s.f.). Global trade strats here. Hannover Biogas lamp for biogas plant to burn biogas to light. Disponible en: Alibaba.com, [http://www.alibaba.com/product-detail/Hannover-Biogas-lamp-for-biogas-plant\\_60346224520.html?spm=a2700.7724838.0.0.y9BUly](http://www.alibaba.com/product-detail/Hannover-Biogas-lamp-for-biogas-plant_60346224520.html?spm=a2700.7724838.0.0.y9BUly), consultado el 26/06/2015.
  20. Hermida, O. (2014). Huella energética de las producciones pecuarias. CITECNA.
  21. Herminia. J. et al. (2006). Tabloide universidad para todos. Protección ambiental y producciones más limpias.
  22. Interempresas. (2014). Disponible en: [http://www.alibaba.com/product-detail/CAPSTONE-MICROTURBINE\\_50020051400.html?spm=a2700.7724838.0.0.QM9h4E](http://www.alibaba.com/product-detail/CAPSTONE-MICROTURBINE_50020051400.html?spm=a2700.7724838.0.0.QM9h4E), consultado el 25/09/2015.
  23. López. and Romero. (2006). Producción de biogás con fines energéticos. De lo histórico a lo estratégico. Publicado en Revista Futuros No. 16, 2006 Vol. IV.
  24. Lugones. B. (2003). Análisis de biodigestores. Revista Energía y Tú, No 22 , Abril-Junio 2003; P 12-15.
  25. Marchain. U. (1992). Biogas Processes for Sustainable Development. Bull.FAO Agric. Services , Rome, Vol. 95, pág. 165-193.
  26. Menéndez Castellanos, M. (2012). Cuba se propone cambiar su matriz energética. Boletín clips de energía N° 11 Año 212. ISSN 2077-8473.
  27. Montalvo, S. a. (2003). Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás. . and, L. Guerrero.

28. Nzila, Dewulf et al. (2012). Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. *Applied Energy* 93(0): 496-506.
29. Olla de arroz de biogás, A. d. (s.f.). Global trade strats here. Vida útil larga biogás accesorios equipo de biogás, olla de arroz con el mejor precio. Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/long-lifespan-biogas-accessories-biogas-equipment-biogas-rice-cooker-with-best-price-60150113233.html?spm=a2700.7787047.0.0.Ad1oBs>, consultado el 26/06/2015.
30. ONE, I. s. (2013). ONE. Indicadores socioeconómicos de Cuba 2013. *Revista Panorama Económico y Social de Cuba*. Disponible en: <http://www.one.cu/publicaciones/08informacion/panorama2013/Panorama2013.pdf>, consultado el 2/02/2015.
31. Ordaz, K. C. (2014). Diagnóstico de la producción de biogás como contribución al desarrollo energético sostenible en la provincia de Sancti Spíritus. Sancti Spíritus. Cuba.
32. Oria, Y. (2010). Tesis Procedimiento para localizar plantas y conformar la red logística de la producción de biogás en la provincia Sancti Spíritus (2009-2010). Pasteurizadora, Sancti Spíritus.
33. Pareto, W. (1848). Diagrama de Pareto. Disponible en: [http://www.google.com/cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=0ahUKEwiXrPjB3-nKAhUksIMKHT3fBR0QFghAMAg&url=http%3A%2F%2Fwww.suagm.edu%2Fumet%2Fbiblioteca%2FReserva\\_Profesores%2Falicia\\_gonzalez\\_educ\\_525%2Fdiagrama\\_de\\_pareto.pdf&usg=AFQjCNFRFtcuPA3d](http://www.google.com/cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=0ahUKEwiXrPjB3-nKAhUksIMKHT3fBR0QFghAMAg&url=http%3A%2F%2Fwww.suagm.edu%2Fumet%2Fbiblioteca%2FReserva_Profesores%2Falicia_gonzalez_educ_525%2Fdiagrama_de_pareto.pdf&usg=AFQjCNFRFtcuPA3d), consultado el 6/07/2015.
34. Pastor Alcañiz, L. (2008). Estudio de la precipitación y recuperación del fósforo presente en las aguas residuales en forma de estruvita (Mg, NH<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>•6, H<sub>2</sub>O). Tesis para optar al título de Doctor por la Universidad Politécnica de Valencia: Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
35. Planthogar.net. (s.f.). ¿Qué es el biogas?. Disponible en: <http://www.planthogar.net/encyclopedia/jump.asp?doc=00000293.htm>, consultado 10/05/2015.

36. Quemador de cocina de biogás, e. u. (s.f.). Global trade strats here. El uso familiar doble quemador de cocina de biogás. Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/3-5l-family-use-double-burner-bio-cooker-60104484402.html?spm=a2700.7787047.0.0.0F>, consultado el 26/06/2015.
37. Renovable.cu, B. I. (2012). Boletín Informativo Renovable.cu. N° 4/Abril. Habana: Publicación Mensual CITMA-MINBAS. ISSN: 2219-6919.
38. Rocha. M. H. (2010). Use of the life cycle assessment (LCA) for comparison of the environmental performance of four alternatives for the treatment and disposal of bioethanol stillage. *International Sugar Journal* 112(1343): 611 - 622.
39. Sagastume-Gutiérrez A. (2016). Environmental assessment of pig production in Cienfuegos, Cuba: alternatives for manure management. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2518-2528.
40. Sasse. L. (1989). Evaluation of Ecological Benefits. *Biogas Forum* , (37): 3-9, 1989.
41. Savran. V. (2010). Evaluación del potencial tecnológico de la biomasa no cañera al balance energético nacional. Informe técnico de biomasa Agosto 2010.
42. Sosa, R. e. (2005). Gas production in tubular biodigesters/Producción de gas en biodigestores tubulares. *Revista Computadorizada de Producción Porcina*12(3).
43. Steinfeld. B. (2008). La larga sombra del Ganado, problemas ambientales y opciones. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. FAO.
44. Vargas. C. (2007). Energía y medio ambiente. Volumen 10 (3):74–78.
45. Venta caliente 3kw 5kw 10kw generador biogas precio planta de biogas. (2014). Generador eléctrico. Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/hot-sale-3kw-5kw-10kw-biogas-generator-price-for-biogas-plant-60109196305.html>, consultado el 25/09/2015.
46. Venta caliente 3kw 5kw 10kw, g. b. (s.f.). Global trade strats here. Venta caliente 3kw 5kw 10kw, generador biogas precio planta de biogas. Disponible en: [Alibaba.com,http://spanish.alibaba.com/product-gs/hot-sale-3kw-5kw-10kw-](http://spanish.alibaba.com/product-gs/hot-sale-3kw-5kw-10kw-)

- [biogas-generator-price-for-biogas-plant-60109196305.html](http://biogas-generator-price-for-biogas-plant-60109196305.html), consultado 25/06/2015.
47. Vera. A. G. (1996). Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales. En I. A. Guevara, Producción de gas y saneamiento de efluentes , (págs. 53-54).
48. VI Congreso del PCC. (2011). VI Congreso del partido comunista de Cuba; Lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución. Disponible en: <http://www.cubadebate.cu/noticias/2011/05/09/descargue-en-cubadebate-los-lineamientos-de-la-politica-economica-y-social-pdf/#.VrpuGZPjW1s> (pág: 22, 41, 35), consultado 10/12/2015.
49. Vida útil larga biogas accesorios equipo de biogas biogas olla de arroz. (2012). Olla arocera. Disponible en: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/long-lifespan-biogas-accessories-biogas-equipment-biogas-rice-cooker-with-best-price-60150113233.html?spm=a2700.7787047.0.0.Ad1oBs>, Disponible en: 15/09/2015.
50. Vivanco. M. (2005). Muestreo Estadístico. Diseño y Aplicaciones . Santiago de Chile: Editorial Universitaria.
51. Watson. Greg. (2004). The Legacy Of Ishikawa. Quality Progress. Disponible en: <http://www.aiteco.com/diagrama-de-causa-efecto-de-ishikawa/>, consultado el 25/07/2015.
52. Werner. (1989). Symposiun on Anaerobic Digestion ,Wales. Disponible en: [www.medioambiente.cu/download/2003/indicadores%20socioecon%F3micos.pdf](http://www.medioambiente.cu/download/2003/indicadores%20socioecon%F3micos.pdf), consultado el 2/05/2015.



*Anexos*

## Anexos

**Anexo 1.** Planta de Biogás, Comunidad Magueyal, San Luís, Santiago de Cuba.

Fuente: (Menéndez Castellanos, 2012).



Beneficia a 78 viviendas, 298 habitantes y con una capacidad de 100 m<sup>3</sup> de biogás por día; con una generación de energía eléctrica (GEE) instalado de 25 KVA, generando 16 horas/día. Combustible utilizado: 20 % de diesel y un 80 % de biogás.

**Planta de Biogás del MININT en Camagüey, Instalada desde 6 de junio de 1991.**



Producción: 475 m<sup>3</sup>/día (5 digestores en serie)

Suministra biogás para la cocción de 2500 Comensales y oxicorte de 7 talleres.

Ahorro en un año: 56.7 toneladas de gas licuado, o 100,000 litros de diesel.

Puede producir 730 toneladas de bio-fertilizantes.

**Anexo 2.** VI Congreso del partido comunista de Cuba; Lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución. Fuente: (VI Congreso del PCC, 2011).

Las Energías Renovables están reflejadas de forma directa o indirecta en 4 lineamientos, que se destacan a continuación.

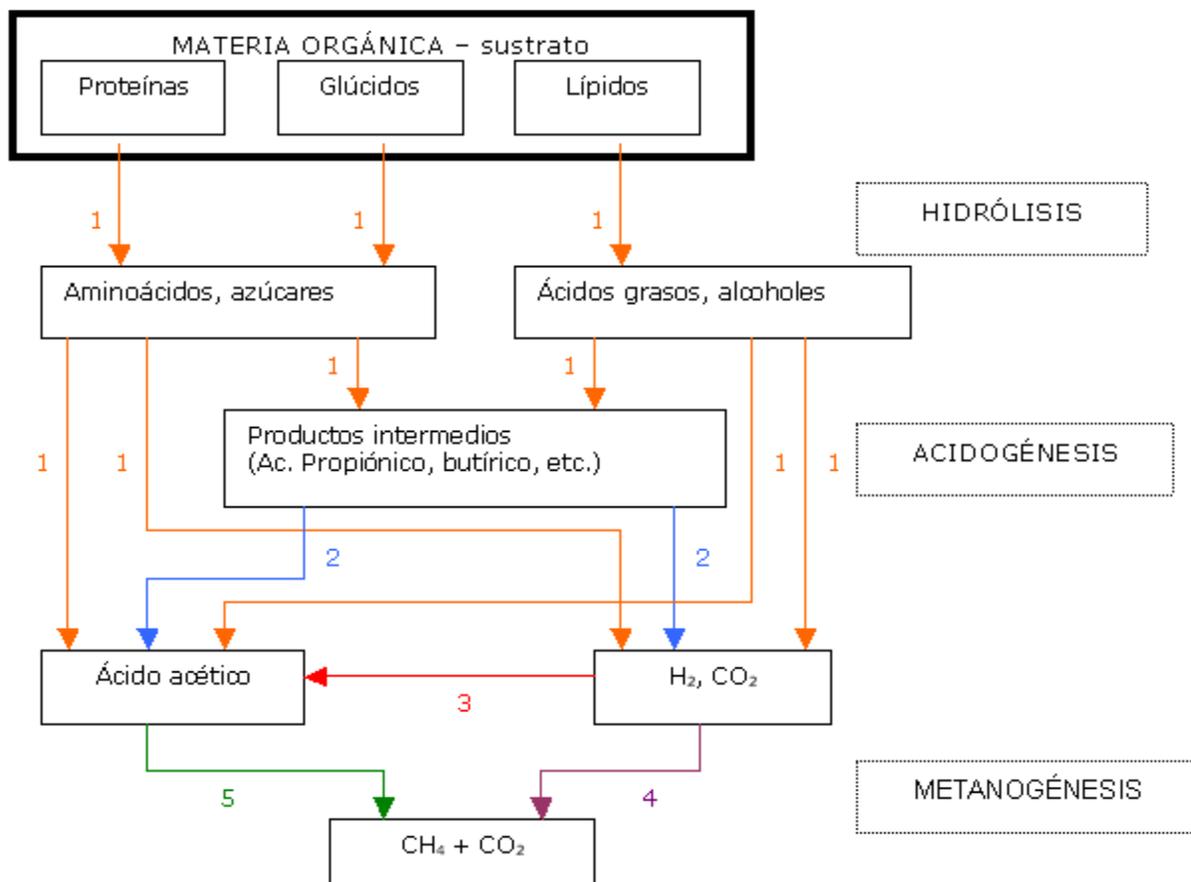
**113.** Priorizar, en las relaciones con las organizaciones de colaboración internacional, el apoyo material y tecnológico en el desarrollo de objetivos para el aprovechamiento de las diversas fuentes de energía renovable.

**131.** Sostener y desarrollar los resultados alcanzados en el campo de la biotecnología, la producción médico-farmacéutica, la industria del software y el proceso de informatización de la sociedad, las ciencias básicas, las ciencias naturales, los estudios y el empleo de las fuentes de energía renovables, las tecnologías sociales y educativas, la transferencia tecnológica industrial, la producción de equipos de tecnología avanzada, la nanotecnología y los servicios científicos y tecnológicos de alto valor agregado.

**247.** Potenciar el aprovechamiento de las distintas fuentes renovables de energía, fundamentalmente la utilización del biogás, la energía eólica, hidráulica, biomasa, solar y otras; priorizando aquellas que tengan el mayor efecto económico.

**267.** Priorizar el mantenimiento y renovación de la infraestructura turística y de apoyo. Aplicar políticas que garanticen la sostenibilidad de su desarrollo, implementando medidas para disminuir el índice de consumo de agua y de portadores energéticos e incrementar la utilización de fuentes de energía renovable y el reciclaje de los desechos que se generan en la prestación de los servicios turísticos.

Anexo 3. Esquema. Fases de la fermentación anaerobia y poblaciones bacterianas.  
Fuente:(Angelidaki, 1997).



#### Leyenda

1. Bacterias hidrolíticas-acidogénicas
2. Bacterias acetogénicas
3. Bacterias homoacetogénicas
4. Bacterias metanogénicas hidrogenófilas
5. Bacterias metanogénicas acetoclasticas

**Anexo 4:** Motobomba BRANCO con su paquete de filtros para H<sub>2</sub>S.



Motobomba marca BRANCO con un motor de 4 tiempos de 389 cm<sup>3</sup>refrigerado por aire con una rotación de 3,600 rpm, caudal máximo de 30,000 l/h una presión máxima de 56 mca accionada por un sistema manual o eléctrico y con un consumo de 20 m<sup>3</sup> de biogás por una hora de trabajo, (Equipamentos, AMC).

Anexo 5: Generador eléctrico a base de biogás marca PUXIN.



Con una relación de consumo de biogás de 0.55 a 0.65 m<sup>3</sup> / kWh, potencia nominal de 1200 W, potencia máxima de 1300 W, salida DC / AC 12V a 8.3 A, generador monofásico con motor de brocha, tiempo de trabajo continuo no más de 6 horas (Venta caliente 3kw 5kw 10kw).

Anexo 6: Cocina a base de biogás marca PUXIN.



Marca Shenzhen Puxin Science & Technology Co, Ltd., con una carga calorífica de 2.8 KW, una tasa de consumo de biogás de 0.45 m<sup>3</sup>/h para cada quemador, una eficiencia del 57% y una presión de entrada del biogás de 1600 Pa. (Quemador de cocina de biogás).

**Anexo 7:** Arrocera a base de biogás marca PUXIN.

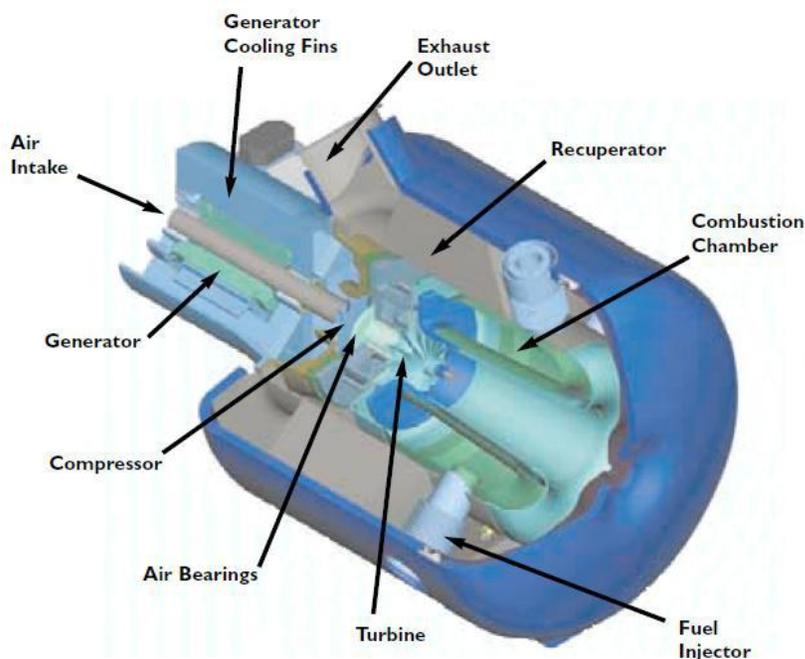


Marca Shenzhen Puxin Science & Technology Co., Ltd., con una carga calorífica de 1.0 KW, una tasa de consumo de biogás de 0.14 m<sup>3</sup>/h, fuerza de compresión de 1600 Pa y capacidad de cocción de 1.6 Kg de arroz, (Olla de arroz de biogás).

**Anexo 8:** Lámpara a base de biogás marca PUXIN.



La cual es equivalente a un foco incandescente de 60 a 100W y con un consumo de biogás de 0.07 m<sup>3</sup>/h, (Hannover Biogas lamp).

**Anexo 9: Micro turbina Capstone C30.****The Capstone C30 MicroTurbine Generator**

Microturbina marca Capstone modelo C30, un sistema ultra liviano que consiste en un compresor, un recuperador, cámara de combustión, la turbina y el generador, que provee arriba de 30 KW y 85 KW de calor para aplicaciones combinadas de generación de energía eléctrica y calor a 96,000 rpm, una eficiencia de 26%  $\pm 2$  (@ 15° C y al nivel del mar), con un consumo de 1.42 m<sup>3</sup>de biogás/kWh , frecuencia variable de 50 / 60 Hz, trifásico AC, el sistema no utiliza ningún tipo de lubricante ya sea aceite o refrigerante, (Capstone Microturbine Biogas).

## Anexo 10:Inventario del 2015

Municipio de Cabaiguán										
2012/2015			Inventario de las plantas de Biogás de Cabaiguán							
No	Municipio.	Consejo popular.	Instalación de procedencia.	Tipo	Fecha de Construcción.	Volumen	No. Personas Beneficiadas	Residuos utilizados	Organismo al que pertenece	Activada
1	CABAIGUAN	LA AURORA	PARTICULAR	Hindú	1993	2,5	5	Vacuno	PARTICULAR	SI
2	CABAIGUAN	SANTA LUCIA I	PARTICULAR	Chino	2002	3	8	Porcino	PARTICULAR	SI
3	CABAIGUAN	SANTA LUCIA II	PARTICULAR	Hindú	2002	3	5	Porcino	PARTICULAR	SI
4	CABAIGUAN	PUNTA DIAMANTE, ZRRO	ESTATAL	Chino	2004	12	15	Porcino	MINAGRI	SI
5	CABAIGUAN	GENETICO	ESTATAL	Chino	2005	42	60	Porcino	MINAGRI	SI
6	CABAIGUAN	4 ESQ. SANTA LUCIA, REY	PARTICULAR	Chino	2006	14	7	Porcino	PARTICULAR	SI
7	CABAIGUAN	4 ESQ. SANTA LUCIA ,PACO	PARTICULAR	Chino	2007	14	10	Porcino	PARTICULAR	SI
8	CABAIGUAN	AUTOPISTA,PELNCHO	PARTICULAR	Chino	2007	42	15	Porcino	PARTICULAR	SI
9	CABAIGUAN	PORCINO GUAYOS	ESTATAL	MININT	2009	266	630	Porcino, Matadero, Ovino	MININT	SI
10	CABAIGUAN	CUNICULA GUAYOS	ESTATAL	MININT	2009	25	50	Porcino	MININT	SI
11	CABAIGUAN	CERCA REFINERIA ,PIPO	PARTICULAR	Chino	2008	23	20	Porcino	PARTICULAR	SI
12	CABAIGUAN	AUTOPISTA KM 334	PARTICULAR	Chino	2009	12	7	Porcino	PARTICULAR	SI
13	CABAIGUAN	ENTRONQUE CARRETERA NEIVA	PARTICULAR	Chino	2010	6	5	Porcino, Vacuno, Gallinaza	PARTICULAR	SI
14	CABAIGUAN	CARRETERA SANTA LUCIA,NOEL	PARTICULAR	Chino	2010	12	10	Porcino, Vacuno, Gallinaza	PARTICULAR	SI
15	CABAIGUAN	EL COLORADO	ESTATAL	Chino	2010	42	50	Porcino		SI

Municipio de Cabiguán										
2012/2015			Inventario de las plantas de Biogás de Cabaiguán							
No	Municipio.	Consejo popular.	Instalación de procedencia.	Tipo	Fecha de Construcción.	Volumen	No. Personas Beneficiadas	Residuos utilizados	Organismo al que pertenece	Activada
16	CABAIGUAN	FINCA SAN MANUEL	PARTICULAR	Chino	2010	16	7	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
17	CABAIGUAN	CPA 13 DE MARZO	ESTATAL	Chino	2010	18	5	Porcino		SI
18	CABAIGUAN	LA AURORA DIOSBEL	PARTICULAR	Chino	2011	42	7	Porcino	PARTICULAR	SI
19	CABAIGUAN	JIQUIMA	PARTICULAR	Chino	2011	18	15	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	NO
20	CABAIGUAN	GUIDO	PARTICULAR	Chino	2011	6	5	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
21	CABAIGUAN	AUTOC GENETICA	ESTATAL	Chino	2011	7	7	Porcino	GRUPOR	SI
22	CABAIGUAN	PATIO AGROEC	PARTICULAR	Chino	2011	6	7	Porcino	PARTICULAR	SI
23	CABAIGUAN	PAT BUGAMBILIA	PARTICULAR	Chino	2011	3	4	Porcino	PARTICULAR	SI
24	CABAIGUAN	PATIO GUAYO	PARTICULAR	Chino	2011	9	8	Porcino	PARTICULAR	SI
25	CABAIGUAN	MAGALIS	PARTICULAR	PISTON	2011	15	10	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
26	CABAIGUAN	ROGELIO	PARTICULAR	Chino	2011	8	4	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
27	CABAIGUAN	PALOMO	PARTICULAR	Chino	2011	16	12	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
28	CABAIGUAN	CPA LA NUEVA CUBA	ESTATAL	Chino	2011	30	60	Vacuno	CPA	NO
29	CABAIGUAN	CPA 1 DE ENERO	ESTATAL	Chino	2012	18	30	Porcino, Vacuno	CPA	SI
30	CABAIGUAN	REYNALDO	PARTICULAR	Chino	2012	45	20	Porcino	PARTICULAR	SI
31	CABAIGUAN	LA CAMPANA, ALEX	PARTICULAR	Chino	2012	16	10	Porcino	PARTICULAR	SI
32	CABAIGUAN	POZA	PARTICULAR	Chino	2012	11	20	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
33	CABAIGUAN	MATIENZO	PARTICULAR	Chino	2012	45	20	Porcino	PARTICULAR	SI

Municipio de Cabiguán										
2012/2015			Inventario de las plantas de Biogás de Cabaiguán							
No	Municipio.	Consejo popular.	Instalación de procedencia.	Tipo	Fecha de Construcción.	Volumen	No. Personas Beneficiadas	Residuos utilizados	Organismo al que pertenece	Activada
34	CABAIGUAN	MAYKEL	PARTICULAR	Chino	2012	50	10	Porcino	PARTICULAR	SI
35	CABAIGUAN	FARDELES	PARTICULAR	Chino	2012	22	8	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
36	CABAIGUAN	WILFRIDO	PARTICULAR	Chino	2012	12	15	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
37	CABAIGUAN	Yoel	PARTICULAR	Chino	2012	12	22	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
38	CABAIGUAN	Pesa Porcina	PARTICULAR	Chino	2012	5	15	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
39	CABAIGUAN	2do nivel	PARTICULAR	Chino	2012	7	10	Porcino, Vacuno	PARTICULAR	SI
40	CABAIGUAN	Eliaser Perez	PARTICULAR	Chino	2013	14	28	Porcino	PARTICULAR	en repar
41	CABAIGUAN	Omar Rosquete	PARTICULAR	Chino	2013	12	24	Porcino	PARTICULAR	SI
42	CABAIGUAN	Mercedes Cruz	PARTICULAR	Chino	2013	10	22	Porcino	PARTICULAR	SI
43	CABAIGUAN	Eduardo Jimenes	PARTICULAR	Chino	2013	18	36	Porcino	PARTICULAR	SI
44	CABAIGUAN	Esnildo Matienzo	PARTICULAR	Chino	2013	10	22	Porcino	PARTICULAR	SI
45	CABAIGUAN	Magalis Lopez Manzo	PARTICULAR	Chino	2013	18	36	Porcino	PARTICULAR	SI
46	CABAIGUAN	Jorge Caballero	PARTICULAR	Chino	2013	10	21	Porcino	PARTICULAR	SI
47	CABAIGUAN	Vidal	PARTICULAR	Chino	2013	4	9	Porcino	PARTICULAR	SI
48	CABAIGUAN	El Colorado	ESTATAL	Chino	2014	50	100	Porcino	ESTATAL	SI
49	CABAIGUAN	Yuniesky Rguez	PARTICULAR	Chino	2014	16	32	Porcino	PARTICULAR	SI
50	CABAIGUAN	Yausmel , Macuca	PARTICULAR	Chino	2014	21	42	Porcino	PARTICULAR	SI
51	CABAIGUAN	CPA 13 Marzo	PARTICULAR	Chino	2014	50	100	Porcino	PARTICULAR	SI
52	CABAIGUAN	Julio Cesar	PARTICULAR	Chino	2014	11	23	Porcino	PARTICULAR	SI

Municipio de Cabaiguán										
2012/2015			Inventario de las plantas de Biogás de Cabaiguán							
No	Municipio.	Consejo popular.	Instalación de procedencia.	Tipo	Fecha de Construcción.	Volumen	No. Personas Beneficiadas	Residuos utilizados	Organismo al que pertenece	Activada
53	CABAIGUAN	Alexander Morales Abreu	PARTICULAR	Chino	2014	11	22	Porcino	PARTICULAR	SI
54	CABAIGUAN	Frank Gabrera	PARTICULAR	Chino	2014	10	20	Porcino	PARTICULAR	SI
55	CABAIGUAN	Adalberto de la Cruz	PARTICULAR	Chino	2015	100	20	Porcino	PARTICULAR	SI
56	CABAIGUAN	Carlos Vicente	PARTICULAR	Chino	2015	14	29	Porcino	PARTICULAR	SI
57	CABAIGUAN	Julio Felipe Concepción Carretera Sta Lucia	PARTICULAR	Chino	2015	12	26	Porcino	PARTICULAR	SI
58	CABAIGUAN	Alian Taño Belasierto	PARTICULAR	Chino	2015	12	27	Porcino	PARTICULAR	SI
59	CABAIGUAN	Misael Leal Toste	PARTICULAR	Chino	2015	12	25	Porcino	PARTICULAR	SI
60	CABAIGUAN	Yoel Manuel Izquierdo	PARTICULAR	Chino	2015	12	25	Porcino	PARTICULAR	SI
61	CABAIGUAN	Carlett Garcia	PARTICULAR	Chino	2015	12	25	Porcino	PARTICULAR	SI
62	CABAIGUAN	1 vivienda	PARTICULAR	Chino	2015	10	20	Porcino	PARTICULAR	SI
63	CABAIGUAN	Yoandy Rguez Porra	PARTICULAR	Chino	2015	12	27	Porcino	PARTICULAR	SI
64	CABAIGUAN	Rafael Carral	PARTICULAR	Chino	2015	10	20	Porcino	PARTICULAR	SI
65	CABAIGUAN	Yunier Paz	PARTICULAR	Chino	2015	12	26	Porcino	PARTICULAR	SI
66	CABAIGUAN	Nestor Perez	PARTICULAR	Chino	2015	16	34	Porcino	PARTICULAR	SI
67	CABAIGUAN	Tairo A. Rodriguez	PARTICULAR	Chino	2015	18	37	Porcino	PARTICULAR	SI
68	CABAIGUAN	Julio Rodriguez Marin	PARTICULAR	Chino	2015	15	32	Porcino	PARTICULAR	SI
69	CABAIGUAN	Isidro Santos	PARTICULAR	Chino	2015	14	30	Porcino	PARTICULAR	SI
70	CABAIGUAN	José R. Martinez	PARTICULAR	Chino	2015	16	33	Porcino	PARTICULAR	SI

**Anexo 11:** Resultados del cálculo del Muestreo.

$$n = \frac{NZ^2 \times pq}{d^2(N - 1) + Z^2 \times pq}$$

N	Z	Z <sup>2</sup>	p	1-p	d	d <sup>2</sup>	numerador	denominador	n
70	1,96	3,8416	0,8	0,2	0,15	0,0225	43,03	2,17	19,85

Los estratos son los tipos de tecnologías.

**Muestreo estratificado Muestreo aleatorio simple**

Estratos	Población (N <sub>i</sub> )	muestra (N <sub>i</sub> *f <sub>h</sub> )
Chino	65	18,7027
Hindú	2	0,5755
Pistón		
MININT	2	0,5755
Polietileno	0	0,0000
	<b>69</b>	<b>19,85</b>

$$f_h = n/N = 19,85/70 = 0,2877$$

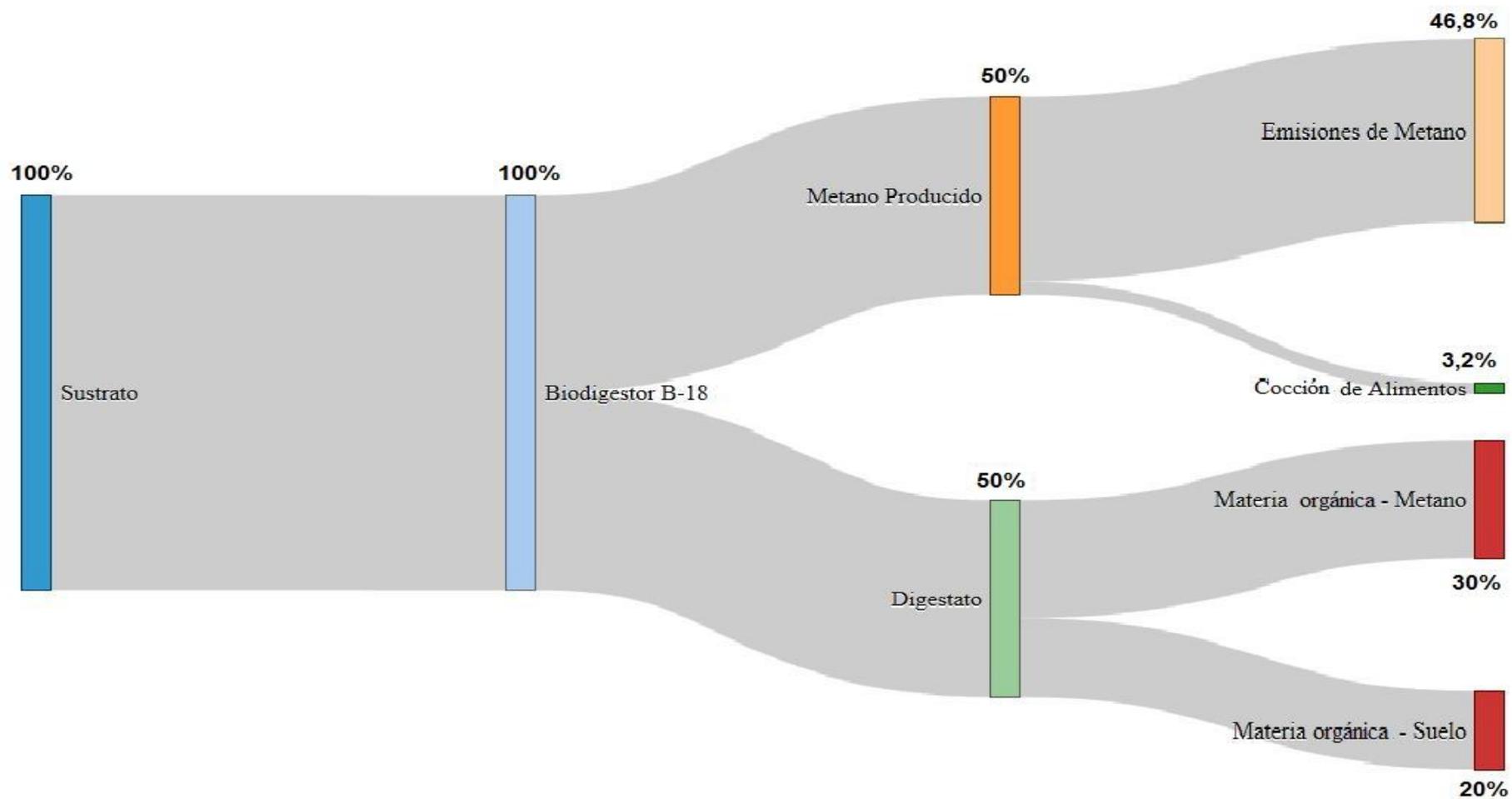
f<sub>h</sub>: Fracción de estratificación

Chino	11
	55
	2
	57
	66
	31
	64
	24
	28
	34
	18
	22
	63
	70
	48
	40
	61
5	
Hindú	3
PISTON	
MININT	10

Anexo 12: Resultados de los cálculos realizados, en las muestras seleccionadas.

Nombre de los biodigestores	DQO a	DQO r	DQO ef	DQO_CH4	kmol CH4	m3 CH4	m3 Biogas	Pv	No pers.	Sobrante m3		Sobrante de CH4 kg DQO
										Biogás	Metano	
B-11	40,5	20,25	20,25	20,25	0,3164	7,0875	11,8125	0,5	59,1	7,8	4,7	13,4
B-55	180	90	90	90	1,406	31,5	52,5	0,5	262,5	12,5	7,5	21,4
B-2	5,4	2,7	2,7	2,7	0,042	0,945	1,575	0,5	7,9	0,0	0,0	0,0
B-57	21,6	10,8	10,8	10,8	0,169	3,78	6,3	0,5	31,5	1,1	0,7	1,9
B-66	28,8	14,4	14,4	14,4	0,225	5,04	8,4	0,5	42,0	1,6	1,0	2,7
B-31	28,8	14,4	14,4	14,4	0,225	5,04	8,4	0,5	42,0	6,4	3,8	11,0
B-64	18	9	9	9	0,141	3,15	5,25	0,5	26,3	1,3	0,8	2,1
B-24	16,2	8,1	8,1	8,1	0,127	2,835	4,725	0,5	23,6	3,1	1,9	5,4
B-28	54	27	27	27	0,422	9,45	15,75	0,5	78,8	3,8	2,3	6,4
B-34	90	45	45	45	0,703	15,75	26,25	0,5	131,3	24,3	14,6	41,6
B-18	75,6	37,8	37,8	37,8	0,591	13,23	22,05	0,5	110,3	20,7	12,4	35,4
B-22	10,8	5,4	5,4	5,4	0,084	1,89	3,15	0,5	15,8	1,8	1,1	3,0
B-63	21,6	10,8	10,8	10,8	0,169	3,78	6,3	0,5	31,5	0,9	0,5	1,5
B-70	28,8	14,4	14,4	14,4	0,225	5,04	8,4	0,5	42,0	1,8	1,1	3,1
B-48	90	45	45	45	0,703	15,75	26,25	0,5	131,3	6,2	3,8	10,7
B-40	25,2	12,6	12,6	12,6	0,197	4,41	7,35	0,5	36,8	1,8	1,1	3,0
B-61	21,6	10,8	10,8	10,8	0,169	3,78	6,3	0,5	31,5	1,3	0,8	2,2
B-5	75,6	37,8	37,8	37,8	0,591	13,23	22,05	0,5	110,3	10,1	6,0	17,2
B-3	4,62	3,00	1,62	3	0,047	1,05	1,75	0,6	8,8	0,8	0,5	1,3
B-10	65,4	42,5	22,9	42,5	0,664	14,875	24,8	1,0	124,0	14,8	8,9	25,4

Anexo 13: Resultados del diagrama de Sankey del Biodigestor 18 (B-18).



Anexo 14: Resultados del diagrama de Sankey del Biodigestor 5 (B-5).

