



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudio de Postgrado

**POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS
ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DE LA TERMINAL ZONA 4**

Ing. Carlos Estuardo Alvarado Turcios

Asesorado por el Dr. M.Sc. Ing. Ariel Eliseo Turcios Pantaleón

Guatemala, noviembre de 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS
ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DE LA TERMINAL ZONA 4**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. CARLOS ESTUARDO ALVARADO TURCIOS

ASESORADO POR EL DR. MSC. ING. ARIEL ELISEO TURCIOS PANTALEÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2017

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Ángel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Jurger Andoni Ramírez Ramírez
VOCAL V	Br. Oscar Humberto Galicia Núñez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DE LA TERMINAL ZONA 4

Tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 19 de noviembre de 2016.



Ing. Carlos Estuardo Alvarado Turcios

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su iluminación y fuente de conocimiento y sabiduría.
- Mis padres** Carlos Alvarado Reyes y Rosibel Turcios Pantaleón, especialmente a mi madre, por su apoyo, comprensión y amor.
- Mis hermanos** Ayleen Edith y Hirold Alvarado, deseándoles que mi logro sirva de inspiración para alcanzar sus metas.
- Mi hijo** Arick Alvarado, por ser mi nuevo ángel.
- Mis abuelos** Wenseslado Alvarado, Francisca Reyes, Eliseo Turcios y Lucila Pantaleón, por sus consejos.
- Mis tíos** Por su apoyo e influencia en mi vida. En especial a mi tío Ariel Turcios, por ser un ejemplo a seguir.

AGRADECIMIENTOS A:

**La Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Mi alma mater y universidad del pueblo, por permitirme seguir enriqueciéndome en conocimiento.

**Escuela de Postgrados
de Ingeniería**

Por ser la facilitadora de la adquisición del conocimiento técnico y científico, que me permitió obtener el grado académico en postgrado.

**Catedráticos de la
Escuela de Postgrados
de Ingeniería**

Por transmitirnos su conocimiento y experiencias y brindarme su amistad.

**Mis amigos y
compañeros de cohorte.**

Por su amistad, compañerismo y compartir su experiencia en sus áreas, y por todos sus aportes e ideas.

**Dr. M.Sc. Ing. Ariel
Turcios**

Por ser una importante influencia en mi vida, por su asesoramiento y ser una fuente ilimitada de conocimientos.

MA. Ing. José Rosal

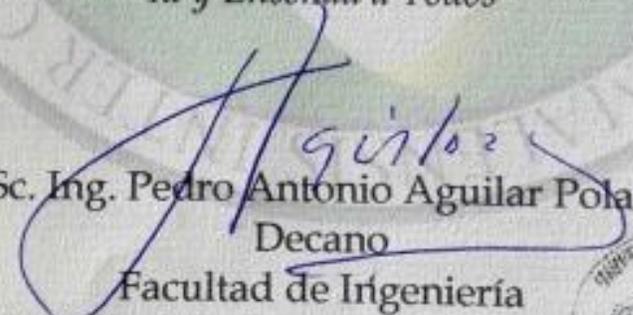
Por su apoyo incondicional y motivación para lograr esta meta.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Postgrado, al Trabajo de Graduación de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente titulado: **"POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DE LA TERMINAL ZONA 4"** presentado por el Ingeniero Civil Carlos Estuardo Alvarado Turcios, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

"Id y Enseñad a Todos"


MSc. Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2017.

Cc: archivo/la



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2017-028

El Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y dar el visto bueno del revisor y la aprobación del área de Lingüística del Trabajo de Graduación titulado **"POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DE LA TERMINAL ZONA 4"** presentado por el Ingeniero Civil Carlos Estuardo Alvarado Turcios, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Energía y Ambiente; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala, noviembre de 2017.

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.



FACULTAD DE
INGENIERÍA - USAC
ESCUELA DE
ESTUDIOS DE POSTGRADO

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / 24188000 Ext. 86226

APT-2017-028

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Energía y Ambiente del Trabajo de Graduación titulado **"POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DE LA TERMINAL ZONA 4"** presentado por el Ingeniero Civil Carlos Estuardo Alvarado Turcios, apruebo y recomiendo la autorización del mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

MSc. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2017.

Cc: archivo/la

Doctorado: Sostenibilidad y Cambio Climático. **Programas de Maestrías:** Ingeniería Vial, Gestión Industrial, Estructuras, Energía y Ambiente Ingeniería Geotécnica, Ingeniería para el Desarrollo Municipal, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ingeniería de Mantenimiento. **Especializaciones:** Gestión del Talento Humano, Mercados Eléctricos, Investigación Científica, Educación virtual para el nivel superior, Administración y Mantenimiento Hospitalario, Neuropsicología y Neurociencia aplicada a la Industria, Enseñanza de la Matemática en el nivel superior, Estadística, Seguros y ciencias actuariales, Sistemas de información Geográfica, Sistemas de gestión de calidad, Explotación Minera, Catastro.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Biogás.....	1
1.2. Formación y utilización del biogás.....	4
1.3. Propiedades del biogás	5
1.4. Biometanización de la fracción orgánica de los residuos sólidos	6
1.5. Factores ambientales con influencia en la digestión anaerobia	9
1.6. Utilización del biogás para producción de energía eléctrica	11
1.7. Ambiente.....	12
1.8. Biodigestor	13
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	17
2.1. Análisis de la situación actual del Mercado la Terminal zona 4.....	17
2.2. Tipo de estudio.....	18
2.3. Variables.....	19
2.4. Muestreo.....	20

2.5. Técnicas.....	23
2.6. Proceso del experimento	26
2.7. Identificación de impactos ambientales.....	31
3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	37
3.1. Residuos sólidos generados por el mercado la Terminal zona 4	37
3.2. Caracterización física y química	38
3.3. Carga orgánica volumétrica.....	40
3.4. Productividad de biogás	40
3.5. Cromatografía.....	41
3.6. Potencial de producción de biogás de los residuos sólidos	42
3.7. Identificación de impactos ambientales.....	43
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
CONCLUSIONES.....	49
RECOMENDACIONES	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Centro de acopio, Terminal zona 4.....	17
2. Punto de reciclaje, Terminal zona 4	18
3. Contenedor de muestra.....	21
4. Carga volumétrica, biodigestor.....	24
5. Esquema del biodigestor	28
6. Biodigestor	28
7. Área experimental	29
8. Producción de biogás	30
9. Residuos sólidos generados.....	37
10. Caracterización física de desechos sólidos.....	39

TABLAS

I	Compuestos típicos del biogás	6
II.	Caracterización química.....	23
III.	Tabla matriz de identificación y sus componentes ambientales.....	33
IV.	Criterio de valoración de impactos.....	35
V.	Estadística de recolección de desechos sólidos.....	37
VI.	Caracterización de desechos sólidos	38
VII.	Caracterización química de desechos sólidos	39
VIII.	Carga orgánica volumétrica	40
IX.	Productividad de biogás.....	40
X.	Productividad del metano	41
XI.	Cromatografía de gases	41
XII.	Análisis cromatográfico de gases	41
XIII.	Potencial de producción de biogás	42
XIV.	Potencial de producción de biogás.....	42
XV.	Matriz de evaluación de impactos significativos	43

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H₂S	Ácido sulfhídrico
CH₃COOH	Ácido acético
Ca	Calcio
cm	Centímetro
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grado Celsius
H₂	Hidrógeno
Kg	Kilogramo
l	Litro
Mg	Magnesio
CH₄	Metano
m	Metro
mm	Milímetro
N₂	Nitrógeno
O₂	Oxígeno
PCI	Poder calorífico interior
%	Porcentaje
K	Potasio

GLOSARIO

Biodegradable	Material que puede descomponerse en elementos químicos naturales, por la acción de agentes biológicos, como el sol, el agua, las bacterias, las plantas o los animales.
Biogás	Es un gas que se genera en medios naturales, por reacciones de biodegradación y está compuesto cerca de 60 % de metano (CH ₄) y 40 % de bióxido de carbono (CO ₂), asimismo, contiene pequeñas cantidades de otros gases, entre ellos 1% de ácido sulfhídrico (H ₂ S), hidrógeno (H ₂), nitrógeno (N ₂) y oxígeno (O ₂).
Caracterización	Es la acción de separación de una muestra en sus distintos elementos o componentes para el estudio individual de los mismos.
Cromatografía	Es un método físico de separación para la caracterización de mezclas complejas, la cual tiene aplicación en todas las ramas de la ciencia; es un conjunto de técnicas basadas en el principio de retención selectiva, cuyo objetivo es separar los distintos componentes de una mezcla, permitiendo identificar y determinar las cantidades de dichos componentes.

Fermentación	Es un proceso natural que ocurre en forma
Anaeróbica	Espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico.
pH	Coficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.
Potencial	Que no es, no se manifiesta o no existe, pero tiene la posibilidad de ser, de manifestarse o de existir en un futuro.
Residuos sólidos	Son desperdicios o sobrantes de las actividades humanas. Se clasifica por su origen, en orgánicos e inorgánicos.
Sólidos totales	Se denominan específicamente el total de residuos sólidos como minerales y residuos orgánicos que existen en una muestra en ausencia total de agua.
Sólidos volátiles	La porción de la materia orgánica que puede eliminarse o volatilizarse cuando una materia orgánica se quema en un horno mufla a una temperatura de 550°C.

RESUMEN

En Guatemala, principalmente en los mercados municipales, el comercio está generando una acumulación de desechos sin ningún tipo de manejo y clasificación provocando graves problemas ambientales principalmente los malos olores y la contaminación visual que ocasionan el deterioro y contaminación de los espacios públicos comerciales, este es el caso del Mercado la Terminal, zona cuatro, por lo que se estudió el potencial energético con el que cuenta la producción de sus desechos.

El proceso de digestión anaerobia consiste en transformar la materia orgánica biodegradable en biogás, por medio de un proceso de degradación, este proceso se lleva a cabo por medio de biodigestores, los cuales fueron diseñados para la producción de biogás.

La producción de biogás es la manera más eficiente de aprovechar los desechos sólidos orgánicos biodegradables, los desechos son transformados por medio de fermentación anaerobia en biogás y el restante de este proceso son sólidos llamados ceniza o lodos, los cuales pueden ser utilizados como abono orgánico. Este proceso es ideal para reducir la contaminación visual en los mercados, y evitar las grandes cantidades que son transportadas y acumuladas en el vertedero controlado de la zona 3, asimismo aprovecha el potencial energético con el que cuentan estos desechos sólidos orgánicos.

La determinación del potencial energético en producción de biogás con el que cuenta actualmente los residuos orgánicos biodegradables del mercado de la Terminal zona 4 de la ciudad capital, es un dato no registrado ni demostrado

por lo cual es importante conocerlo para determinar la factibilidad del proyecto para su aprovechamiento, por lo que se demostró el potencial real con el que cuenta dicho mercado con un sistema de biodigestores básico de carga discontinua.

Al proyectar la cantidad de biogás promedio producido con la cantidad promedio de desechos sólidos generados mensualmente por la Terminal zona 4, se obtuvo el potencial energético con el que cuenta dicho mercado de comercio. Los resultados fueron obtenidos por medio de la metodología estandarizada que incluye la determinación del potencial total o teórico, potencial accesible, potencial disponible y potencial energético.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Guatemala, principalmente en el mercado la Terminal, zona cuatro, el comercio está generando una acumulación de desechos sin ningún tipo de manejo y clasificación provoca graves problemas ambientales principalmente los malos olores y la contaminación visual que ocasionan el deterioro y contaminación de los espacios públicos comerciales.

El ente encargado de evitar la acumulación de desechos en la Terminal, zona cuatro es la municipalidad de Guatemala, la cual no está cumpliendo eficientemente con los requerimientos necesarios que demanda una zona comercial. Es evidente que no existe planificación ni controles de limpieza en la zona, esto se debe a la política ambiental del país que no contempla el uso y beneficios de los desechos.

Uno de los principales efectos que genera la acumulación de desechos orgánicos es la propagación de enfermedades, debido a que esta zona es una fuente de abastecimiento de alimentos para las personas de escasos recursos, lo cual no cumple con los estándares mínimos de calidad para el consumo humano.

La contaminación ambiental en zonas comerciales es provocada por la poca iniciativa de buscar alternativas y el desconocimiento del potencial energético que existe en los desechos orgánicos, esto se debe a que no se cuentan con estudios que demuestren el potencial que se está desperdiciando al no reutilizar los desechos en temas de producción de biogás, por ello en la presente investigación se plantea como pregunta principal ¿Cuánto biogás se

podrá obtener con todos los desechos recolectados en el mercado la Terminal zona 4?, esto lleva a una serie de preguntas y planteamientos auxiliares.

FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

1. ¿Cuál será la caracterización de los desechos que se producen semanalmente en el mercado la Terminal zona 4?
2. ¿Cuánto biogás se podría producir con los desechos orgánicos utilizando biodigestores?
3. ¿Qué impacto ambiental ocasionaría la producción de biogás generado por los desechos del mercado la Terminal zona 4?

OBJETIVOS

General

Determinar el potencial de producción de biogás de los desechos orgánicos en el mercado la Terminal, zona 4.

Específicos

1. Determinar la caracterización de los desechos producidos mensualmente en el mercado la Terminal, zona 4.
2. Analizar la cantidad de biogás que se puede producir por medio de biodigestores en el mercado la Terminal, zona 4.
3. Identificar el impacto ambiental que se ocasionaría por la reducción de residuos sólidos utilizando el método de producción de biogás.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

El estudio realizado es de tipo cuantitativo descriptivo, donde se determinó la relación del uso de desechos sólidos biodegradables tratado mediante el uso de biodigestores anaerobios para la obtención de biogás.

El mercado la Terminal está ubicado en la zona 4 de la ciudad capital de Guatemala, actualmente los desechos sólidos son acumulados en puntos inadecuados para su almacenamiento para su posterior recolección. Se realizó un recorrido por el mercado la Terminal, para delimitar el área de estudio; posteriormente, se visitó la alcaldía auxiliar para obtener información de los desechos sólidos generados por las actividades de los comerciantes y obtener un permiso verbal, para obtener muestras para el presente estudio, obtiene el permiso e información de los puntos de acopio y la frecuencia con que son recolectados por el tren de aseo.

Al contar con el permiso verbal, por parte de la alcaldía auxiliar para la toma de muestras de desechos sólidos, se recolectaron muestras diariamente por cinco días continuos bajo condiciones controladas, la recolección de las muestras se hizo por medio una caja de madera de un pie cúbico de volumen recubierta internamente con plástico de color blanco, para mantener las muestras sin alteración ni fugas de lixiviados.

Las muestras fueron transportadas posteriormente al laboratorio, para realizar una caracterización, cuantificación, análisis físicos y químicos de los desechos sólidos, se obtuvo porcentajes de desechos sólidos orgánicos e inorgánicos, así como información para la validación del método, el cual incluye nutrientes, porcentajes de nitrógeno, fósforo, potasio, demanda de oxígeno, pH.

Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al área de experimentación, en la cual fueron cargados los biodigestores (la fabricación de los biodigestores experimentales se encuentra adjunta en los anexos), la carga orgánica volumétrica ingresada al biodigestor fue mezclada con agua, para obtener biogás, mediante la digestión anaerobia. Por cada día de toma de muestras fueron cargados dos biodigestores con la misma muestra, las mismas proporciones y condiciones, cada uno de los biodigestores tiene una función diferente, el primer biodigestor fue el encargado de medir el volumen de biogás obtenido, mientras tanto, el segundo biodigestor fue utilizado para la captura del biogás, para posteriormente llevarlo al laboratorio.

El biogás fue capturado en bolsas de suero y posteriormente llevado al laboratorio, donde se le realizó a la muestra una cromatografía de gases; también se determinó el porcentaje de metano, dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno. El valor energético del biogás se midió por el poder calorífico inferior.

Al finalizar con la parte experimental, las variables analizadas fueron la carga orgánica volumétrica, productividad de metano, máxima generación de metano. A partir de los datos obtenidos, se tabularon los resultados y se clasificaron en las diferentes tablas como presentación de resultados. Con los datos ya clasificados se realizaron comparaciones estadísticas para determinar un promedio de producción de biogás en relación a la cantidad de desechos sólidos biodegradables cargados al biodigestor; posteriormente, se diagramaron los datos de las tablas para obtener una descripción gráfica de los resultados. El proceso se realizó por medio de software Microsoft Excel.

Los resultados fueron obtenidos por medio de la metodología estandarizada que incluye la determinación del potencial total o teórico, potencial accesible, potencial disponible y potencial energético.

Al proyectar la cantidad de biogás promedio producido con la cantidad total de desechos sólidos generados semanalmente por el mercado la Terminal, zona 4, obtuvo el potencial energético con el que cuenta dicho mercado de comercio.

INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos generan impactos ambientales negativos a nivel mundial por la disposición inadecuada y por la falta de estudios para su aprovechamiento, así como el potencial energético con el que cuentan; asunto asociado al deterioro de espacios públicos, como la propagación de enfermedades.

La determinación del potencial energético en producción de biogás con el que cuenta actualmente el mercado la Terminal, zona 4 de la ciudad capital, es un dato no registrado ni demostrado por lo cual es importante conocerlo, para determinar si es factible o no un proyecto para su aprovechamiento.

La necesidad de contribuir con una alternativa para el tratamiento adecuado de los mismos, lleva a la búsqueda de opciones para el aprovechamiento que estos puedan tener.

El presente trabajo se fundamenta ante la falta de un programa integral a nivel municipal, para el manejo y aprovechamiento de los desechos sólidos generados para determinar el potencial de producción de biogás de los desechos orgánicos en el mercado la Terminal, zona 4.

La metodología del trabajo de campo se efectuará por medio del muestreo de residuos sólidos, para realizar exámenes físicos y químicos, la cuantificación se hará por cada sector determinando los kilogramos de desechos generados y analizando los nutrientes generados, para lo cual se tomará el porcentaje de residuo sólido y el porcentaje de composta. Se determinará por medio del

análisis de datos y fórmulas la carga volumétrica, con este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. La productividad de metano, el cual es un parámetro que mide la cantidad de metano producido en la unidad de tiempo respecto de la materia dispuesta en el reactor. Las muestras de biogás obtenidas del proceso de digestión, se analizarán mediante cromatografía de gases para determinar el porcentaje de metano, dióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno.

En el capítulo uno, se presentará las bases teóricas del biogás, su formación y utilización, sus propiedades, las fases de fermentación anaeróbica, factores ambientales y los biodigestores. En el capítulo dos, se determinará los métodos y técnicas, el tipo de estudio, las variables, el muestreo; se efectuará la parte experimental para determinar la carga orgánica volumétrica y productividad de metano.

En el capítulo tres, se hará un análisis comparativo de los datos obtenidos del Biodigestor y con ellos se calcularán la cantidad de metano presente en las muestras y la estimación del potencial de producción de biogás de los residuos orgánicos biodegradables; se discutirá acerca de esta tecnología y sus aplicaciones. Finalmente, se presentarán las conclusiones obtenidas del estudio y recomendaciones pertinentes para la continuidad del mismo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Biogás

Es un gas que se genera en medios naturales por reacciones de biodegradación y está compuesto cerca de 60 % de metano (CH_4) y 40 % de bióxido de carbono (CO_2), asimismo, contiene pequeñas cantidades de otros gases, entre ellos 1% de ácido sulfhídrico (H_2S), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2). Es un poco más liviano que el aire, posee una temperatura de inflamación de 700 grados centígrados y su llama alcanza una temperatura de 870 grados Celsius.

El metano es el gas que le confiere las características combustibles al mismo, ya que con un contenido de metano menor de 50 %, el biogás deja de ser inflamable. El poder calórico promedio de un metro cúbico de biogás es de cinco mil kilocalorías, lo que permite generar entre 1,3 - 1,6 kWh, lo cual equivale a medio litro de petróleo, aproximadamente. El biogás se genera a partir de la digestión anaerobia, mediante bacterias de fermentación que se encargan de descomponer la materia orgánica, metabolismo que no necesita del oxígeno

1.1.1. Fermentación anaeróbica

Sostiene que la fermentación anaeróbica es un proceso natural que ocurre en forma espontánea en la naturaleza y forma parte del ciclo biológico. De esta forma se puede encontrar el denominado "gas de los pantanos que brota en aguas estancadas, el gas natural metano) de los yacimientos petrolíferos, así como, el gas producido en el tracto digestivo de los rumiantes como los

bovinos. En todos estos procesos intervienen las denominadas bacterias metanogénicas”. Dichas bacterias son las encargadas de digerir la materia orgánica y devolver al medioambiente los elementos básicos para reiniciar el ciclo.

El proceso de fermentación se compone de tres fases diferenciadas en el proceso de degradación del alimento de los microorganismos.

1.1.2. Fase de hidrolisis

En esta etapa, la materia orgánica es hidrolizada por la acción de enzimas producidas por bacterias hidrolíticas, rompiendo y transformando las cadenas de estructuras carbonadas haciéndolas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando hidrógeno y dióxido de carbono.

1.1.3. Fase de acidificación

En esta etapa los compuestos simples la llevan a cabo las bacterias acetogénicas y realizan la degradación de los ácidos orgánicos llevándolos al grupo acético $\text{CH}_3\text{-COOH}$ y liberando como productos hidrógeno y dióxido de carbono. Esta reacción es endoexérgica, pues demanda energía para ser realizada y es posible, gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio, minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias, hace posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.

1.1.4. Fase metanogénica

Las bacterias intervinientes en esta etapa pertenecen al grupo de las achibacterias y poseen características únicas que las diferencian, por lo cual se cree que pertenecen a uno de los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre.

1.1.5. Rumen

Los rumiantes son mamíferos herbívoros cuyo estómago, se encuentra formado por cuatro partes: panza, rumen o herbario; redecilla; libro o bonete; y cuajar o abomaso.

El rumen tiene un tamaño relativamente grande, con una capacidad de 100 a 150 litros en una vaca o 6 litros en una oveja, y se encuentra a una temperatura y acidez constantes (39 °C, pH 6,5). El forraje llega al rumen o panza, mezclado con la saliva que contiene bicarbonato y allí es sometido a un movimiento rotatorio durante el cual ocurren las fermentaciones. Esta acción peristáltica facilita la adherencia microbiana al material celulósico suspendido.

1.1.6. Aprovechamiento energético

Los gases de vertedero que se recuperan pueden: quemarse o utilizarse para la recuperación de energía en forma de electricidad. Actualmente, la generación de energía eléctrica parece ser la alternativa más usada para controlar el gas de vertedero. No obstante, su uso se ve limitado a aquellos vertederos donde se puede demostrar que es beneficioso para el ambiente y a la vez que sea económicamente viable. Para cumplir con los criterios financieros, se debe verificar que el riesgo financiero sea nulo.

1.1.7. Ventajas de la utilización de biogás

Entre las ventajas más importantes se pueden mencionar:

- Su producción es renovable.
- Su proceso de producción primaria y elaboración industrial determina un balance de carbono menos contaminante que los combustibles fósiles.
- Cumple con los requisitos de la EPA (Environmental Protection Agency) para los combustibles alternativos
- Su combustión genera menos elementos nocivos que los combustibles tradicionales reduciendo así las posibilidades de producir cáncer.
- Es menos irritante para la epidermis humana.

1.2. Formación y utilización del biogás

Hasta hoy y desafortunadamente, de un futuro no tan cercano, el 90 % de las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón), todos ellos extinguidos, fuertemente contaminantes y utilizados en forma ineficiente, por el interés predominante de la producción de energía sobre el de su efecto ecológico.

Como es conocido en los últimos años, las fuentes alternativas de energía han ido adquiriendo una importancia cada vez mayor a nivel mundial, lo cual, básicamente por razones energéticas y ambientales, también es una tendencia mundial. El déficit de energía que sufre el mundo actual y en particular en Cuba, tiene una situación cada vez menos favorable. Las fuentes tradicionales de energía (combustibles fósiles) no parecen ser solución sino a muy largo plazo.

1.2.1. Utilización y usos del biogás

Puede ser utilizado en la finca o en el entorno urbano donde se implemente el sistema. Con el uso del biogás se puede generar electricidad, y sustituir al gas propano o al diésel como fuentes energéticas en la producción de electricidad, calor o refrigeración. En el sector rural, el biogás puede ser utilizado como combustible en motores de generación eléctrica para autoconsumo de la finca o para vender a otras. Puede también usarse como combustible para hornos de aire forzado, calentadores y refrigeradores de absorción. Las fincas o instalaciones agropecuarias tienen la posibilidad de suplir la totalidad de sus requerimientos energéticos si se recolectan todos sus residuos orgánicos y se utilizan en la producción de biogás.

1.3. Propiedades del biogás

El biogás es un gas más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de entre los 600 y los 700 °C. Cuando se produce la combustión del biogás la llama de éste puede alcanzar hasta los 870 °C. Su poder calorífico depende del contenido de metano que posea, de acuerdo a los parámetros de la Tabla Compuestos Típicos del Biogás su poder calorífico puede variar desde 3,500 kcal/m³ (45% de CH₄) hasta 5,250 kcal/m³ (60% de CH₄), lo que supone de 4.07 kWh/m³ a 6.11 kWh/m³, respectivamente, puede llegar éste valor hasta los 6.95 kWh/m³, si el porcentaje de CH₄ alcanza el 70 %.

Tabla I. **Compuestos típicos del biogás**

Componente	Porcentaje aproximado
Metano (CH ₄)	45-60
Dióxido de Carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0.1-1
Sulfuro de hidrogeno	0-1
Amoniaco	0.1-1
Hidrógeno	0 -0.2
Monóxido de carbono	0-0.2
Constituyentes en Cantidades Traza	0.01-0.06

Fuente: George Tchobanoglous, Gestión Integral de Residuos Sólidos, p431.

El CH₄ es la base energética del biogás, el CO₂ es el segundo componente de importancia, siendo un componente no energético, su proporción es función de la naturaleza del influente y/o de la técnica empleada en la fermentación.

El N₂ se debe a filtraciones de aire exterior en la fermentación o a arrastres por el influente, el O₂ es igualmente por filtraciones de aire, su presencia resulta tóxica para las bacterias metanógenas, su exceso en el biogás acarrea potenciales peligros de explosividad para concentraciones altas comprendidas entre 8 y 20% del volumen tota

1.4. Biometanizacion de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

A continuación se presenta la descripción de la fracción orgánica de los residuos.

1.4.1. Fases de fermentación anaerobia

La fermentación anaerobia comprende una compleja serie de reacciones de digestión y fermentación que llevan a cabo diferentes especies bacterianas, en condiciones anóxicas. Este proceso biológico se basa en la transformación, a través de reacciones bioquímicas de la materia orgánica contaminante en biomasa y en un gas cuyos componentes principales son el CH₄ y el CO₂, y que se conoce con el nombre de biogás.

Este proceso es uno de los mecanismos más frecuentemente utilizados por la naturaleza para degradar sustancias orgánicas. También se produce una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos), entre los que se encuentran los componentes más difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno y el fósforo, y la totalidad de los elementos minerales (K, Ca, Mg, etc.).

La digestión anaerobia es desarrollada por un gran número de bacterias, que se encuentran en perfecta coordinación y cooperación las unas con las otras, tanto es así que el sustrato de una de ellas es el producto de la anterior. Este proceso de fermentación de la materia orgánica consta de cuatro fases secuenciales desde las primeras descomposiciones microbianas de la materia orgánica hasta la estabilización del producto con la producción del denominado biogás.

Estas fases se denominan:

- Hidrólisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

- Hidrolisis

El primer paso de la fermentación anaerobia es el proceso de Hidrólisis, que sucede en los polímeros orgánicos como los carbohidratos, lípidos, polisacáridos, grasas y proteínas. Los polímeros son hidrolizados hasta pequeños fragmentos, como azúcares, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga, alcoholes y compuestos intermedios. Este proceso lo realizan microorganismos por medio de exoenzimas como la celulasa, almidasa, lipasa o proteasa

Cualquier sustrato se compone de los tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. La hidrólisis de cada tipo de compuesto se realiza por diferentes grupos enzimáticos. El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso dependen de muchos factores, entre otros del pH, la temperatura, la concentración de biomasa hidrolítica, tipo de materia orgánica y el tamaño de partícula.

- Acidogénesis

Este paso implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes de la hidrólisis, como ácidos grasos de cadena larga, ácidos y amino ácidos, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como el ácido acético (CH_3COOH), pequeñas concentraciones de ácidos grasos volátiles, ácido fúlvico y otros ácidos más complejos que son utilizados en éste paso como sustratos por microorganismos metanogénicos. Pero los principales productos de ésta etapa son ácidos grasos volátiles, H_2 y CO_2 ; aunque también se puede crear en éste paso una acumulación de distintos compuestos como el etanol y sales como lactato, propionato y biturato.

Debido a la composición de estas sales no pueden ser utilizadas por los microorganismos metanogénicos y deben de descomponerse o degradarse de alguna manera, por los microorganismos productores de hidrógeno, proceso que recibe el nombre de Acetogénesis.

- Acetogénesis

Esta conversión intermedia es importante para la obtención del biogás, pues los componentes finales de la acidogénesis no pueden ser utilizados directamente, por los metanógenos, obteniéndose acetato, CO_2 y H_2 .

Los acetógenos crecen lentamente y dependen del hidrógeno en la degradación de distintos sustratos para la obtención de energía; así de esta manera la acetogénesis se lleva a cabo por la interdependencia entre los organismos productores de hidrógeno y los consumidores de éste, en lo que se puede denominar una relación sintrópica.

- Metanogénesis

Ésta es la parte final en la fermentación anaerobia metanogénica; en esta fase se genera el CH_4 a partir de la descomposición del ácido acético o a partir de la fusión del CO_2 y el H_2 .

1.5. Factores ambientales con influencia en la digestión anaerobia

La complejidad de la fermentación o digestión anaerobia refleja la parte biológica de un ecosistema que está influido, por parámetros físicos y químicos. Estos factores son importantes en la tecnología de la digestión anaerobia en donde se incluyen los siguientes.

1.5.1. Temperatura

El tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos en los reactores anaeróbicos es llevado a cabo, normalmente, dentro de dos rangos distintos de temperatura: el rango mesofílico, entre el intervalo de temperatura de 25 a 40 °C, y el rango termofílico, con temperaturas mayores a los 45°C.

Un cambio entre condiciones de rango mesofílico a rango termofílico puede mostrar como resultado inmediato un cambio en la población metanogénica debida a una muerte rápida de los organismos en condiciones mesofílicas.

1.5.2. pH

Cada grupo microbiano involucrado en la fermentación anaeróbica tiene una región de pH específica para su crecimiento óptimo. Para los ácidogénicos el pH ideal es de 6, mientras que para los acetógenos y metanógenos es de 7. El pH es, además, un importante modulador del sistema, puesto que influye en varios equilibrios químicos, se puede desplazar hacia la formación de un determinado componente que tenga influencia en el proceso. Por ejemplo, altos pH favorecen la formación de amoníaco libre, auténtico inhibidor de la fase metanogénica.

1.5.3. Nutrientes

En la degradación anaerobia de residuos sólidos mixtos o mezclas de aguas residuales se puede suponer que los nutrientes necesarios y micro nutrientes están disponibles en cantidades ilimitadas. En el tratamiento de un solo residuo o algunas aguas residuales la degradación puede limitarse por la

disponibilidad de nutrientes. La adición de elementos de traza como el níquel y el cobalto a la fermentación estimula los procesos anaerobios.

1.5.4. Toxicidad

Normalmente se considera que los metanógenos son el grupo bacteriano más sensible a los tóxicos de los microorganismos implicados en la fermentación anaerobia. Sin embargo, se puede dar el caso de una aclimatación o una reversibilidad a ciertos efectos tóxicos. Algunos de estos efectos comunes en la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos son los asociados a la presencia de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y ácidos grasos volátiles. La toxicidad de estos compuestos depende del pH.

Las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno. Y es por eso que en estos cultivos en los digestores anaeróbicos hay también bacterias anaeróbicas que presentan características facultativas en la hidrólisis y en la acidogénesis, pues al presentarse oxígeno es consumido rápidamente por estos microorganismos.

1.6. Utilización del biogás para producción de energía eléctrica, a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos

- Se puede usar la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos para generar biogás que puede producir energía en distinta forma.
- Calor y vapor: pueden ser el producto principal en aplicaciones de calefacción y cocción, o puede ser un subproducto de la generación de electricidad en ciclos combinados de electricidad y vapor.

- Combustible gaseoso: El biogás producido puede ser utilizado en motores de combustión interna (MCI) para generación eléctrica, para la calefacción y acondicionamiento en el sector doméstico, comercial e institucional y en vehículos modificados.
- Generación de electricidad: La electricidad generada a partir de FORSU puede ser comercializada con el término moderno de energía verde, por considerarse en el grupo de energías renovables.

Además, el biogás puede ser integrado en el sistema de distribución del gas natural, donde se posee.

1.7. Ambiente

A diferencia del caso de los biocombustibles, el balance de CO₂ final no es el condicionante básico en este tipo de energía. El origen en muchos casos de la materia prima procede de subproductos de la industria agroalimentaria o de residuos orgánicos urbanos.

El balance de CO₂ debe de ser considerado en conjunto con todos los factores implicados para valorar si su impacto ambiental es positivo en conjunto o si por el contrario el efecto de producción de energía impacta negativamente sobre el medio ambiente.

En este caso, la necesidad de eliminación de estos residuos y la generación de subproductos tales como fertilizantes parecen indicar de una manera general que los beneficios ambientales obtenidos superan a los inconvenientes

Se debe considerar también que dado el origen diverso, pueden aparecer en los gases generados compuestos químicos contaminantes. Un análisis detallado de las materias primas y de los gases emitidos puede aconsejar que se utilicen filtros correctores o combustiones a altas temperaturas como medidas correctoras para evitar la contaminación de la atmósfera o la producción de olores.

1.8. Biodigestor

El digestor es el lugar donde se produce la fermentación, de manera simple se podría decir que es un contenedor, el cual está cerrado herméticamente, en el cual se depositan los desechos.

También denominado como bioreactor, es una cámara hermética en la cual se lleva a cabo el proceso bioquímico de fermentación anaerobia. Afirma (Hilbert, s/f) que la selección de los materiales de construcción tiene una gran importancia y por lo tanto, debe satisfacer los siguientes requerimientos:

- Resistencia a los esfuerzos de origen mecánico y térmico.
- Resistencia al ataque químico
- Posibilidad de ser modelado y/o construido localmente
- Disponibilidad local
- Compatibilidad ambiental

1.8.1. Reactor

Es el dispositivo principal donde ocurre la producción. Puede tener formas cilíndricas, cúbicas ovoides o rectangulares y pueden estar contruidos de

distintos materiales desde una piscina cubierta con polietileno, concreto o acero inoxidable. Es favorable que el reactor cumpla los siguientes requisitos:

- Impermeable al agua y al gas para evitar contaminaciones del sustrato o pérdidas del biogás.
- Aislante para minimizar las pérdidas de calor que favorece la fermentación anaerobia como se indicará más adelante.
- Estabilidad estructural capaz de soportar cargas estáticas y dinámicas. Debe incluirse un estudio de suelos especialmente para los que serán construidos bajo tierra donde pueda afectarse capas freáticas.
- Contar con un sistema de agitación que mantenga homogéneo el sustrato dentro del reactor.

1.8.2. Tipos de biodigestor

Los biodigestores se clasifican, según su forma de operación y frecuencia de carga, o sea la frecuencia con la que se le introduce materia a descomponer.

- Discontinuo: se cargan una sola vez y se retira cuando ya se ha dejado de producir gas, entonces se renueva de materia orgánica. Se usa cuando la disponibilidad de materia orgánica es limitada o intermitente.
- Semicontinuo: se cargan en lapsos cortos como de 12 horas, 1 vez al día, o cada dos días, se utiliza cuando la disponibilidad de materia orgánica es constante en los días. Los principales, son el hindú, el chino y el taiwanés, cada uno con ventajas y desventajas, como si se quiere aprovechar más el gas, o el biol, si se quiere usarlo para fines sanitarios o de producción, diversas ventajas que se observarán más adelante.

- Continuo: se cargan continuamente y principalmente tienen la finalidad de tratamiento de aguas negras, así como de producción a gran escala y como el uso de alta tecnología para el control, es sobre todo de corte industrial.

1.8.3. Beneficios

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, entre otros) en determinada dilución de agua para que, a través de la fermentación anaerobia se produzca gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio, y además, se disminuya el potencial contaminante de los excrementos.

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Análisis de la situación actual del mercado la Terminal, zona 4

El mercado la Terminal, situado en 0 Avenida entre 7a. 8a. calles zona 4 es uno de los centros de comercio más grande de la ciudad, sus más de 4,500 inquilinos le ofrecen una amplia variedad de productos como verduras, fruta, carnes, jarcia, granos, calzado, ropa, entre otros.

Actualmente, los desechos sólidos son acumulados en un punto de acopio, el cual se encuentra ubicado en una de las calles de zona 4 y ocupa un área de 500 m² incluso puede abarcar más área dependiendo de los días festivos. En el lugar se encuentra muchos recolectores de basura, los cuales se dedican a buscar los materiales reciclables y separarlos, actualmente separan el cartón, papel, embaces PET, aluminio, plásticos, nylon. Estos recolectores trabajan de manera informal para empresas que se dedican al reciclaje. También se encuentran personas de escasos recursos entre ellos niños y adultos, los cuales se dedican a buscar comida para llevar a sus familias para sobrevivir.

Figura 1. Centro de acopio, terminal zona



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. **Punto de reciclaje, terminal zona 4**



Fuente: elaboración propia.

Los desechos sólidos acumulados son recolectados por el tren de aseo de la Municipalidad de Guatemala, para este fin la municipalidad cuenta con un departamento de limpieza, el cual es el encargado de toda la logística; este departamento fue quien proporcionó la información de la cantidad de camiones que recolectan los desechos sólidos diariamente, así como los horarios y la capacidad de los mismo.

Luego de ser recolectados, los desechos sólidos son transportados a los vertederos controlados de la Municipalidad de Guatemala.

2.2. Tipo de estudio

El estudio es cuantitativo descriptivo, ya que se determinó la relación del uso de desechos sólidos tratados mediante digestión anaeróbica para la obtención de biogás; para esto se realizaron pruebas evaluando el potencial energético del biogás obtenido con base al porcentaje de materia orgánica contenido en la muestra de desechos sólidos, con el fin de encontrar la fracción mínima de desechos orgánicos que deben contener los desechos sólidos que sea factible la obtención de biogás con alto potencial energético.

Es un estudio descriptivo con enfoque cuantitativo dado que se recolectaron datos sobre componentes sobre la producción de biogás.

La investigación descriptiva específica, las propiedades, características importantes sobre el potencial de producción de biogás de los desechos orgánicos del mercado la Terminal, zona 4, es importante para determinar si puede haber un aprovechamiento de los desechos en este sector público o descartar estos desechos como posible fuente de producción de biogás.

Los estudios descriptivos midieron de forma independiente las variables y se centraron en medir con la mayor precisión.

El enfoque cuantitativo utilizó la recolección y el análisis de datos para determinar las variables evaluadas.

Esto se realizó a través de la medición numérica, uso de estadística para establecer patrones de la caracterización de residuos, su utilización para la producción de biogás.

2.3. Variables

A continuación se describen todas las variables, según la metodología que se utilizará para esta investigación.

- pH: fue medido de manera cuantitativa, mediante papel tornasol o papel pH.
- Temperatura: la temperatura fue medida por medio de un termómetro que fue introducido por la válvula de salida del biodigestor, esta temperatura fue medida en grados Celsius de manera cuantitativa.

- Humedad: El porcentaje de humedad de cada muestra fue medido en el laboratorio químico, es una variable cuantitativa medida en porcentajes.
- Biogás: el biogás fue el resultado de la descomposición de los residuos sólidos orgánicos biodegradables mediante digestión anaerobia, el biogás fue medido en centímetros cúbicos de manera cuantitativa.
- Tiempo de residencia: es el tiempo en el cual la muestra duro en el biodigestor luego de ser sellado herméticamente, este tiempo se determinó en días.
- Sólidos totales: son la cantidad de solidos que existían en la muestras en ausencia total de agua fue medido en el laboratorio químico, es una variable cuantitativa medida en porcentajes.
- Sólidos volátiles: fueron la materia orgánica que puede eliminarse o volatilizarse fue medido en el laboratorio químico, es una variable cuantitativa medida en porcentajes.

2.4. Muestreo

Las muestras fueron recolectadas durante cinco días continuos bajo condiciones controladas, la recolección de las muestras se hizo por medio una caja de madera de un pie cúbico de volumen recubierta internamente con bolsa plástico de color blanco, para mantener las muestras sin alteración ni fugas de lixiviados.

Figura 3. **Contenedor de muestra**



Fuente: elaboración propia.

El número de muestras para ser examinadas en laboratorio fueron calculadas por la fórmula descrita posteriormente, debido a que la metodología utilizada requiere de análisis estadísticos, al proceso de recolección de la información a realizar se le aplicarán las siguientes técnicas:

Para estimar la cantidad de corridas a realizar en el laboratorio se utilizará la siguiente ecuación:

$$n = \frac{Z^2PQ}{E^2}$$

- Donde
 - N: número de muestras
 - Z: valor obtenido, mediante niveles de confianza. Se toma en relación con el 95 % de confianza que equivale a 1.96 e: limite aceptable de error muestra que en el presente caso se tomará igual a 0.05.
 - Q probabilidad de fracaso
 - P probabilidad de éxito

$$n = \frac{Z^2 PQ}{E^2} = \frac{(1.96)^2 * (0.95) * (0.05)}{(0.15)^2} = 3$$

Por lo que se tomaron 3 muestras de en cada corrida de las fases experimentales.

Las muestras recolectadas fueron llevadas posteriormente al laboratorio para ser caracterizadas física y químicamente.

2.4.1. Caracterización física

La caracterización física de la muestra se realizó por medio de pesos para estimar los porcentajes de los diferentes tipos de residuos sólidos, a continuación se describe el procedimiento:

- Se pesó el total de la muestra.
- Se separaron los diferentes tipos de residuos sólidos.
- Cada tipo de residuo sólido fue pesado de manera individual.
- Se estimó el porcentaje de cada tipo de residuo sólido, relacionando el peso de cada tipo con el peso total de la muestra.
- Las muestras se separaron en residuos sólidos orgánicos biodegradables e inorgánicas.

2.4.2. Caracterización química

Las muestras recolectadas fueron separadas en la caracterización física en desechos sólidos orgánicos biodegradables y desechos sólidos inorgánicos, los desechos sólidos orgánicos biodegradables fueron llevados posteriormente al laboratorio para ser caracterizadas químicamente descritas a continuación.

Tabla II. **Caracterización química**

Nutrientes	%
Nitrógeno	2.22
Fosforo	2.22
Potasio	1.83
Humedad	75.84
pH	6.97

Fuente: Unidad de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

2.5. Técnicas

Se describen las técnicas utilizadas para el estudio realizado.

2.5.1. Carga orgánica volumétrica

Con este término, se designa al volumen de sustrato orgánico cargado al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención. La carga se constituyó por la mezcla de un 25% de material orgánico y de un 75% de agua.

Figura 4. **Carga volumétrica, biodigestor**



Fuente: elaboración propia.

Existen diferentes formas de expresar este parámetro el cual se utilizó kilogramos de material/día; expresados por metro cúbico de digestor. Las cantidades de sólidos y sólidos volátiles se extraen afectando a las cantidades en kilogramos de material cargado con los porcentajes de sólidos o sólidos volátiles que se obtiene por análisis. Sólidos totales: (peso húmedo - peso seco)/peso húmedo. El porcentaje de sólidos volátiles se obtiene sometiendo la muestra seca a la mufla, 560° Celsius durante tres horas y extrayendo el siguiente coeficiente:

$$((\text{Peso seco} - \text{peso ceniza}) / \text{peso seco})$$

Un factor importante a tener en cuenta en este parámetro es la dilución utilizada, debido a que una misma cantidad de material biodegradable podrá ser cargado con diferentes volúmenes de agua.

La carga de mezcla que se debe adicionar diariamente se calcula como se indica a continuación:

$$VT = CTT \times 0,75$$

$$CD = VT/TR$$

- Siendo:
 - VT: volumen de trabajo en litros.
 - CTT: capacidad total del tanque en litros.
 - CD: carga de mezcla que se debe añadir en litros.
 - TR: tiempo de retención en días.

2.5.2. Productividad de metano

Uno de los parámetros que permite evaluar la generación de metano, a partir del proceso de fermentación de la materia orgánica es la productividad de metano o productividad metanoica. Este parámetro se define como la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo respecto de la materia dispuesta en el reactor. La expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un determinado resto orgánico en un tiempo determinado, es la siguiente:

$$PCH_4 = \frac{V_{ch4}}{V_{reactor} * t}$$

- Donde:
 - PCH₄: productividad de metano.
 - V CH₄: volumen de metano generado en cm³.
 - V reactor: volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador en kg.
 - t: tiempo considerado en días.

La producción de metano tiene un límite y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el sistema digestor. La fórmula que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado, es la siguiente:

$$M_{\max} = \frac{V_{ch4}}{S_{orgánica\ total}}$$

- Donde:
 - V CH₄: es el volumen de metano generado en cm³.
 - S: orgánica total es la cantidad de solidos volátiles totales utilizado en todo el proceso en gramos.

2.6. Proceso del experimento

El diseño experimental se realizó por medio de la utilización de un biodigestor.

- Los materiales y su descripción:
 - El reactor y la entrada de materiales:
 - Un tanque 60 litros de capacidad. Azules con tapa de cierre hermético.
 - Tapón de limpieza sanitario de 4 pulgadas: Es una especie de adaptador con tapón.
 - Tubo PVC sanitario de 3 pulgadas: Desde el tapón sanitario hasta 5cm antes del fondo del tanque.

- Para la salida del efluente:
 - Adaptador de tanque de 1 pulgada para conectar la válvula
 - Válvula de esfera PVC de 1 pulgada para la salida inferior del efluente.

- Para la salida del biogás y almacén del gas:
 - Conector de tanque de ½ pulgada
 - Válvula de esfera con roscas de ½ pulgada
 - Adaptador para manguera
 - Adaptador “T” para manguera
 - Manguera
 - Globo mediano

- Para unir las partes y sellar:
 - Pegamento para PVC
 - Silicona selladora transparente, ¡resistente a hongos!: Para sellar alrededor de las uniones al tanque e impedir filtración.
 - Cinta aislante
 - Abrazaderas para manguera

- Para mezcla de desechos
 - Residuos orgánicos

Figura 5. **Esquema del biodigestor**



Fuente: Feria de biodigestores: alternativa energética, LONDRES.

Figura 6. **Biodigestor**



Fuente: elaboración propia.

2.6.1. Procedimiento

La muestra ya clasificada en desecho sólido orgánico biodegradable es trasladada al área de experimental, para realizar el procedimiento a continuación descrito:

- Se pesó la muestra de desechos sólidos orgánicos biodegradables, el cual es el 25 % de la capacidad del biodigestor.
- Se pesó la cantidad de agua aplicada al biodigestor la cual es el 75 % de capacidad.
- Se hermetizó el biodigestor para evitar fugas del biogás.
- Se conecta la manguera a la válvula de esfera con roscas.
- El otro extremo es colocado en la probeta con sello de agua, el cual consiste en una probeta invertida dentro de un recipiente con agua, para medir la cantidad de biogás producido.
- Cada 3 días se hizo lecturas de temperatura, pH, y producción de biogás.

Figura 7. Área experimental



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Producción de biogás**



Fuente: elaboración propia.

Se llevó a cabo la cromatografía de gases para determinar el porcentaje de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y nitrógeno (N_2). El valor energético del biogás se midió por medio del poder calorífico inferior (PCI), el cual varía en función del porcentaje de metano que contenga. Para medir el poder calorífico, se quemó en idénticas condiciones de temperatura y presión un volumen determinado de biogás y el mismo volumen de un gas cuyo poder calorífico se conoce. Conociendo las masas de ambos gases y el poder calorífico del gas conocido, se puede calcular el poder calorífico del biogás.

Se inyectó una muestra de 200 μL en un Cromatógrafo de Gases Agilent 6890N GC con detector de captura de electrones, con las condiciones: columna capilar apolar AT-PETRO, con 100 metros de longitud, diámetro interno de la columna: 0.25 mm, capa interna de fase estacionaria: 0.50 μm , temperatura del detector: 230 $^\circ\text{C}$, temperatura del inyector: 230 $^\circ\text{C}$, temperatura del horno: 200 $^\circ\text{C}$, gas de arrastre: nitrógeno, temperatura máxima: 350 grados Celsius.

2.7. Identificación de impactos ambientales

Para la identificación y asignación de valores cuantitativos y cualitativos de impactos ambientales para la evaluación de un instrumento ambiental, existen diferentes métodos, uno de ellos es el método de matriz de causa y efecto, en el cual se consideran las actividades que se desarrollarán en un proyecto. Los elementos analizados reflejan las relaciones causa-efecto entre las actividades y los factores ambientales afectados.

La metodología utilizada para la matriz de causa efectos, compara cada componente ambiental con las actividades a desarrollar en el proyecto. En cada caso se indica si la interacción es positiva (+), negativa (-), si conlleva efectos de ambos tipos (+/-), o si simplemente, es insignificante o inexistente (0). De esta forma, se asegura que se están incluyendo en el análisis ambiental, todas las interacciones relevantes, evitando asignar un gran esfuerzo para recopilar e interpretar información para interacciones no existentes o insignificantes.

Para la identificación, se verifican los impactos que puedan suscitarse. En la aplicación de la matriz se compara cada componente ambiental con las actividades identificadas, indicando cuáles son impactos reales. Luego en la matriz específica para cada fase del proyecto se define la valoración del impacto.

2.7.1. Componentes ambientales analizados

Para determinar los efectos de las actividades del proyecto en cada una de sus fases sobre el medio, se tomaron en cuenta los siguientes componentes:

- Efectos físico-químicos
 - Agua:
 - Cambios en cantidad
 - Cambios de calidad
 - Atmósfera:
 - Emisiones sonoras
 - Gases y material particulado
 - Suelo:
 - Cambios en cantidad
 - Cambios de calidad
 - Uso potencial
- Efectos biológicos:
 - Vegetación
 - Fauna
 - Organismos acuáticos
- Efectos estéticos, socioeconómicos y culturales:
 - Paisaje
 - Riesgos a la salud
 - Cultura
 - Economía
 - Empleo y mano de obra

Tabla III. Tabla matriz de identificación y sus componentes ambientales

Medio	Componente	Impacto
FÍSICO QUÍMICO	Agua (cantidad)	-
	Agua (calidad)	-
	Emisiones sonoras	+
	Gases y material particulado	+
	Suelo (cantidad)	
	Suelo (calidad)	+
	Uso potencial	+
BIOLÓGICO	Vegetación	+
	Fauna	+
SOCIOECONÓMICO Y CULTURAL	Paisaje	+
	Riesgos	+/-
	Cultura	+
	Economía	+
	Empleo	+

Fuente: elaboración propia.

2.7.2. Metodología para evaluación de impactos

Luego de identificados los impactos de cada una de las actividades sobre los componentes ambientales, se asignaron valores cuantitativos y cualitativos a cada uno de ellos.

Para cada impacto significativo identificado en el cuadro elaborado, a continuación se realizó una evaluación de impacto siguiendo la siguiente metodología, los criterios utilizados son: naturaleza, magnitud, importancia, reversibilidad, duración, certeza, tipo, tiempo en aparecer y relevancia para el monitoreo ambiental.

Para la ponderación de los factores, se consideró que la magnitud e importancia son factores principales, por lo que estos se multiplican. Para los criterios de reversibilidad y duración, aunque no menos importantes, se ha preferido sumarlos al producto anterior por su menor relevancia significativa. De esta manera el valor máximo para un impacto sería de la siguiente manera:

$$[(\text{Magnitud} \times \text{importancia}) + \text{Reversibilidad} + \text{Duración}]$$

Los criterios de naturaleza, certeza, tipo y tiempo en aparecer, han sido representados por letras, ya que se ha estimado que constituyen datos de utilidad en la aplicación de las medidas y planes de manejo, pero no presentan una clara naturaleza cuantificable.

Como se observará en los cuadros, se identifican con color rojo las actividades que presentan alto impacto y requieren de actividades de mitigación, con amarillo las actividades que representan mediano impacto y requieren de medidas de mitigación pero en menor escala y las actividades identificadas con el color verde, son las que no representan un impacto significativo, por lo que no es necesario implementar medidas de mitigación considerables.

Tabla IV. Criterio de valoración de impactos ambientales

Crterios	Especificación	Símbolo	Definición
Naturaleza	Positivo	(+)	Interacción que implica una mejora ambiental.
	Negativo	(-)	Interacción que implica afectar un medio.
	No significativo	(n)	Impacto de naturaleza insignificante.
	Positivo o negativo	±	Positivas y negativas según las circunstancias.
	Previsible	(x)	Difícil de cuantificar sin estudios previos.
Magnitud	Intensidad Baja	1	Si el área afectada es inferior a una hectárea o no afecta significativamente la línea base.
	Intensidad Moderada	2	Cuando el área afectada comprende entre 1 y 10 hectáreas, pero puede ser atenuado hasta niveles poco dañinos.
	Intensidad Alta	3	Cuando el área afectada por el impacto es mayor a 10 hectáreas.
Importancia	Sin importancia	0	Impacto insignificante.
	Menor	1	Socialmente poco valorada.
	Moderada	2	Parcialmente valorada desde el punto de vista social.
	Importante	3	Demanda una atención de la sociedad.
Certeza	Cierto	(c)	Cuando el impacto ocurrirá con una probabilidad > al 75%.
	Probable	(p)	El impacto ocurrirá con una probabilidad entre 50 y 75%.
	Improbable	(i)	El impacto ocurrirá con una probabilidad menor del 50%.
	desconocido	(d)	Se requieren de estudios específicos para evaluar la certeza del impacto.
Tipo	Directo	(D)	El impacto es consecuencia directa de la construcción u operación del proyecto, el efecto tiene una incidencia inmediata en algún factor ambiental.
	Indirecto	(In)	El impacto es consecuencia indirecta de la construcción u operación del proyecto, supone una incidencia retrasada en el tiempo respecto a la interdependencia o relación de un factor ambiental con otro.
	Acumulativo	(Ac)	Cuando los impactos individuales repetitivos dan lugar a otros de mayor impacto, o bien al prolongarse en el tiempo la acción del agente o actividad inductora, se incrementa progresivamente su gravedad al carecer el medio de mecanismos de eliminación con efectividad temporal similar a la del incremento de la acción causante del impacto –medio con fragilidad ambiental-.
	Sinérgico	(Sn)	La presencia simultánea de varios agentes o acciones supone una incidencia ambiental mayor que el efecto sumado de las incidencias individuales analizadas aisladamente.

Reversibilidad	Reversible	1	La alteración puede ser asimilada por el entorno de forma medible, a corto, mediano o largo plazo, debido a los procesos naturales de la sucesión ecológica y de los mecanismos de autodepuración del medio.
	Irreversible	2	Supone la imposibilidad o dificultad extrema de retornar por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.
	Irrecuperable	3	La alteración al medio o pérdida es imposible de reparar.
Duración	Temporal fugaz	1	Si el impacto permanece menos de un año.
	Temporal	2	El impacto permanece entre 1 y 10 años.
	Temporal pertinaz	4	Permanece por un tiempo mayor de 10 años; este también puede ser llamado impacto permanente o de duración indefinida.
Tiempo en aparecer	Corto Plazo	(C)	Aparece inmediatamente o dentro de los 6 meses posteriores a la construcción o puesta en marcha.
	Mediano Plazo	(M)	Aparece entre 6 meses y 5 años después de la construcción.
	Largo Plazo	(L)	Se manifiesta 5 o más años después de la construcción o puesta en marcha.
Relevancia para el monitoreo	Baja	(↓)	No es significativo incluirlo en el monitoreo ambiental.
	Media	(⇒)	Se incluye en el monitoreo con vigilancia espaciada para el control de su evolución.
	Alta	(↑)	Debe incluirse dentro del monitoreo con un programa específico de control de su evolución y de la efectividad de las medidas de mitigación aplicadas.

Fuente: Comisión Nacional del Medio Ambiente, República de Chile.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Residuos sólidos generados por el mercado la Terminal, zona 4

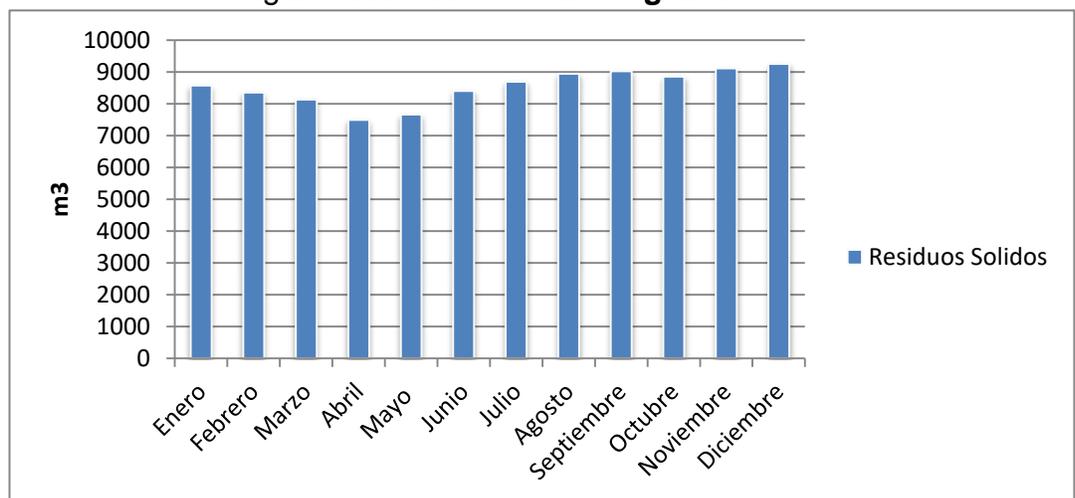
Tras realizar una investigación de campo en el mercado la Terminal, zona 4, con la colaboración de la administración del mercado y el departamento de limpieza de la Municipalidad de Guatemala, se obtuvieron los siguientes resultados de la recolección de desechos sólidos y demás materiales en el año 2016 con su respectiva representación gráfica (figura 9):

Tabla V. Estadística de recolección de desechos sólidos

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio
m ³	8,566	8,345	8,123	7,485	7,652	8,401	8,687	8,937	9,012	8,847	9,101	9,245	8,533

Fuente: Departamento de limpieza de la Municipalidad de Guatemala

Figura 9. Residuos sólidos generados



Fuente: elaboración propia.

3.2. Caracterización física y química

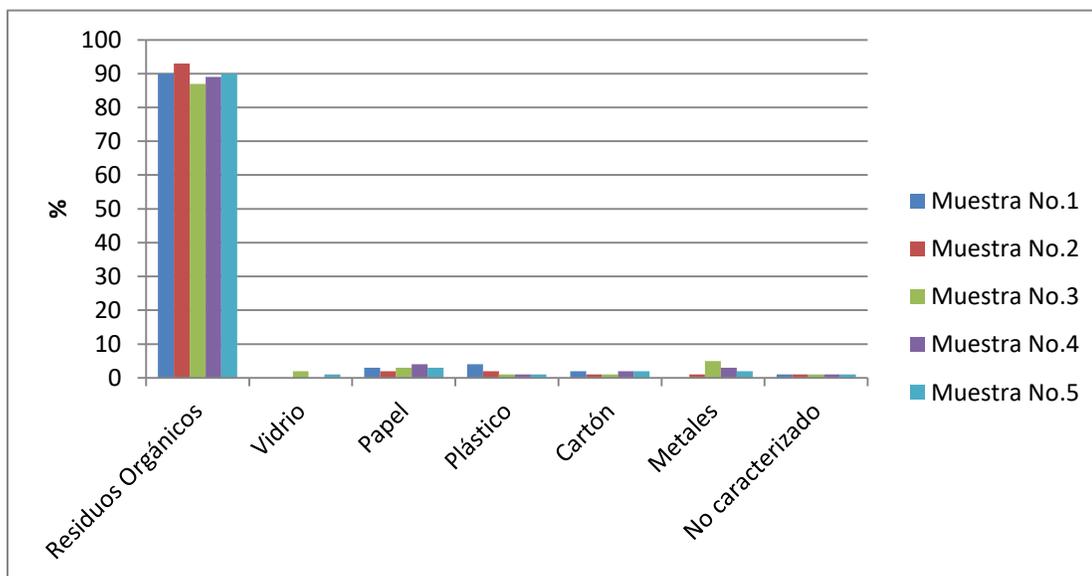
Tras realizar la toma de muestras, las muestras fueron analizadas en la Unidad de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, se obtiene los siguientes resultados:

Tabla VI. **Caracterización de desechos sólidos**

Muestra %	Residuos Orgánicos	Vidrio	Papel	Plástico	Cartón	Metales	No caracterizado
Muestra No.1	90	0	3	4	2	0	1
Muestra No.2	93	0	2	2	1	1	1
Muestra No.3	87	2	3	1	1	5	1
Muestra No.4	89	0	4	1	2	3	1
Muestra No.5	90	1	3	1	2	2	1
Promedio	89.80	0.6	3	1.8	1.6	2.2	1

Fuente: Unidad de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Figura 10. Caracterización física de desechos sólidos



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Caracterización química de desechos sólidos

Nutrientes	Nitrógeno	Fosforo	Potasio	pH	% Humedad	% Sólidos Totales	% Sólidos Volátiles
Muestra No.1	2.37	2.20	1.80	7.0	71.94	28.06	31.05
Muestra No.2	2.43	2.12	1.96	6.8	78.73	21.27	36.78
Muestra No.3	1.85	2.33	1.74	7.1	76.84	23.16	34.15
Promedio	2.22	2.22	1.83	6.97	75.84	24.16	33.99

Fuente: Unidad de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

3.3. Carga orgánica volumétrica

Posteriormente a que las muestras son analizadas en laboratorio fueron transportadas al área experimental para cargar los biodigestores e iniciar con el proceso de producción de biogás bajo condiciones controladas y medidas periódicamente cada tres días obteniendo los siguientes resultados:

Tabla VIII. Carga orgánica volumétrica

No. Biodigestor	Peso (kg)
1	2.0
2	2.0
3	2.0
4	2.0
5	2.0

Fuente: elaboración propia.

3.4. Productividad de biogás

Tabla IX. Productividad de biogás

Día	BD 1		BD 2		BD 3		BD 4		BD 5	
	T °C	pH								
3	18	7.3	19	7.0	20	6.8	18	7.1	21	7.8
6	19	7.2	21	6.8	21	6.7	20	7.0	22	7.7
9	22	7.0	22	6.7	22	6.5	21	6.9	25	7.6
12	27	6.9	25	6.5	25	6.4	25	6.9	27	7.4
15	30	6.9	27	6.5	28	6.3	27	6.8	30	7.0
18	33	6.7	29	6.4	30	6.2	29	6.5	33	7.1
21	34	6.6	30	6.2	33	6.0	31	6.4	35	6.8
24	34	6.6	31	6.1	34	6.0	33	6.5	36	6.6
27	34	6.7	32	6.3	32	6.5	34	6.4	37	6.5
30	35	6.6	34	6.2	35	6.3	33	6.3	34	6.6
33	33	6.5	33	6.1	33	6.1	33	6.1	35	6.6
36	35	6.4	34	6.2	34	6.1	34	6.0	35	6.5
39	35	6.4	34	6.5	33	6.1	36	5.8	36	6.3
42	37	6.0	35	6.3	35	6.2	38	5.5	35	6.4

Fuente: elaboración propia.

Luego de cuarenta y dos días en el área experimental, los biodigestores dieron como resultados los siguientes datos:

Tabla X. Productividad del metano

No. Biodigestor	V_{BIQGAS} cm ³	P_{CH_4} cm ³ /g*día	M_{MAX} cm ³ /g
1	15,586	0.12	190.31
2	15,896	0.13	194.09
3	15,345	0.12	187.36
4	15,785	0.13	192.74
5	15,125	0.12	184.68
Promedio	15,547	0.12	189.83

Fuente: elaboración propia.

3.5. Cromatografía

Posteriormente, las muestras de biogás fueron trasladadas al laboratorio encargado de realizar la cromatografía de gases obteniendo los siguientes resultados:

Tabla XI. Cromatografía de gases

No. Biodigestor	Tiempo de retención (minutos)	Altura de la señal	Área de la señal
1	9.74	5,589,254	47,256,658
2	9.65	6,421,325	67,269,741
3	9.68	5,985,635	58,651,963
4	9.67	6,895,327	50,638,758
5	9.64	4,258,965	45,379,842

Fuente: Laboratorio de cromatografía de gases.

Tabla XII. Análisis cromatografico de gases

No. Biodigestor	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	% N ₂
1	47	49	0.8	2.0
2	51	43	0.5	3.0
3	57	40	0.6	2.0
4	45	50	0.9	3.0
5	48	47	0.8	1.5
Promedio	49.6	45.8	0.72	2.3

Fuente: Laboratorio de cromatografía de gases.

3.6. Potencial de producción de biogás de los residuos sólidos orgánicos biodegradables del mercado la Terminal, zona 4

A continuación se presenta el potencial de producción de biogás con el que cuenta el mercado la Terminal, zona 4, los datos tomados son los promedios de todo el estudio.

Tabla XIII. Potencial de producción de biogás

Generación promedio de desechos orgánicos (m ³)	Densidad de las muestras (Kg/m ³)	Generación promedio de desechos sólidos orgánicos (kg)	% Sólidos Totales	% Sólidos Volátiles	Sólidos Volátiles Totales (kg)
7663	642.47	5.482,197	24.16	33.99	450,197

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Potencial de producción de biogás

Productividad biogás cm ³ /kg	Sólidos Volátiles Totales (kg)	Producción de Biogás Total Mensual (cm ³)	Producción de Biogás Total Mensual (m ³)
189,830	450,197	76,747,218,187	76,747.22

Fuente: elaboración propia.

3.7. Identificación de impactos ambientales

Posteriormente a identificar los impactos ambientales y aplicar la metodología de la matriz de causa y efecto, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XV. Matriz de evaluación de impactos significativos

Medio	Componente	Criterios de valoración									
		Naturaleza	Magnitud	Importancia	Reversibilidad	Duración	Certeza	Tipo	Tiempo en aparecer	Relevancia para el monitoreo	Total
FÍSICO QUÍMICO	Agua (cantidad)	-	1	1	2	2	C	D	C	↑	-5
	Agua (calidad)	-	1	2	2	2	C	D	C	↑	-6
	Emisiones sonoras	+	1	1	1	1	P	D	C	⇒	+3
	Gases y material particulado	+	1	1	2	1	P	D	C	⇒	+4
	Suelo (calidad)	+	1	1	1	1	C	D	M	⇒	+3
	Uso potencial	+	1	2	1	1	P	D	C	⇒	+4
BIOLÓGICO	Vegetación	(n)	1	1	1	1	P	D	C	⇒	3
	Fauna	+	1	1	1	1	P	D	C	⇒	+3
SOCIO- ECONÓMICO	Paisaje	+	1	2	1	2	C	D	C	⇒	+5
	Riesgos	+/-	1/1	1/1	1/1	1/1	C/P	D	C/M	⇒/↑	+3/+3
	Economía	+	2	2	1	2	C	D	M	↑	+7
	Empleo	+	1	2	1	1	C	D	C	↑	+4

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio realizado al botadero del mercado la Terminal, zona 4 refleja que la producción de residuos sólidos es constante y alta durante todos los meses del año, por lo tanto, el mercado la Terminal cuenta con un alto potencial en la producción de desechos sólidos orgánicos biodegradables, esto garantiza una producción constante de biogás durante el año. El mercado la Terminal es actualmente el mercado que produce una mayor cantidad de residuos sólidos.

La caracterización física de los desechos sólidos producidos por el mercado la Terminal, zona 4, refleja la alta generación de desechos sólidos orgánicos biodegradables, los altos porcentajes son debido a que en el lugar hay personas encargadas de la separación de los residuos reciclables, esta actividad disminuye la cantidad de residuos inorgánicos dentro del botadero, esta actividad es favorable para el proceso de producción de biogás, debido a que los residuos finales son en un 90% orgánicos, que son la materia prima en los biodigestores para la producción de biogás, eso demuestra el alto potencial con el que cuenta los desechos sólidos.

La caracterización química de los desechos orgánicos demuestra que los desechos tienen los nutrientes necesarios para la producción de biogás, por lo que se denominan desechos orgánicos biodegradables, estos desechos fueron óptimos para ser sometidos al proceso de digestión anaerobia.

La fase crítica durante el proceso de digestión anaeróbica es la hidrólisis, durante la cual no se produce biogás. La duración de esta etapa entra en función de la composición del material biodegradable, materiales con alto contenido de compuestos complejos, son más difícil de degradar, en la parte experimental se observó que la producción de biogás inició a partir del día 18 en algunos biodigestores, el análisis demuestra que el factor determinante para la producción de biogás fue la temperatura, luego que los biodigestores superaran los 33°C iniciaron a producir biogás, es importante observar que el pH fue decreciendo debido a que el biodigestor experimental fue utilizado de manera discontinua, por lo tanto, no fue recargado nuevamente para equilibrar el pH, el pH decrece, debido a que dentro del biodigestor la materia se va degradando y el aumento de bacterias aumenta propiciando la formación de distintos ácidos: propionico, butírico, láctico, acético. A partir del día 33, la producción de biogás aumenta, debido a que las bacterias aumentan por lo tanto su producción crece, fue importante mantener las condiciones controladas.

Para comprobar la presencia de metano en el biogás generado en los biodigestores experimentales, se realizaron pruebas de combustión al gas obtenido, las cuales fueron positivas, debido a que el metano es un gas inflamable, se observó una combustión al paso del biogás generado, a través de un mechero de baja combustión, comprobando este resultado como una prueba positiva para la presencia de metano, este es el caso de los biodigestores 1, 2, 3 y 5; en el caso contrario, se obtuvo la sofocación de la llama, por la presencia de dióxido de carbono (CO_2) en el biogás, ya que este gas no es inflamable, este caso se presentó en biodigestor 4 en el cual no combustionó de manera adecuada. Esto fue ocasionado posiblemente porque el sistema del biodigestor no estaba totalmente hermético, por lo que pudo existir una pequeña fuga.

El biogás producido por los biodigestores dieron positivo a la prueba de ignición, que es un indicador inicial de la presencia de metano en el biogás, posteriormente se empleó el detector de captura de electrones, debido que este es el detector con que se contaba, perdiendo así sensibilidad en el análisis. Inicialmente se inyectó una muestra de Gas Patrón de Metano, para observar el tiempo al cual se obtenía la detección del gas metano presente en el biogás. Al iniciar no se observó un tiempo de retención constante, ya que el flujo del gas inerte era demasiado bajo, ocasionando que el tiempo de detección fuera elevado y que al comparar este tiempo con el de cualquier muestra que se analizara, no diera el mismo tiempo de detección. El flujo del gas inerte se modificó, a manera que este fuera menor, logrando la detección del gas metano en un tiempo de 9.74 minutos.

Como se puede observar en los resultados cromatográficos de análisis de biogás, se observa que la detección del gas metano, como componente mayoritario del biogás generado, se logra en un tiempo menor a 9.74 minutos. Se tiene una alta resolución en la señal cromatográfica del biogás generado, lo cual se respalda en una altura de la señal mayor que la del gas patrón. En la biodegradación y consecuente generación de biogás, en los biodigestores que conto con materia orgánica biodegradable y agua, existe una mayor concentración de gas metano, lo que se respalda con los cromatogramas obtenidos. Se determinó que el mayor porcentaje de la composición del biogás generado es gas metano.

Los anteriores análisis, demuestran que, los residuos orgánicos biodegradables generados en el mercado la Terminal, zona 4, bajo condiciones y controles determinados en un procedimiento de digestión anaerobia, se obtienen producción de biogás con una mayor concentración de metano. El mercado la Terminal, zona 4 es una buena fuente de materia orgánica, la cual

es utilizada por las bacterias metanogénicas para la producción de metano. La producción de biogás dentro de un biodigestor, mediante la digestión anaeróbica de materia orgánica está determinada, por la presencia de inhibidores, principalmente por la presencia de iones metálicos que en concentraciones muy altas pueden impedir todo el proceso de la biodegradación y por lo tanto, limitan la formación de biogás, debido a esto es la importancia de la caracterización y selección de la materia orgánica con el objeto de obtener altas producciones de biogás.

El experimento con los biodigestores, demuestra que, en el mercado la Terminal existe un potencial de producción de biogás, la producción de materia orgánica biodegradable se da en cantidades significativas, es el mercado que cuenta con la mayor producción de residuos sólidos orgánicos biodegradables, que es la materia prima para la producción de biogás. Las proyecciones hechas en la investigación determinan que el potencial energético con el que cuenta el mercado la Terminal es de 76,747.22 m³ de biogás mensuales, este resultado está sujeto al cambio con otro sistema de biodigestores más eficientes, lo importante fue determinar que con un sistema tan básico de biodigestores se demuestra que si existen un potencial energético real de los residuos sólidos orgánicos biodegradables producido por el mercado la Terminal, zona 4.

Luego de aplicar la matriz de causa y efectos se puede identificar los impactos positivos y negativos que presenta la aplicación del presente estudio, es importante recalcar el mayor impacto negativo se dan en la cantidad y calidad del agua, esto es debido a que el agua es esencial en la producción de biogás, por el otro lado se puede observar que los mayores impactos positivos son el paisaje y la economía esto es debido a reutilización de los desechos sólidos orgánicos para la producción de biogás.

CONCLUSIONES

1. Durante el estudio realizado al mercado la Terminal, zona 4, se determinó en la caracterización de los desechos sólidos producidos por el mercado que en gran porcentaje son desechos sólidos orgánicos biodegradables. Mediante la caracterización física, se determinó que en promedio el 90% de lo desecho sólidos son de tipo orgánicos, por lo tanto, fue óptimo para la producción de biogás, y en la caracterización química se determinó que los residuos sólidos orgánicos cuentan con los nutrientes necesarios para utilizarse como desechos orgánicos biodegradables y son óptimos para la producción de biogás, mediante biodigestores por medio de digestión anaerobia.
2. La parte experimental de la investigación demostró que con los desechos orgánicos biodegradables producidos por el mercado la Terminal, se puede generar biogás, los análisis determinaron que el biogás producido es en promedio mayor al 50 % de metano. Se tomó en cuenta los porcentajes de materia orgánica biodegradable y la cantidad producida de biogás por metro cubico de desechos, se determinó que el mercado la Terminal puede producir 76,747.22 metros cúbicos de biogás mensualmente con un porcentaje de metano arriba del 50 %, utilizando un sistema básico de biodigestores con carga discontinua.
3. Los impactos ambientales producidos por la reducción de residuos sólidos, se determinó que son positivos principalmente en la economía y una mejora de paisaje, el método de producción de biogás reduce los residuos sólidos transformando una parte en biogás, mediante la

fermentación anaeróbica y otra parte en ceniza o lodos, los cuales son en menores volúmenes y se reduce el mal olor de la descomposición, transformando los desechos sólidos en potencial energético. Los impactos negativos principales deben de ser tratados con alta importancia en la aplicación de medidas de mitigación.

RECOMENDACIONES

1. En la fase experimental se utilizó un sistema de biodigestores, los cuales trabajaron como biodigestores discontinuos, por lo que solo se les aplicó una carga de materia orgánica; para posteriores investigaciones, se recomienda hacer pruebas con biodigestores semicontinuos y biodigestores de carga continua, para hacer una comparativa de resultados y determinar el tipo de biodigestor más eficiente para este caso de estudio específico.
2. Los datos obtenidos fueron resultado de biodigestores cargados únicamente con desechos orgánicos, y agua en porcentajes de 25 % y 75 % respectivamente, es recomendable para posteriores investigaciones utilizar activadores bacteriales como heces fecales de animales, los cuales aumentaría la actividad bacteriológica dentro el biodigestor, disminuyendo el tiempo de producción de biogás.
3. En el estudio de campo se identificó el botadero o centro de acopio de los desechos sólidos provenientes del mercado la Terminal, por lo que se recomienda aislar la zona de acopio para evitar el ingreso de personas ajenas a los trabajadores encargados del reciclaje y separación, esto evitaría la propagación de enfermedades dentro de las personas vecinas del lugar.
4. Se sugiere emplear por parte de la Municipalidad de Guatemala personas encargadas de la supervisión del uso adecuado de

protección personal para las personas que se encuentran en el área de separación y reciclaje.

5. Que la Municipalidad de Guatemala haga uso de los residuos sólidos orgánicos, mediante la implementación de biodigestores para la producción de biogás, debido a que el mercado la Terminal, zona 4 cuenta con un alto potencial energético.

6. El poder calórico promedio de un metro cúbico de biogás es de cinco mil kilocalorías, lo que permite generar entre 1,3 - 1,6 kWh, lo cual los 76,747.22 metros cúbicos equivalen a 115,120 kWh, a un precio de venta de Q 0.60 promedio se cuenta con un valor de Q 69,072.00 mensuales, por lo que se recomienda tomar en cuenta este ingreso en el proyecto de la producción de biogás del mercado la Terminal, zona 4.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez, A. (2002). Biomasa y biogás, Universidad Nacional del Nordeste, Facultad de Ingeniería. Cátedra: Máquinas Térmicas II. Argentina.
2. Alcívar González, B. F., & Farías Jaen, C. (2007). Estudio para la Implementación de un Sistema de Generación de Energía Eléctrica Alternativo a partir de Desechos Biodegradables. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil.
3. Arce González, J. J. (2011). Diseño de un Biodigestor para generar biogás y abono, a partir de desechos orgánicos de animales aplicable a zonas *agrarias del Litoral*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana.
4. Zapata, Á. (1997). Utilización del biogás para generación de electricidad Fundación CIPAV. Colombia.
5. Baere, D. (2003). Anaerobic Digestion of solid Waste: State of art. Water Science and Technology.
6. BjÖrnsson, L. (2000). Intensification of the biogas process by improved process monitoring and biomass retention Doctoral Dissertation. Sweden, Lund University, Department of Biotechnology.

7. Castañeda, S. (2007). Efecto de control de pH, temperatura y adición de nitrógeno sobre la digestión anaeróbica de residuos. Maestría en Bioprocesos. Instituto Politécnico Nacional. Unidad profesional interdisciplinaria de biotecnología. Mexico.
8. Cardaci, J.L. (2010). Incorporación de planta de biogás en un establecimiento porcino para autoabastecimiento de energía y bio fertilizantes (en línea). Estudio de factibilidad, Universidad de la Pampa.
9. De la Torre Caritas, N. (2008). Digestión anaerobia en comunidades rurales. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
10. Distel, D. (2012). Biogás a partir de residuos domiciliarios y efluentes cloacales. Maestría en Gestión de Energía y Ambiente. Universidad de Flensburg. Alemania.
11. Campos Pozuelo, E. (2009). Biogás y aprovechamiento de la biomasa Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Sol de la Universidad de Lleida. Grupo Laboratorio de Ingeniería Ambiental.
12. Flotats, X., Campos, E., & Bonmatí, A. (1997). *Aprovechamiento Energético de Residuos Ganaderos*. Lleida: Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo.
13. García Herrera, G. R. (2006). Manual Práctico para Elaborar Proyectos Sociales. 1ª. edición, Edición Siglo XXI, Madrid España.

14. Hilbert, J. A. (2006). *Manual para la producción de biogás*. Buenos Aires: Instituto de Ingeniería Rural.
15. Vera Romero. I. (2001). Desarrollo metodológico para el análisis de la viabilidad de un proyecto de microgeneración. Maestría en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
16. World Energy Council. (1997). *Member Committees*.

ANEXOS

ANEXO 1.

Proceso de elaboración del biodigestor

1. Se perfora la tapa del bidón haciendo dos agujeros, uno para colocar la válvula para la salida del gas; y otro de mayor diámetro para el tapón sanitario por donde entrarán los desechos.
2. Se coloca la válvula para la salida del gas ajustándola con una rondana y una tuerca de tal manera que ésta atravessara la tapa del bidón.
3. Se coloca el tapón sanitario en la tapa fijándolo con pegamento para PVC.
4. Se pega el tubo de PVC con el tapón sanitario.
5. Se perfora en la parte inferior del bidón para poder colocar la válvula para la salida del efluente, se coloca y fija ésta con pegamento.
6. Se recolectan los desechos sólidos orgánicos biodegradables.
7. Llenado del biodigestor con desechos sólidos orgánicos biodegradables y agregarle agua con las condiciones estipuladas.
8. Se coloca la tapa del biodigestor y se asegura con el arillo de metal, asegurando que el biodigestor esté completamente hermético.

9. Se fija la manguera al globo que actuará como contenedor del gas, y medición de generación.
10. Se deja a la intemperie el biodigestor durante los días de retención estipulados, expuesto a los rayos del sol. En este punto se da el proceso de degradación de los desechos y la producción del biogás.

La creación del biogás se da por diversos procesos y estos están principalmente basados en la energía solar que es la mayor fuente que conocemos, estos procesos son biológicos y químicos y determinan el funcionamiento del biodigestor.

ANEXO 2.

Fotografías de trabajo de campo e investigación



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.



Fuente: elaboración propia.