

**ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DEL DESARROLLO  
DE UN GENERADOR DE ENERGÍA NO CONTAMINANTE**

**JESÚS ALBERTO STERLING BARRETO**

Código. 10481619283

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL**  
INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, COLOMBIA

2021

**ANÁLISIS DE PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DEL DESARROLLO  
DE UN GENERADOR DE ENERGÍA NO CONTAMINANTE**

**JESÚS ALBERTO STERLING BARRETO**

Código. 10481619283

**DIRECTORES**

**ING. EDISON OSORIO BUSTAMANTE**

**ING. HÉCTOR JAVIER LUNA WANDURRAGA**

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y CIVIL**

**INGENIERÍA CIVIL**

**BOGOTÁ, COLOMBIA**

**2021**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma jurado**

---

**Firma jurado**

**Bogotá D.C., mayo de 2021**

A Dios por permitirme la existencia y continuar con mis estudios.

A mi madre por su formación, por su esfuerzo, su dedicación, paciencia y sus oraciones.

A mi cuñado y a mi hermana mayor por el papel tan importante que juegan en mi vida.

A Laura Páez por estar a mi lado en los buenos y malos momentos.

A mi perro, mi fiel compañero en todos los momentos de mi vida.

A los docentes con los que he compartido, a mis compañeros y amigos de la infancia.

## Tabla de Contenido

Resumen	12
Introducción	14
1. Formulación y Planteamiento del Problema	15
2. Marco Teórico	17
2.1. Aguas Residuales	17
2.2. Tratamiento de Aguas Residuales	18
2.2.1. Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Urbanas	18
2.2.2. Tratamiento de Aguas Residuales Industriales	19
2.3. Etapas del Tratamiento de Aguas Residuales	19
2.3.1. Etapa Preliminar	19
2.3.2. Etapa Primaria	20
2.3.3. Etapa secundaria	21
2.3.4. Etapa terciaria	23
2.4. Digestión Anaerobia	24
2.4.1. Campos de Aplicación	25
2.4.2. Etapas de la Digestión Anaerobia	26
2.4.3. Variables que Afectan la Digestión Anaerobia	29

	6
2.4.4. Digestores Anaerobios	36
2.5. Métodos de Cálculo	38
3. Proyección de los Sistemas Generadores de Biogás	43
3.1. Colección de Biomasa	43
3.2. Tipos de Biodigestores	45
3.2.1. Digestor de Domo Fijo	46
3.2.2. Digestores de Tanque Flotante	48
3.2.3. Digestores Horizontales	50
3.3. Otros Tipos de Digestores	51
3.3.1. Digestores de Tipo Contenedor	51
3.3.2. Digestores Prefabricados	53
3.4. Variables a Considerar	55
3.4.1. Correcta Elección del Tipo de Digestor	56
3.4.2. Ubicación del Digestor	57
3.4.3. Volumen del Digestor	58
3.4.4. Sistema de Alimentación	59
3.4.5. Almacenamiento del Biogás	60
3.4.6. Tratamiento del Efluente	62
4. Digestión Anaerobia Rural a Través del Mundo	63
4.1. Continente Asiático	63

	7
4.2. Continente Africano	64
4.3. América Latina	65
4.4. Continente Europeo	65
5. Ejercicio de Aplicación Práctica	66
5.1. Visita de Toma de Muestras En la Institución Educativa el Prado	67
5.1.1. Planeación de Visita para Medición de Caudales y Toma de Muestras del Agua Residual	67
5.1.2. Descripción de la Toma de Muestras para el Efluente	68
5.2. Muestras de Residuos del Restaurante Escolar	68
5.3. Resultados	71
6. Predicción del Biogás	73
6.1. Producción Total	73
6.1.1. Composición Macromolecular	73
6.1.2. Peso Seco	76
6.1.3. Peso del Agua	77
6.1.4. Fracción Másica Macromolecular	78
6.1.5. Ejecución del Programa	79
6.1.6. Resultados Arrojadados	80
6.2. Producción Parcial	80
7. Análisis de Sensibilidad	83

	8
7.1. Reacción Ideal del Digestor	83
7.2. Otros Tipos de Residuos	84
7.2.1. Caracterización de los Residuos	84
7.2.2. Fracción Másica Macromolecular	85
7.2.3. Resultados Arrojadados	86
8. Análisis Económico	86
9. Conclusiones	89
10. Referencias Bibliográficas	90



## Índice de Gráficas

Gráfica 1. Tipos de Aguas Residuales .....	17
Gráfica 2. Procesos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas .....	18
Gráfica 3. Procesos para el Tratamiento de Aguas Residuales Industriales .....	19
Gráfica 4. Pasos de la Digestión Anaerobia.....	28
Gráfica 5. Variación de la Producción Especifica de Biogás a Medida que Cambia el Tiempo de Retención de Sólidos .....	35
Gráfica 6. Relación entre Temperatura y Tiempo para la Activación de Patógenos .....	36
Gráfica 7. Esquema Simplificado de Reactores de Baja Tasa .....	37
Gráfica 8. Esquema Simplificado de Reactores de Alta Tasa .....	38
Gráfica 9. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo .....	39
Gráfica 10. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo .....	40
Gráfica 11. Sustratos en Retención a través del Tiempo .....	41
Gráfica 12. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo .....	42
Gráfica 13. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo .....	42
Gráfica 14. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo .....	42
Gráfica 15. Esquema de un Digestor Anaerobio y su Relación con el Medio Rural.....	46
Gráfica 16. Esquema General de un Digestor de Domo Fijo .....	47
Gráfica 17. Esquema General de un Digestor de Tanque Flotante.....	49
Gráfica 18. Esquema General de un Digestor Tubular .....	50
Gráfica 19. Esquema General de un Digestor de Tipo Contenedor.....	52
Gráfica 20. Esquema de un Digestor en Hormigón .....	54

Gráfica 21. Esquema de un Digestor de Plástico Prefabricado .....	55
Gráfica 22. Producción de Biogás a Partir de Algunas Materias Primas.....	59
Gráfica 23. Relaciones de Alimentación Estiércol-agua Según el Tipo de Digestor .....	60
Gráfica 24. Clasificación de los Residuos .....	69
Gráfica 25. Área de Desecho de los Residuos .....	70
Gráfica 26. Limpieza de Residuos y Utensilios Post-almuerzo.....	71
Gráfica 27. Clasificación de los Residuos Generados en el Restaurante Escolar del I.E. el Prado .....	72
Gráfica 28. Información Nutricional de la Cebolla .....	74
Gráfica 29. Ejecución del Programa .....	80
Gráfica 30. Producción Parcial de los Residuos .....	82
Gráfica 31. Reacción Ideal del Digestor .....	83
Gráfica 32. Factura de Gas Natural Doméstico .....	88

## Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las Materias Primas Empleadas para la Digestión Anaerobia .	30
Tabla 2. Caracterización de Microorganismos de Acuerdo con la Temperatura.....	32
Tabla 3. Clasificación de la Materia Prima.....	44
Tabla 4. Cuantificación de los Residuos Obtenidos del I.E. el Prado .....	75
Tabla 5. Peso Seco Residuos Obtenido I.E. el Prado.....	75
Tabla 6. Peso del Agua Residuos Obtenido I.E. el Prado.....	77
Tabla 7. Fracción Másica Macromolecular Residuos Obtenido I.E. el Prado .....	78
Tabla 8. Producción Parcial Biogás .....	81
Tabla 9. Caracterización de los Residuos .....	84
Tabla 10. Fracción Másica Macromolecular .....	85

## Resumen

La producción de energía renovable, asequible y no contaminante se puede llevar a cabo a través del manejo de residuos orgánicos que se encuentran en la vida cotidiana. Este proceso, denominado digestión anaeróbica, es una tecnología popular implementada e investigada en laboratorios de muchos países a través del mundo. Los datos sin procesar recopilados en experimentos de laboratorio indican cantidades y tasas de producción de metano ( $\text{CH}_4$ ), para esto se requiere una secuencia de cálculos conceptualmente simples pero de gran dedicación con respecto al tiempo, puesto que la mayoría de publicaciones no explican al detalle su proceso y muchas veces este tipo de cálculos se vuelven un poco tediosos. Por lo tanto es posible que los resultados obtenidos no sean reproducibles en laboratorios como en experimentos; La implementación de paquetes de biogás y programas nos permite abordar este tipo de problemas y realizar predicciones con respecto a la producción de este biogás para después llevarlo a cabo a través de la práctica presencial.

**Palabras clave:** Biogás, Digestión anaeróbica, Metano, Residuos orgánicos, Biodigestores.

### **Abstract**

The production of renewable, affordable and non-polluting energy can be carried out through the management of organic waste found in everyday life, this process called anaerobic digestion, is a popular technology implemented and researched in laboratories in many countries through of the world. The raw data collected in laboratory experiments indicate quantities and rates of methane (CH<sub>4</sub>) production, this requires a sequence of conceptually simple calculations but great dedication with respect to time since most publications do not explain in detail its process and many times these types of calculations become a bit tedious. For all this, it is possible that the results obtained are not reproducible both in laboratories and in experiments, the implementation of biogas packages and programs allows us to address these types of problems and make predictions regarding the production of this biogas and then carry it out through face-to-face practice.

**Key words:** Biogas, Anaerobic digestion, Methane, Organic waste, Biodigesters.

## Introducción

La obtención de energía renovable juega un papel importante en la actualidad, pero sin duda la digestión anaeróbica es una de las formas más simples y prácticas de obtener energía no contaminante. A través de este proceso se obtiene el denominado biogás, el cual permite el aprovechamiento y tratamiento de los residuos orgánicos generados por el ser humano en viviendas, colegios, empresas, etc. La producción de biogás es también una de las formas más seguras de obtener energía, ya que no se liberan contaminantes a la atmósfera tales como el material particulado característico de la quema de maderas, así mismo la producción de éste es parte del tratamiento de aguas residuales permitiendo así un manejo ambiental sostenible del agua y demás recursos.

El presente trabajo de grado, se encuentra entre los proyectos de la línea de infraestructura y desarrollo sostenible, los cuales han sido realizados e inculcados durante todo el periodo académico de pregrado en la Universidad Antonio Nariño. A continuación se encontrarán diferentes conceptos que permitirán al lector comprender los capítulos siguientes, los principios, el contexto, ventajas y desventajas, normas, conclusiones entre otras cosas más descritas. En el desarrollo del trabajo se encontrará el análisis de los digestores en la actualidad y los estudios desarrollados, teniendo en cuenta esto se evaluará la factibilidad de desarrollar este tipo de proyectos, todo esto mediante la implementación de programas virtuales e investigaciones.

## 1. Formulación y Planteamiento del Problema

Se considera que el recurso más importante para la vida humana es el agua potable y en Colombia se cuenta con una gran riqueza hídrica la cual a través de los últimos años se ha venido deteriorando, esto debido a la explotación de estos recursos, al uso de agroquímicos en las zonas rurales, al crecimiento poblacional, y la urbanización. Las aguas residuales, producto de la implementación humana, no cuentan con el tratamiento adecuado antes de ser vertidas a los cuerpos hídricos, ya que en la actualidad no se dispone de los suficientes recursos económicos para la construcción de estos sistemas de tratamiento final. En Colombia se demostró a través del Estudio Nacional de Agua, que se vierten a los sistemas hídricos aproximadamente 2.000 toneladas por día de carga orgánica biodegradable y más de 3.200 toneladas de sólidos suspendidos. (IDEAM, 2014).

La falta de recursos económicos y cultura por parte de la sociedad han hecho de la implementación del tratamiento de las aguas residuales una necesidad, ya que la sociedad debe garantizar el bienestar humano y así mismo proteger el medio ambiente. Cuando no se lleva a cabo lo que es un saneamiento básico eficiente, se empiezan a originar las denominadas enfermedades hídricas tales como el cólera, hepatitis, dengue, diarrea, entre otras que afectan a la comunidad. Todo esto debido al vertimiento y contaminación de las aguas superficiales como subterráneas.

El crecimiento rápido poblacional a través del mundo, también ha provocado la disminución de las fuentes de agua potable, de tal manera que en los últimos años se ha venido trabajando en la búsqueda de nuevas alternativas sostenibles para el manejo y tratamiento de las aguas residuales con el fin de dar un máximo aprovechamiento y obtener su previa utilización. Algunas de las propuestas más relevantes, tienen que ver con el aprovechamiento de las aguas residuales

producto de la actividad agrícola, ya que estas contienen grandes índices de nutrientes y elementos como los son el nitrógeno, el fósforo, entre otros.

El presente trabajo tiene como objetivo dar a conocer la implementación del tratamiento de aguas residuales y aprovechar al máximo las cargas depositadas. Todo esto mediante la implementación de un paquete de biogás o programa virtual el cual permitirá abordar este tema y desarrollar predicciones con respecto a la producción de biogás para que previamente se lleven a cabo este tipo de prácticas de manera presencial. Es importante tener en cuenta que este proyecto se encuentra dentro de los lineamientos establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la resolución 631 del 17 de marzo de 2015, sobre los vertimientos a los cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado, con el cual se pretende reducir las cargas contaminantes provenientes de las aguas residuales y así mismo, fomentar el consumo de agua idóneo. Sin duda la ejecución de este programa permitirá desarrollar de manera más fácil y profesional la producción de biogás y así mismo de energía no contaminante, colaborando a las comunidades rurales las cuales carecen de un sistema adecuado de saneamiento básico y precisamente estas comunidades son las más afectadas cuando de enfermedades hídricas se habla.



## 2. Marco Teórico

Con el propósito de facilitar la comprensión de los temas que se desarrollan a lo largo del trabajo, a continuación se presentan una serie de conceptos a tener en cuenta.

### 2.1. Aguas Residuales

Se consideran aguas residuales, aquellas afectadas negativamente ya sea por acciones naturales o del hombre; Estas se generan a partir de residuos líquidos domésticos, agrícolas, urbanos, pluviales o industriales, que principalmente contienen grasas, residuos industriales, materia orgánica, entre otros contaminantes agregados.

Es importante identificar qué tipo de agua residual se va a tratar para dar el más adecuado y eficiente tratamiento y estas se pueden clasificar en tres tipos los cuales se representan en la

Gráfica 1 Tipos de Aguas Residuales

*Gráfica 1 Tipos de Aguas Residuales*



*Fuente: Propia*

## 2.2. Tratamiento de Aguas Residuales

Este proceso también denominado depuración de aguas residuales, consiste en la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de eliminar los elementos contaminantes que se encuentran en el agua residual a tratar. Una vez se identifica la procedencia del agua residual, es importante tener en cuenta los diferentes procesos que se pueden emplear para su tratamiento.

### 2.2.1. Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Urbanas

Para las aguas residuales domésticas o urbanas, se pueden emplear los siguientes procesos que en su mayoría suelen ser biológicos y se plasman en la Gráfica 2. Procesos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas

Gráfica 2. Procesos para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas



Fuente: Propia

### 2.2.2. Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

Para el tratamiento de este tipo de aguas residuales principalmente se emplean procesos de tratamiento físico-químicos, algunos de los ejemplos de estos procesos se representan en la Gráfica 3. Procesos para el Tratamiento de Aguas Residuales Industriales

*Gráfica 3. Procesos para el Tratamiento de Aguas Residuales Industriales*



*Fuente: Propia*

## 2.3. Etapas del Tratamiento de Aguas Residuales

Durante el proceso de tratamiento o depuración de aguas residuales, estas aguas se trasladan a través de una red de tuberías, cloacas y desagües, para después ser dejadas en reposo entre 24 y 48 horas, todo esto para recibir su respectivo tratamiento. En este proceso de tratamiento se encuentran cuatro etapas, las cuales son:

### 2.3.1. Etapa Preliminar

En esta etapa el agua a tratar es acondicionada para su correcto tratamiento, con el fin de preservar la instalación de erosiones y taponamientos. Aquí es importante la remoción de

elementos flotantes y grasas que puedan causar previamente problemas de mantenimiento.

### ***2.3.2. Etapa Primaria***

En esta etapa a través de un proceso de sedimentación y mediante la implementación de sustancias coagulantes y floculantes se eliminan todos los sólidos que se encuentran suspendidos y la materia orgánica.

Esta etapa se subdivide en varias fases las cuales son las siguientes:

#### **2.3.2.1. Remoción de Sólidos o Cribados**

Mediante el cribado, los sólidos de gran tamaño como escombros, bolsas, llantas y demás objetos son removidos, con el fin de evitar taponamientos, daños a los equipos y demás problemas a la planta de tratamiento.

#### **2.3.2.2. Remoción de Arena**

También conocida como escaneo o maceración, se emplea un canal de arena el cual es controlado de manera cuidadosa con respecto a la velocidad, permitiendo así que las arenas y piedras tomen partículas.

#### **2.3.2.3. Investigación y Maceración**

Con el objetivo de eliminar el material flotante, materia grande y hasta partículas pequeñas, se emplean pantallas rotatorias por las cuales se conduce el líquido libre de abrasivos. Los residuos obtenidos son recolectados y se disponen a ser devueltos a la planta de tratamiento o en su defecto pueden ser enviados al exterior de la planta.

#### **2.3.2.4. Sedimentación**

Esta fase se lleva a cabo en tanques, donde se remueven entre un 60% y 65% de los sólidos sedimentables y entre un 30% hasta un 35% los sólidos suspendidos en las aguas

residuales, se considera este como un proceso de tipo floculante, en el cual los lodos se encuentran conformados por partículas orgánicas.

### **2.3.3. Etapa secundaria**

Esta etapa se puede considerar como un proceso biológico natural en el cual los microorganismos presentes en el agua residual participan y desarrollan un reactor o también denominado cuba de aireación. En esta etapa la remoción de materia orgánica biodegradable y sólidos suspendidos. También la desinfección es típicamente incluida en la definición del tratamiento secundario convencional.

La floculación es una parte importante en esta etapa y se caracteriza por los procesos biológicos, aerobios, anaerobios y fisicoquímicos que son parte importante en el proceso de depuración del agua residual, estos se encargan de reducir la mayor parte de la demanda biológica de oxígeno y así mismo se encargan de remover lo que son cantidades adicionales de sólidos sedimentables, estos procesos nombrados se pueden desarrollar durante las siguientes fases:

#### **2.3.3.1. Desbaste**

En esta fase se retienen principalmente sólidos gruesos del agua a tratar a través de una rejilla o un tamiz, con el fin de reducir la carga contaminante y garantizar así mismo la preservación de los equipos.

#### **2.3.3.2. Fangos Activados**

En esta fase se pone en contacto el agua a tratar con flóculos biológicos absorbiendo así la materia orgánica, que es degradada por las bacterias presentes, con el fin de mantener una determinada concentración de organismos aerobios.

### **2.3.3.3. Camas Filtrantes**

En esta fase las aguas residuales son rociadas en la superficie de una profunda cama compuesta por carbón y piedra caliza, también fabricada especialmente de medios plásticos, se debe contar con altas superficies para soportar las biopelículas que se forman.

### **2.3.3.4. Placas Rotativas y Espirales**

Estas placas rotativas o espirales de revolución lenta, se emplean para el sumergimiento parcial en las aguas, creando así un flóculo biótico que proporciona el substrato que se requiere.

### **2.3.3.5. Reactor Biológico de Cama Móvil**

En esta fase el reactor asume la adición de medios inertes en vasijas de fangos activados existentes con el objetivo de proveer sitios activos, y reunir la biomasa, manteniendo así una alta densidad de la población de biomasa e incrementando la eficiencia del sistema.

### **2.3.3.6. Filtros Aireados Biológicos**

Estos filtros combinan la filtración con una reducción biológica de carbono, nitrificación o desnitrificación, adicionando un reactor lleno de medios de un filtro. Todo esto con el fin de soportar la biomasa activa que se une a él y a los sólidos que se encuentran suspendidos en el filtro.

### **2.3.3.7. Reactores Biológicos de Membranas**

Sistema que se compone de 2 partes integradas las cuales forman una barrera de membrana semipermeable o en conjunto con un proceso de fangos, este reactor es responsable de la depuración biológica y de la separación física de la biomasa.

#### **2.3.3.8. Sedimentación Secundaria**

Esta sedimentación se define como el paso final de la etapa secundaria en la cual el proceso de tratamiento ya no cuenta con flóculos biológicos los cuales fueron retirados, produciendo así agua tratada con bajos índices de materia orgánica sólida y suspendida.

#### **2.3.4. Etapa Terciaria**

Esta es la etapa final en la cual se practican procesos para mejorar la calidad del agua, teniendo en cuenta los estándares requeridos para que previamente sean vertidas estas aguas tratadas a los cuerpos hídricos. En esta etapa se puede contar con las siguientes fases:

##### **2.3.4.1. Filtración**

En este caso se habla de filtración de arena, ya que esta retiene gran parte de los residuos de la materia orgánica suspendida y estos se retienen gracias a la actuación del carbón que se encuentra en la filtración.

##### **2.3.4.2. Lagunaje**

Considerado como el tratamiento de lagunas se proporciona una mejora biológica adicional gracias al almacenaje en charcos y lagunas artificiales, en este caso se procura imitar los procesos de autodepuración natural que realiza un río o un lago.

##### **2.3.4.3. Humedales Artificiales**

En esta fase se emplean métodos similares a las camas o cañas, las cuales proporcionan un alto grado de materia biológica aerobia; Este método se puede emplear en los lugares en los que no se pueda desarrollar el tratamiento secundario como por ejemplo las poblaciones pequeñas.

#### **2.3.4.4. Remoción de Nutrientes**

Como es sabido, las aguas residuales contienen altos índices nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo, estos nutrientes pueden ser nocivos o tóxicos para la salud de las especies y fauna marina presente. Es por ésto que estos nutrientes deben ser retirados a través de la oxidación biológica en la cual el nitrato se convierte en nitrógeno gaseoso y se envía a la atmósfera.

#### **2.3.4.5. Desinfección**

Esta última fase del tratamiento terciario tiene como propósito reducir sustancialmente el número de organismos vivos, los cuales serán descargados previamente a su cauce natural. Es importante tener en cuenta que la efectividad de este proceso dependerá de la calidad de agua que fue tratada, ya que el tipo de desinfección empleada, la dosis de desinfectante y otras variables afectan este proceso.

### **2.4. Digestión Anaerobia**

Este proceso se considera como un proceso complejo en el cual se requiere de condiciones anaeróbicas controladas, las cuales van de mano con la actividad microbiológica, con el objetivo de transformar la materia orgánica en biogás el cual tiene como principal componente el metano ( $\text{CH}_4$ ). La digestión anaeróbica proporciona una gran cantidad de beneficios a los cuerpos hídricos efluentes y al mismo tiempo ofrece la oportunidad de generar energía no contaminante.

La producción de biogás es uno de los recursos más importantes que se recuperan de este proceso de tratamiento, dicho biogás contiene hasta un 70% de gas metano, el cual puede emplearse para alimentar generadores eléctricos con el fin de reducir las facturas de



energía y reemplazar los combustibles sólidos generalmente utilizados para cocinar o como medio de calentamiento; Tales combustibles pueden ser el carbón o la madera los cuales afectan de manera negativa el medio ambiente por la contaminación del aire.

#### ***2.4.1. Campos de Aplicación***

De acuerdo a las materias primas empleadas y el lugar en el cual se lleve a cabo el proceso de digestión anaerobia, se pueden encontrar diferentes alternativas y tecnologías para el aprovechamiento de los productos generados. Durante la aplicación de este proceso se pueden encontrar campos de aplicación, en las aguas residuales urbanas, zonas rurales y en los rellenos sanitarios. A continuación se describen cada uno de estos campos de aplicación:

##### **2.4.1.1. Aguas Residuales Urbanas**

Esta digestión anaerobia combinada ya sea con tratamientos aerobios o sin ellos, es una técnica empleada desde hace mucho tiempo, sin embargo para la ejecución de este tipo de procesos se encuentran algunos problemas técnicos, económicos y sociales, los cuales limitan su desarrollo. Entre estos problemas, se encuentran los asociados a los costos de limpieza y refinado del biogás obtenido con el fin de remover las impurezas y garantizar durante la ejecución un contenido mínimo del gas metano.

##### **2.4.1.2. Residuos Rurales**

Los digestores se pueden calificar como de pequeña y gran escala, de acuerdo a su tamaño y su capacidad de producción de biogás. Los digestores anaerobios de pequeña escala se caracterizan por empleados en las viviendas generalmente rurales con el fin de tratar los residuos agrícolas y las aguas residuales de la vivienda. Los digestores a gran escala se pueden emplear de manera comunitaria o de manera industrial, los digestores

comunitarios consisten en la asociación de pequeños productores para tratar sus residuos, mientras que los digestores industriales están principalmente orientados a la producción de energía.

#### **2.4.1.3. Rellenos Sanitarios**

Estos rellenos se caracterizan por ser el medio más económico cuando de disposición de sólidos se habla, sin embargo se debe tener en cuenta que si estos no son manejados apropiadamente podrían afectar gravemente el medio ambiente, esto debido a que podrían liberar diversos tóxicos que contaminan el suelo, el agua y producen malos olores.

#### **2.4.2. Etapas de la Digestión Anaerobia**

Durante la digestión anaerobia se distinguen cuatro etapas las cuales serán descritas una por una a continuación previamente a los conceptos se encontrará la Gráfica 4. Pasos de la Digestión Anaerobia, la cual explica las diferentes rutas que puede seguir la digestión anaerobia.

##### **2.4.2.1. Hidrólisis**

En la primera etapa denominada hidrólisis se evidencia como se descomponen las cadenas de materia orgánica presentes, La materia orgánica se logra descomponer gracias a la acción de las bacterias hidrolíticas las cuales se encargan hidrolizar las moléculas disueltas en el agua, estas moléculas pueden ser grasas, proteínas o, carbohidratos las cuales se transforman previamente en polímeros simples.

##### **2.4.2.2. Acidogénesis**

En la fase denominada acidogénesis los productos intermedios tales como el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono se convierten generando un grupo de bacterias, las hidrolíticas-acidogenicas y las acetogénicas, las cuales se encargan de

hidrolizar y fermentar las cadenas complejas de la materia orgánica sobre los ácidos orgánicos simples. Estas bacterias anaerobias facultativas pueden consumir oxígeno molecular con el fin de complementar su metabolismo; Estas bacterias no crecen en presencia del oxígeno y muchas veces la más mínima cantidad de oxígeno puede resultar tóxico para ellas.

#### **2.4.2.3. Acetogénesis**

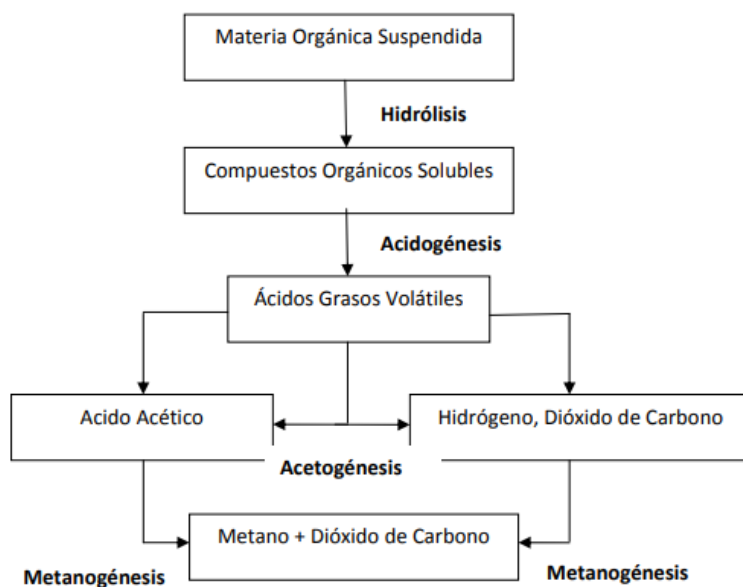
En esta etapa las bacterias acetogénicas se encargan de la degradación de los ácidos orgánicos en los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos; Éstos se degradan generando así el ácido acético y liberando productos como el hidrógeno y el dióxido de carbono, los cuales son elementos fundamentales y precursores de las bacterias metanogénicas.

#### **2.4.2.4. Metanogénesis**

Esta última etapa de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas, se encarga de aceptar electrones tales como el oxígeno, hierro, sulfato, nitrato y manganeso, estos electrones se reducen de tal manera que se acumula hidrógeno ( $H_2$ ) y dióxido de carbono. En esta etapa también se acumulan compuestos orgánicos ligeros producto de la fermentación. Es importante tener en cuenta que durante las fases avanzadas de la descomposición orgánica, los aceptores de electrones quedan reducidos en su gran mayoría exceptuando el dióxido de carbono.

En la Gráfica 4. Pasos de la Digestión Anaerobiase encuentran detalladamente las etapas y las rutas que puede tomar la digestión anaerobia.

Gráfica 4. Pasos de la Digestión Anaerobia



Tomado y Adaptado de (Appels et al., 2008)

En la Gráfica 4. Pasos de la Digestión Anaerobia, se evidencia como la primera etapa denominada hidrólisis se encarga de degradar o descomponer el material orgánico considerado complejo, así mismo descompone los materiales compuestos de alto peso molecular tales como lípidos, polisacáridos, proteínas, entre otros. Esta degradación transforma dichos compuestos orgánicos complejos en sustancias orgánicas solubles tales como azúcares, aminoácidos entre otros, gracias a la acción de las enzimas segregadas por bacterias fermentativas, de tal manera que los compuestos obtenidos puedan ser asimilados por una mayor cantidad de microorganismos presentes en el medio. Durante la fase de hidrólisis, una vez formados los compuestos estos siguen siendo transformados en otros aún más simples, debido a la acción de diferentes tipos de bacterias presentes; La segunda etapa, la acidogénesis se conoce precisamente porque los compuestos solubles de la primera etapa se fermentan los ácidos volátiles tales como el ácido acético,

propiónico y butírico. En la etapa de acidogénesis también se forma el amoníaco, el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno y demás subproductos. La tercera etapa denominada acetogénesis es donde los compuestos como ácidos y alcoholes formados en la etapa anterior son transformados en compuestos más simples, principalmente el ácido acético, el dióxido de carbono y el hidrógeno. Se considera que el hidrógeno generado en esta etapa causa un descenso del pH en un medio considerado acuoso. La etapa final se conoce como metanogénesis en la cual se produce el metano por acción de dos grupos de bacterias; el primer grupo de bacterias se encarga de descomponer el ácido acético en el metano y el dióxido de carbono, mientras el otro grupo de bacterias se encarga de la combinación de hidrógeno con el fin de producir metano.

#### ***2.4.3. Variables que Afectan la Digestión Anaerobia***

Con el fin de garantizar la correcta velocidad de reacción, una mayor conversión y evitar inhibición, se fomentan ciertos parámetros los cuales deben controlarse durante el proceso de digestión. Algunos de los parámetros establecidos se definen a continuación.

##### **2.4.3.1. Materias Primas**

Los microorganismos que realizan el proceso de digestión anaerobia tienen necesidades de acuerdo a los micronutrientes, macronutrientes y vitaminas por lo tanto la producción de metano dependerá de la calidad y proporción de los carbohidratos, lípidos y proteínas que se encuentren en el sustrato. Es importante tener en cuenta que el principal elemento químico que deben contener las materias primas es el carbono, debido a que es necesario para la producción de metano y nitrógeno. El azufre, el fósforo y otros oligoelementos también son elementales para la correcta digestión anaerobia.

El proceso de digestión anaerobia tiene la ventaja de poder procesar una amplia variedad de materias primas orgánicas tales como las aguas residuales, las cuales contienen excretas humanas y animales, o los residuos de origen vegetal tales como maleza o forrajes, residuos de cosechas o cultivos, todos estas son denominadas plantas macrófitas. Con el fin de garantizar la correcta digestión anaeróbica es necesario contar con sales minerales, las cuales se encuentran en estiércol y lodos cloacales; Se debe tener en cuenta que los materiales con altos índices de lignina de deben evitar, como por ejemplo la madera.

La materia prima que puede ser dispuesta para digestión anaerobia puede clasificarse de la siguiente manera como se encuentra en la tabla 1.

*Tabla 1. Clasificación de las Materias Primas Empleadas para la Digestión Anaerobia*

Ejemplo	Apariencia	Características físicas	Tratamiento
Heces animales	Lodo altamente Viscoso	DQO (g/l)100-150 ST: 5%-10%	Se emplean digestores de mezcla completa con operación continua
Estiércol sólido	Sólido	Sólidos totales (ST): Mayor a 20%	Se puede degradar en digestores por lotes
Residuos de cosecha		Fracción Orgánica: 40%-70%	

Estiércol y levante diluido con aguas de lavado	Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos	DQO (g/l) 3-17	Debe tratarse con digestores de alta eficiencia
Aguas negras residuales	Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos	DQO (g/l) 18-4500	Por su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios para mayor eficiencia

*Tomado y adaptado de (Ministerio de Energía de Chile, 2011)*

#### **2.4.3.2. Oxígeno**

Pequeñas cantidades de oxígeno causan inmediatamente la muerte de la mayoría de los microorganismos metanogénicos, es por eso que la digestión anaeróbica solo se lleva a cabo sin la presencia de oxígeno. A través de la práctica de laboratorios se ha evidenciado que es imposible garantizar la hermeticidad y de tal manera que siempre hay algo de oxígeno que ingresa al digestor, sin embargo también se pudo evidenciar que algunos microorganismos sobreviven debido a la coexistencia de bacterias que consumen la mayor parte del oxígeno.

#### **2.4.3.3. Alcalinidad y pH**

Se considera que cada grupo de microorganismo contiene un pH óptimo con el cual se favorece la velocidad y la conversión de la reacción. Las bacterias metanogénicas son sensibles al cambio de pH y el valor óptimo asignado está entre 6,5 y 7,2. Los microorganismos acidogénicos se consideran un poco menos sensibles al pH y se

encuentran en el intervalo entre 4,0 y 8,5. Un índice de pH bajo favorece la formación de ácidos como el acético y el butírico, mientras que un pH alto favorece a la producción de ácido propiónico.

#### **2.4.3.4. Temperatura**

La temperatura puede afectar la velocidad de crecimiento y el metabolismo de los microorganismos presentes, así mismo puede afectar las propiedades físicas de ellos tales como su solubilidad, su viscosidad o presión parcial. Un aumento en la temperatura podría significar un aumento de solubilidad de los compuestos orgánicos que se encuentran en la fase acuosa, también podría causar un incremento en la velocidad de reacción química y biológica, provocando la muerte de los organismos patógenos. La temperatura afecta los microorganismos encargados de la fase acetogénica y metanogénica produciendo un incremento de amoníaco libre el cual inhibe la acción de los microorganismos.

Se considera un intervalo de temperatura óptima en la cual los microorganismos descomponen el sustrato para producir el metano, si la temperatura no se encuentra en este intervalo los microorganismos pueden inhibirse llegando incluso a sufrir un daño irreparable. De acuerdo con el intervalo óptimo de temperatura en el cual las especies de microorganismos participan en la digestión, se pueden clasificar en los grupos planteados en la tabla 2.

*Tabla 2. Caracterización de Microorganismos de Acuerdo con la Temperatura*

GRUPO	INTERVALO DE TEMPERATURA	DESCRIPCIÓN
-------	--------------------------	-------------



Psicrofilicos	>25°C	Se obtiene una mínima velocidad de degradación y producción de metano. Funcionan la mayoría de los digestores anaeróbicos por sus condiciones de producción de metano.
Mesofilicos	37°C a 42°C	Se elevan las condiciones de velocidad de descomposición del sustrato y se garantiza una mayor higienización porque se eliminan gérmenes dañinos.
Termofilicos	50°C a 60°C	

*Fuente: Propia*

Se debe considerar que mantener estas condiciones de operación requiere una mayor adición de energía al sistema, un oportuno control de temperatura y un suministro constante de sustrato.

#### **2.4.3.5. Tiempo de Retención Hidráulico y de Sólidos**

Tiempo de residencia de los sólidos y de la fase acuosa en el reactor, cuando se evidencia una disminución de este tiempo de retención se disminuye el avance de la reacción.

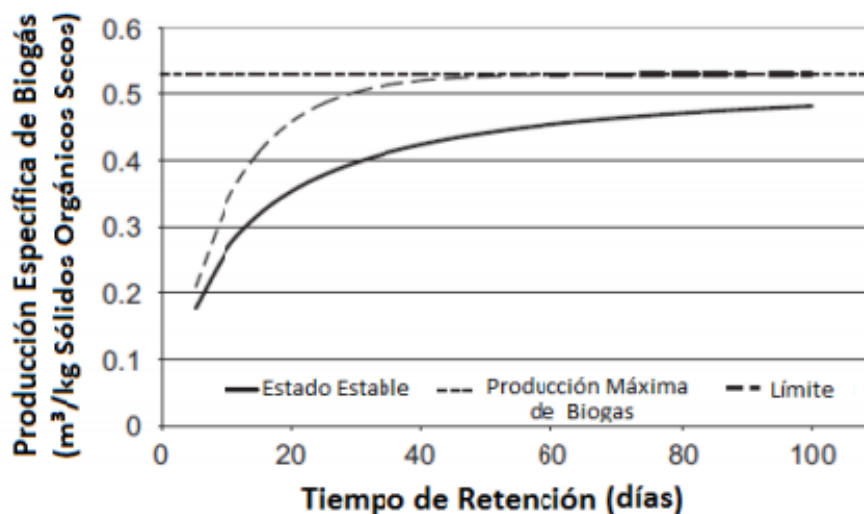
Cuando hay salida de sólidos en el reactor se debe retirar una parte de la población de microorganismos de tal manera que el crecimiento poblacional de microorganismos sea

al menos o igual a los que se retiran, esto con el objetivo de garantizar una operación continua y evitar fallos en el proceso.

De acuerdo con la Gráfica 5. Variación de la Producción Específica de Biogás a Medida que Cambia el Tiempo de Retención de Sólidos, mediante una escala de laboratorio se encontraron los resultados presentados, de acuerdo con los autores se obtiene la siguiente información:

- Los tiempos de retención menores a 5 días son insuficientes para alcanzar el grado significativo de digestión.
- Entre 5 y 8 días hay un rompimiento incompleto de las macromoléculas, en especial cuando se habla de lípidos.
- Después de 8 a 10 días se evidencia una digestión indicada, en este periodo de tiempo se comienzan a descomponerse los lípidos.
- Al décimo día se evidencia un incremento de la velocidad de reacción y comienza a producirse un proceso considerado estable. (Appels et al., 2008).

Gráfica 5. Variación de la Producción Específica de Biogás a Medida que Cambia el Tiempo de Retención de Sólidos



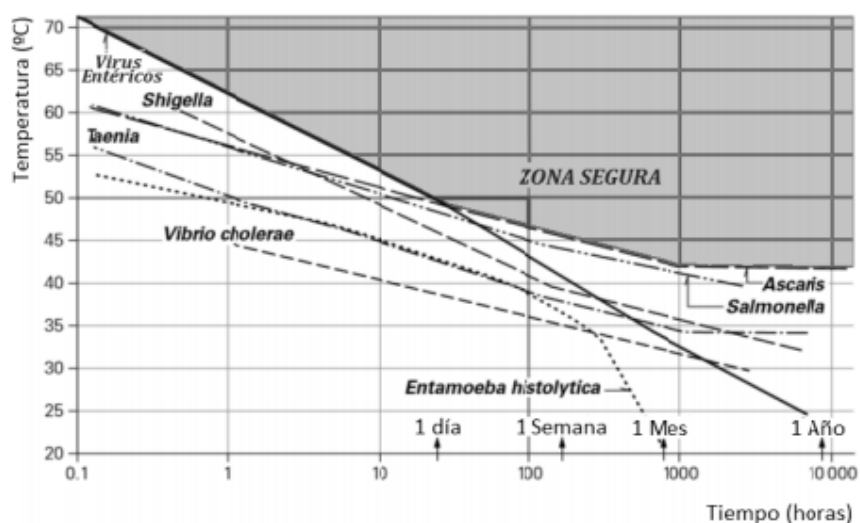
Tomado y adaptado de (Appels et al., 2008)

La permanencia de la materia prima al interior del digester debe ser tal que se pueda garantizar la mayor digestión de la materia prima, sin ser demasiado largo, ya que esto elevará el volumen necesario del digester y los costos del proceso. Se debe considerar la temperatura en el digester porque de acuerdo a ésta, se determinará la descomposición de la materia prima (Martí, 2008).

#### 2.4.3.6. Higienización

El nivel de higienización depende la temperatura y del tiempo de retención hidráulico; Se evidencia que a mayor temperatura de operación mejor será la inactivación de los organismos patógenos dentro del proceso y menor será el tiempo de retención de sólidos en el digester.

Gráfica 6. Relación entre Temperatura y Tiempo para la Activación de Patógenos



Tomado y Adaptado de (Vogeli et al., 2014)

En la Gráfica 6. Relación entre Temperatura y Tiempo para la Activación de Patógenos se aprecia un proceso llevado a 50°C en el cual se requiere de una semana para la inactivación de todos los patógenos. En condiciones termofílicas, los digestores alcanzan un nivel aceptable de desinfección después de dos semanas, en condiciones mesofílicas se requiere de un mayor tiempo, puesto que la mayoría de las plantas de tratamiento trabajan en condiciones mesofílicas o psicofílicas y la higienización es limitada. (Vogeli, Riu, Gallardo, Diener, & Zurbrugg 2014).

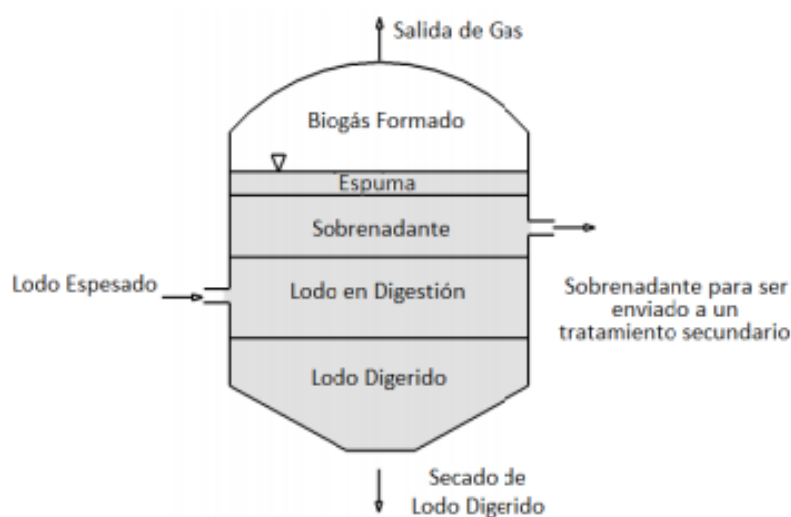
#### 2.4.4. Digestores Anaerobios

De acuerdo con la velocidad en la cual se lleve a cabo la digestión, se pueden clasificar los digestores en dos tipos, ya sean digestores de baja o alta tasa.

##### 2.4.4.1. Digestores de Baja Tasa

En este tipo de digestores se desarrolla la digestión a través de una sola etapa, por esto es considerado como el digestor más simple y el más empleado, sin embargo la digestión se lleva a cabo en un largo periodo de tiempo entre 30 hasta 60 días. Una vez en el reactor los lodos crudos no son calentados ni mezclados, estos ingresan al digestor en la zona de mayor actividad de digestión y comienza a formarse el biogás. En la Gráfica 7. Esquema Simplificado de Reactores de Baja Tasa se evidencia como el gas formado asciende proporcionando una pequeña porción de mezclado generando una estratificación en la fase líquida. La espuma formada y el líquido sobrenadante son retirados y tratados posteriormente. Al fondo del digestor se ubican los sólidos digeridos, estos son retirados de manera periódica.

*Gráfica 7. Esquema Simplificado de Reactores de Baja Tasa*



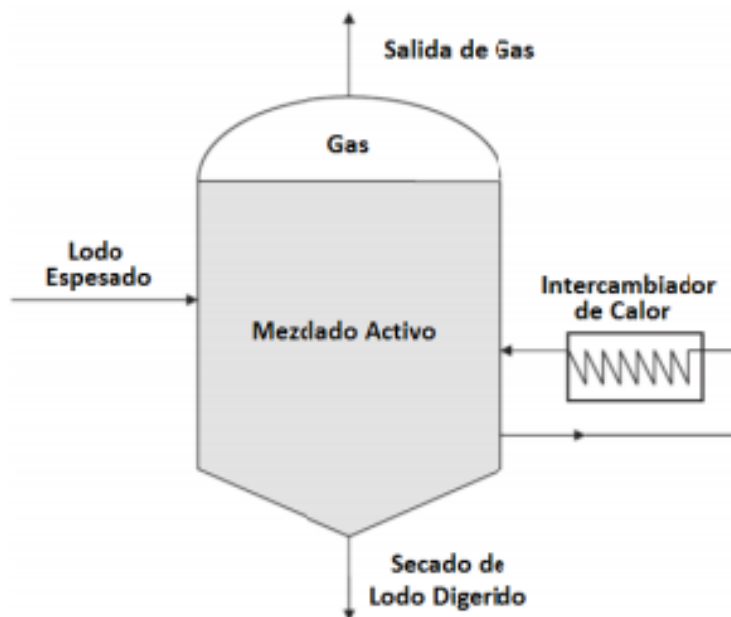
*Tomado y Adaptado de (Chernicharo., 2007)*

#### **2.4.4.2. Digestores de Alta Tasa**

Al contrario de los digestores de baja tasa, en estos digestores el sustrato es calentado y mezclado de tal manera que los crudos son espesados y la alimentación del reactor es

uniforme tal como se observa en la Gráfica 8. Esquema Simplificado de Reactores de Alta Tasa. Los lodos son mezclados empleando agitadores tales como líquidos o gases, mediante intercambiadores de calor se altera la temperatura en el exterior e interior del equipo; Los lodos pueden alimentarse de manera continua o a intervalos regulares que garanticen condiciones estables en el digestor; Se deben garantizar condiciones estables en el digestor con el fin de evitar un choque que pueda causar problemas a la actividad de bacterias metanogénicas (Apples et al., 2008). Estos reactores se caracterizan por su poco volumen, su estabilidad y la eficiencia del proceso.

*Gráfica 8. Esquema Simplificado de Reactores de Alta Tasa*



*Tomado y Adaptado de (Chernicharo., 2007)*

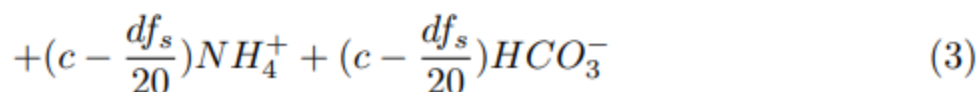
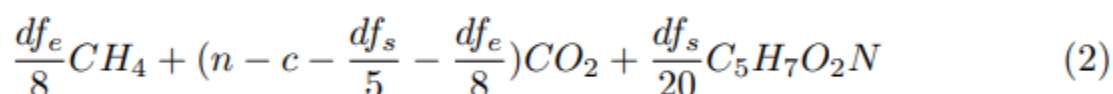
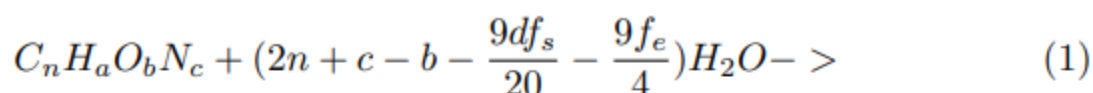
## 2.5. Métodos de Cálculo

La teoría para predecir la producción de biogás basada en la composición y degradabilidad del sustrato está bien desarrollada, sin embargo los cálculos son tediosos y

rara vez se realizan. Mediante la implementación del paquete “biogás” se incluye la función única predBg() para realizar estas predicciones. A continuación se presenta como se realizaron los cálculos:

La estequiometría de una reacción de biometanización completa se determina basándose en las siguientes ecuaciones:

*Gráfica 9. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo*



*Tomado y Adaptado de (Sasha., 2019)*

Aquí,  $f_s$  y  $f_e$  se definen como la fracción de electrones del sustrato que van a la síntesis celular y a la producción de energía. La fórmula  $C_5 H_7 O_2 N$  es una fórmula empírica para la biomasa celular y  $d = 4n + a - 2b - 3c$ . Además de proporcionar estimaciones de la producción de  $CH_4$ , este enfoque permite que predBg() devuelva la producción de  $CO_2$ , el consumo o la producción de amoníaco y la producción de biomasa celular. El  $CH_4$  previsto siempre se expresa en mL ( $cm^3$ ) en condiciones estándar de 101,325 kPa (1,0 atm) y  $0^\circ C$  (273,15 K).

Para que estas estimaciones se acerquen a los valores observados, es necesario incluir y establecer  $f_s$  con precisión. ¿Cómo se debe seleccionar un valor de  $f_s$ ? Basado en [4],  $f_s$  está relacionado con el valor intrínseco  $f_s^0$ , el tiempo de retención de sólidos  $\theta_x$ , la tasa de descomposición de la biomasa microbiana  $b$  ( $d^{-1}$ ) y la degradabilidad de la biomasa microbiana  $f_{bd}$  (fracción).

*Gráfica 10. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo*

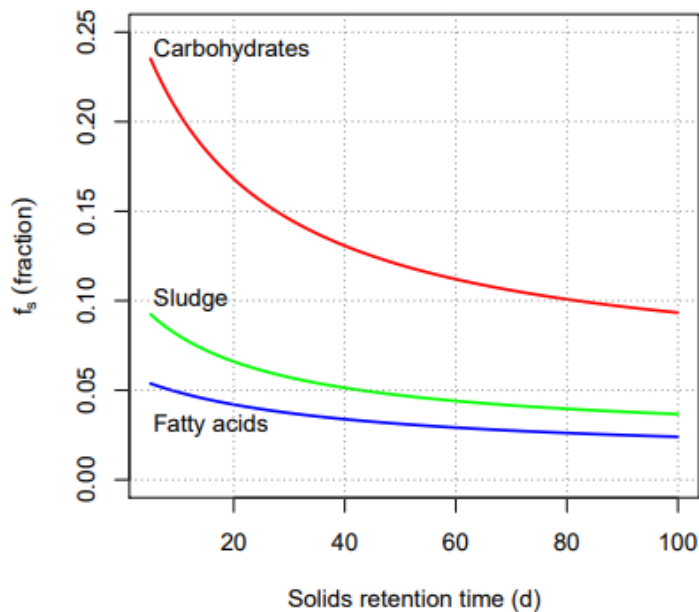
$$f_s = f_s^0 \left( \frac{1 + (1 - f_{bd}) b \theta_x}{1 + b \theta_x} \right) \quad (4)$$

*Tomado y Adaptado de (Sasha., 2019)*

Los valores de  $f_s^0$  se dan en [4]. Para metanógenos fermentadores de acetato,  $f_s^0 = 0.05$ , y para metanógenos oxidantes de hidrógeno,  $f_s^0 = 0.08$ . Pero la mayoría de los cálculos deben basarse en un valor general para toda la comunidad microbiana, que también incluye bacterias fermentativas. La tabla 13.2 en [4] da estimaciones para  $f_s^0$  y  $b$  para varios tipos de desechos:  $f_s^0$  varía de 0.06 para lípidos hasta 0.28 para carbohidratos, y  $b$  varía de  $0.02 \text{ d}^{-1}$  para proteínas hasta 0.05 para la mayoría de los otros tipos de sustratos. Los valores calculados de  $f_s$  se muestran para tres tipos de sustratos a continuación, asumiendo  $f_{bd} = 0.8$  [4].



Gráfica 11. Sustratos en Retención a través del Tiempo

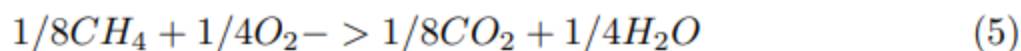


Tomado y Adaptado de (Sasha., 2019)

Para determinar "BMP teórico",  $f_s$  debe establecerse como cero ( $f_e = 1$ ), que es el valor predeterminado. Los sustratos complejos no se degradan completamente durante la digestión anaeróbica y la cantidad de la fracción "degradable" es más precisa, se puede especificar con el argumento  $f_d$ . Para sustratos complejos, la degradabilidad de diferentes componentes dentro de un solo sustrato será diferente, por ejemplo la celulosa es mucho más degradable que la lignina pero el enfoque actual utilizado para  $\text{predBg}()$  asume que todos los componentes tienen la misma degradabilidad  $f_d$ .

La función  $\text{predBg}()$  también puede calcular la producción de  $\text{CH}_4$  a partir de DQO. En este caso, el volumen de  $\text{CH}_4$  se calcula basándose en la oxidación de  $\text{CH}_4$  con  $\text{O}_2$ .

*Gráfica 12. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo*



*Tomado y Adaptado de (Sasha., 2019)*

Lo que da una relación de CH<sub>4</sub> a O<sub>2</sub> de 1/8: 1/4 = 1: 2. Con base en la conservación de DQO, la producción potencial de CH<sub>4</sub> de un sustrato con DQO c es por lo tanto:

*Gráfica 13. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo*

$$V_{CH_4} = v_{CH_4}c/(M_{O_2}/2) \quad (6)$$

*Tomado y Adaptado de (Sasha., 2019)*

Donde  $v_{CH_4}$  = volumen molar de CH<sub>4</sub> (22361 mL g<sup>-1</sup>, definido a 1 atm y 0 ° C [2] y  $M_{O_2}$  es la masa molar de O<sub>2</sub> (32.0 g mol<sup>-1</sup>). Si  $f_e$  y  $f_d$  están disponibles, reducen la fracción de DQO convertida.

*Gráfica 14. Ecuaciones Estequiométricas Método de Cálculo*

$$V_{CH_4} = f_d f_e v_{CH_4}c/(M_{O_2}/2) \quad (7)$$

*Tomado y Adaptado de (Sasha., 2019)*

El método utilizado para calcular el reparto de CO<sub>2</sub> se basa en la especiación de equilibrio como se describe en [1] y debe ser preciso para reactores continuos con funcionamiento

estable como mínimo. Las predicciones para los reactores discontinuos son más difíciles y los resultados probablemente serán menos precisos.

### **3. Proyección de los Sistemas Generadores de Biogás**

A través del desarrollo de los sistemas de generación de biogás se deben tener en cuenta los parámetros de continuidad con respecto al suministro de gas, la calidad, uso, operación y mantenimiento del sistema. Cuando se habla de calidad y continuidad, inmediatamente se habla de la cantidad y manejo de la biomasa que se empleará para el funcionamiento del sistema, ya que si no se cuenta con una cantidad suficiente de biomasa seguramente el sistema limitará la eficiencia de generación del biogás.

Con el fin de garantizar un uso potencial del biogás producido y optimizar el aprovechamiento del sistema, se deben establecer las necesidades de energía desde la planeación del sistema. El mantenimiento y aspectos relacionados con el funcionamiento tales como el tiempo de inspección y monitoreo deben tenerse en cuenta para el funcionamiento exitoso del sistema.

Cuando se desarrollan sistemas de generadores de biogás, se debe tener en cuenta en la planeación y proyección los siguientes aspectos:

#### **3.1. Colección de Biomasa**

Lo primero que se debe considerar al momento de la instalación y planeación de un sistema generador de biogás es la determinación de la cantidad de biomasa necesaria y su frecuencia para el correcto funcionamiento, manteniendo así de manera continua la operación del biodigestor. De acuerdo con la disponibilidad de la biomasa, esta debe ser colectada y

ubicada en la parte principal del sistema en la fase de alimentación para que previamente sea diluida y concentrada para adicionarle así los nutrientes y se disponga a conducirla al interior del biodigestor.

Para la colección de esta biomasa, el sistema predetermina un inventario de la cantidad de materia orgánica que ingresa, caracterizando la biodegradabilidad, el estado físico, la frecuencia en la cual se recolecta la biomasa, el transporte al biodigestor y de acuerdo a la correcta caracterización de estos, se garantiza el exitoso funcionamiento del sistema. Cuando se trata de estiércol como principal flujo de biomasa, se debe tener en cuenta que el contenido de los sólidos limita el uso y manejo de este mismo. En la Tabla 3. Clasificación de la Materia Prima se evidencia la clasificación de las diferentes formas en que se puede encontrar el estiércol.

*Tabla 3. Clasificación de la Materia Prima*

CLASIFICACIÓN	CARACTERISTICAS
Estiércol crudo	Contenido de sólidos entre el 8 al 25% dependiendo del tipo de animal; se diluye o espesa de acuerdo con las necesidades.
Estiércol Sólido	Contenido de sólido mayor al 20%; No es deseable para el sistema cuando este envejezca o se seque.
Estiércol Semisólido	Contenido de sólidos entre el 10 y el 20%; Este no requiere de agua y solo puede ser utilizado si tiene menos de una semana.

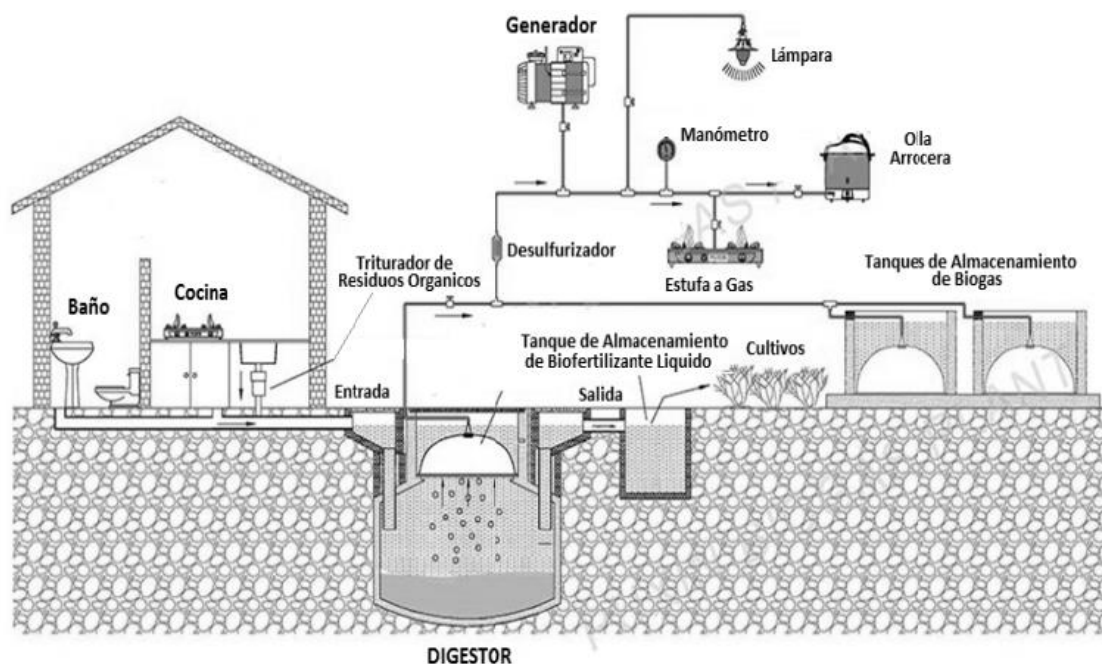
Estiércol líquido	Contenido de sólidos menos al 3%; Lavado con agua; Producción de biogás en clima cálido; Este se asocia con la producción de cerdos.
Estiércol Slurry	Contenido de sólidos entre el 3-10%; Este es mezclado con agua y bombeado al sistema para previamente ser almacenado en tanques.

*Tomado y Adaptado de (Ministerio de Energía de Chile., 2011)*

### **3.2. Tipos de Biodigestores**

A lo largo de los años se han venido desarrollando diferentes soluciones para que cada vez sea más fácil la implementación de los biodigestores en las diferentes zonas del mundo. En el caso del sector rural o zonas de bajos o medianos recursos comúnmente se implementan los digestores de domo fijo, tanque flotante o tubular. Cualquiera de estos digestores trabajan de manera continua y en condiciones mesofílicas, considerándose así como la alternativa más económica por su fácil operación y por sus materiales básicos. Existe otro tipo de digestor, el digestor de tipo contenedor el cual es operado como un sistema de digestión seca y operación discontinua (Vögeli et al., 2014). En la Gráfica 15. Esquema de un Digestor Anaerobio y su Relación con el Medio Rural se evidencia un esquema general del manejo de aguas residuales y residuos orgánicos para una vivienda rural, se evidencia también como los insumos ingresan al digestor anaerobio, produciendo el biogás y sus aplicaciones.

Gráfica 15. Esquema de un Digestor Anaerobio y su Relación con el Medio Rural

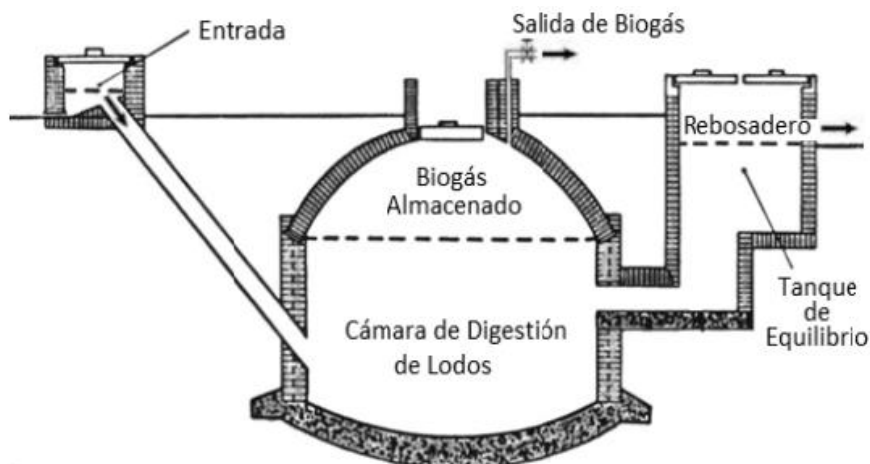


Tomado y Adaptado del sitio web <http://en.puxintech.com/PXSM10M3>

### 3.2.1. Digestor de Domo Fijo

Este tipo de digestor se caracteriza por la forma de domo que toma el equipo tal como se muestra en la Gráfica 16. Esquema General de un Digestor de Domo Fijo. Estos equipos están contruidos con concreto reforzado y mampostería, cuentan con un volumen de cámara fijo en el cual se lleva a cabo la digestión y almacenamiento del biogás producido. Este tipo de digestor no es el indicado cuando se requiere una producción de biogás en gran magnitud y poco tiempo, puesto que solo se logran producir entre 0.15 y 0.2 volúmenes de gas por volumen digerido por día. Sin embargo este equipo es un muy buen productor de bioabono, ya que se requiere entre uno o dos meses para su retención (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

Gráfica 16. Esquema General de un Digestor de Domo Fijo



Tomado y Adaptado del Sitio Web <http://biodigestoresyeapu.blogspot.com.co/>

Este tipo de digestor se alimenta de manera diaria con residuos que se encuentren disponibles como excrementos de animales y aguas residuales producidas in situ. Durante la digestión, la producción de biogás aumenta con el consecuente aumento de la presión al interior del reactor lo cual produce un empuje del material dirigido hacia el tanque de compensación. Una vez se abre la válvula de salida del gas la presión en el interior del equipo disminuye y una cantidad proporcional del contenido del tanque regresa a la cámara de digestión. Este tipo de digestores se construyen totalmente encerrados con el fin de proteger el proceso de digestión en bajas temperaturas; La capa del suelo que se encuentra encima del reactor ayuda a contrarrestar la presión interna del reactor la cual generalmente se encuentra entre 0.1 y 0.15 bar. La vida útil de este sistema se considera larga, ya que puede durar entre 15 a 20 años por su fácil operación y mantenimiento, sin embargo se evidencia que con el transcurso de los años la estructura empieza a grietarse y a generar poros que ocasionan pérdidas del gas producido (Vögeli et al., 2014). Con respecto al volumen de producción de biogás, estos

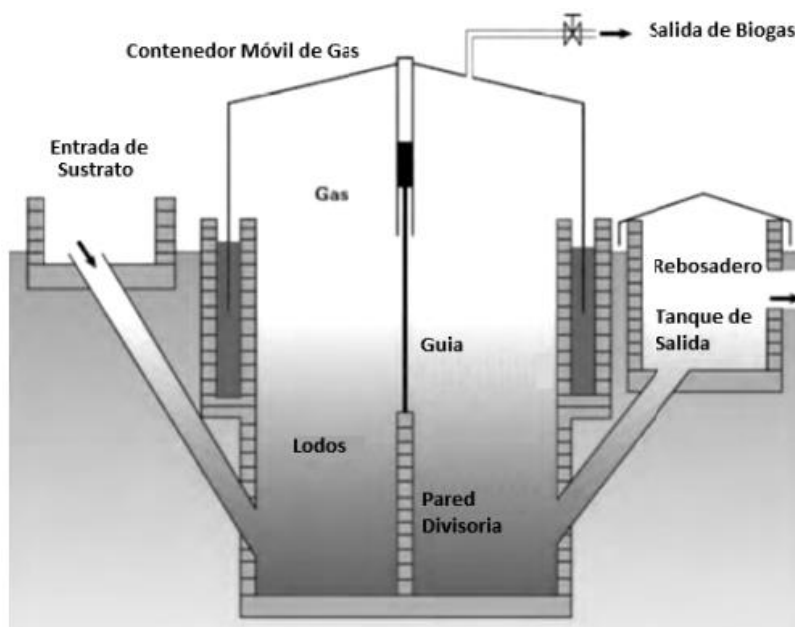
digestores normalmente producen entre 10 y 20 metros cúbicos de biogás, sin embargo se ha demostrado que algunos pueden llegar a tener volúmenes superiores a 50 metros cúbicos (Garfi, Marti-herrero, Garwood, & Ferrer 2016).

### ***3.2.2. Digestores de Tanque Flotante***

Este digestor consta de una cámara cilíndrica y un tanque móvil que sirve para el almacenamiento del biogás, esta cámara cilíndrica se asemeja a un pozo, se encuentra enterrada y está construida de ladrillos o concreto, todo esto herméticamente impermeabilizado. En la parte superior del sistema sobresale un tanque suspendido sobre un sello de agua y se utiliza para el almacenamiento del biogás. Este tanque generalmente es metálico y cuenta con una breve capa de pintura con el fin de prevenir la corrosión, es necesario un mantenimiento de manera periódica con el fin de garantizar su correcta operación. La vida útil de este sistema abarca entre los 3 a 5 años en climas húmedos y entre 8 y 12 años en climas secos (Vögeli et al., 2014). El tanque de almacenamiento también puede verse en otros materiales como el plástico reforzado con fibra de vidrio. En este tipo de digestores el tanque se eleva o desciende de acuerdo con la relación existente entre el gas producido y la demanda de él mismo, manteniendo así una presión baja y relativamente constante.



Gráfica 17. Esquema General de un Digestor de Tanque Flotante



Tomado y Adaptado de (Vögeli et al., 2014)

El contenedor del gas puede flotar directamente en el lodo que se fermenta o en una camisa de agua que reduce las pérdidas de biogás. Dicho contenedor de gas cuenta con unas guías internas que se encargan de evitar que dicho tanque se incline cuando asciende, además se encarga de proveer un medio para romper la espuma que se pueda formar en la interfase líquida y gaseosa. Al interior de la cámara cilíndrica se encuentra una pared con el fin de aumentar el tiempo de retención del material que se digiere. El contenedor varía en su diseño entre 1 a 50 metros cúbicos que presentan una buena eficiencia en la producción de gas, ya que se puede producir entre 0,5 y 1,0 volúmenes de biogás por volumen de digerido por día (ministerio de Energía de Chile, 2011).

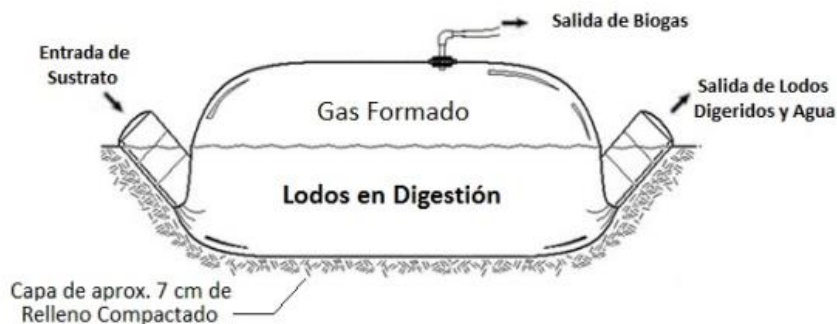
### 3.2.3. Digestores Horizontales

Este tipo de digestores se encuentran generalmente semienterrados a poca profundidad del suelo, se caracterizan por ser alargados y su sección transversal puede ser redonda, cuadrada o en “V”. El más común en América es el digestor tubular (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

#### 3.2.3.1. Digestor Tubular

Tal como se observa en la Gráfica 18. Esquema General de un Digestor Tubular y como su nombre lo indica, este digestor se caracteriza por su forma tubular. Este sistema llega a Colombia gracias a la investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV) que se desarrollaba en Colombia para los años 80. Estos digestores tienen volúmenes generalmente entre 6 y 10 metros cúbicos, aunque se han desarrollado otros de hasta 70 metros cúbicos en granjas de mediano tamaño y universidades (Garfi et al., 2016).

Gráfica 18. Esquema General de un Digestor Tubular



Tomado y Adaptado del Sitio Web <http://www.energizar.org.ar>

Estos digestores están contruidos con materiales poliméricos resistentes al clima, teniendo así la función de digestor y almacena el biogás producido. Gracias a la forma alargada del sistema no se evidencian cortocircuitos, sin embargo típicamente no cuentan con un medio de agitación. Este tipo de reactores se pueden construir a bajo costo sin embargo se debe considerar que el material plástico del cual están contruidos es susceptible a deteriorarse por efectos del medio ambiente. El aprovechamiento de este tipo de equipos va principalmente en los climas fríos, mediante su encerramiento en invernaderos de polietileno soportados sobre dos muros de contruidos a los lados de la trinchera que alberga el digestor. Estos digestores tienen un periodo de vida considerado corto, ya que se puede emplear durante 2 hasta 5 años (Vögeli et al., 2014).

### **3.3. Otros Tipos de Digestores**

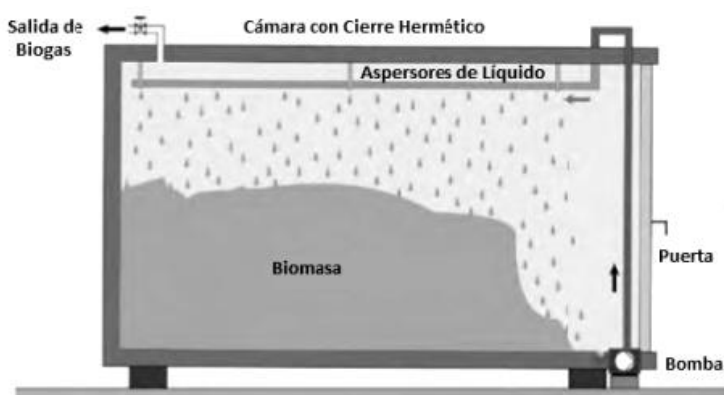
A través de los últimos años se han presentado varias modificaciones y nuevas propuestas en el desarrollo de digestores tales como los digestores de tipo contenedor y prefabricado, los cuales se describen a continuación.

#### ***3.3.1. Digestores de Tipo Contenedor***

A diferencia de los otros tipos de digestores que se vieron previamente, existen otros que trabajan con un contenido menor de agua y su operación se da por lotes o de manera discontinua. En este tipo de digestores todos los residuos orgánicos se encuentran en un contenedor que posteriormente se cierra herméticamente tal y como se muestra en la Gráfica 19. Esquema General de un Digestor de Tipo Contenedor. Al trabajar con un menor contenido de agua se le puede asignar el término de “digestión anaerobia seca” en el cual el contenido de sólidos es superior al 15%. Se debe tener en cuenta que el material

se alimenta en cada lote y se inocula con material dirigido proveniente del lote anterior, con el propósito de iniciar y acelerar la descomposición anaerobia. Cuando la puerta del contenedor se encuentra totalmente cerrada, el agua que contiene la materia orgánica fluye naturalmente hacia abajo a través de la fase sólida y se separa de manera natural por gravedad de la biomasa, es colectada en un tanque externo y luego bombeada y llevada hacia unos aspersores ubicados en la parte superior en donde se rocía nuevamente el agua a la biomasa, garantizando que todo se encuentre húmedo y permitiendo así una dispersión rápida de las bacterias por todo el material. Todo este proceso se repite de manera continua mientras dura la digestión, sin embargo unos días previos a que se finalice el proceso se suspende el bombeo de agua para que baje el contenido de humedad del material dirigido y facilitar así secado. Al abrir el contenedor, permitiendo así la entrada de aire al sistema, se debe inyectar el CO<sub>2</sub> con el fin de evitar explosiones. La operación por lotes debe contar con una serie de unidades como la descrita anteriormente garantizando una producción continua y estable del gas producido (Vögeli et., 2014).

*Gráfica 19. Esquema General de un Digestor de Tipo Contenedor*



*Tomado y Adoptado de (Vögeli et al., 2014)*

La alternativa más apropiada para la degradación de residuos agrícolas y materiales orgánicos con un alto contenido de sólidos y material lignocelulósico. La degradación de estos materiales tiende a ser demasiado lenta por los métodos convencionales gracias a la alta resistencia de la lignina. Esta alternativa interesante, todavía presenta varios obstáculos los cuales se encuentran en investigación para dar con su solución (André, Pauss, & Ribeiro, 2018).

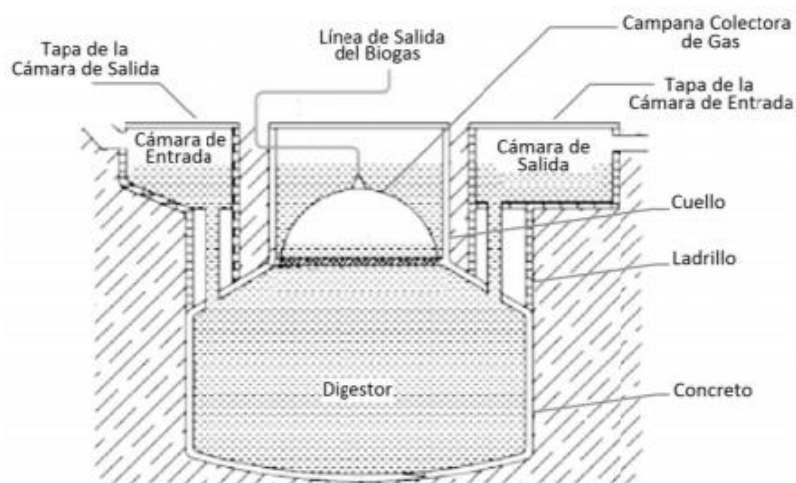
### ***3.3.2. Digestores Prefabricados***

En la actualidad se fabrican diferentes prototipos, derivados de los tres principales tipos de digestores domésticos tales como el digestor de domo fijo, el de domo flotante y el tubular. Por el contrario tenemos los digestores construidos in situ, por los cuales han aparecido los digestores prefabricados, hechos con materiales y propiedades físicas especiales (Cheng et al., 2014).

#### **3.3.2.1. Sistemas de Encofrado Industrializado**

Este tipo de digestores se caracterizan por su producción industrial en grandes cantidades y por su construcción en concreto reforzado con el fin de garantizar su vida útil por un periodo superior a 15 años. Estos digestores cuentan con cámaras por las cuales ingresa el sustrato, otra cámara se encarga de la digestión en concreto, un cuello y una cámara de salida del efluente líquido. En este equipo se cuenta con un contenedor de plástico reforzado con fibra de vidrio el cual se ubica en el cuello de reactor (Ministerio de Energía de Chile, 2011).

Gráfica 20. Esquema de un Digestor en Hormigón



Tomado y Adaptado de (Mutungwazi, Mukumba, & Makaka, 2018)

### 3.3.2.2. Digestores de Plástico

Los tanques de estos prototipos generalmente están contruidos con polietileno u otro polímero reforzado con fibra de vidrio, los cuales pueden estar ubicados de manera horizontal, vertical o con forma esférica. La capacidad de estos se encuentra entre los 4 m<sup>3</sup> y 20 m<sup>3</sup>. Estos digestores se caracterizan principalmente por ser demasiado livianos, son fabricados por roto moldeo, se encuentran herméticamente cerrados, enterrados o sobre la superficie y su funcionamiento es muy parecido a los digestores anaerobios de domo fijo. La materia orgánica producto del estiércol del ganado vacuno, cerdos, aves y otros desechos orgánicos se fermentan por medio de bacterias y microorganismos anaerobios, transformándose en biogás o en un bioabono (Cheng et al., 2014). En la Gráfica 21. Esquema de un Digestor de Plástico Prefabricado se presenta uno de los múltiples diseños prefabricados que se utilizan para el tratamiento de los residuos producto de las cocinas.

Gráfica 21. Esquema de un Digestor de Plástico Prefabricado



Tomado y Adaptado de (Mutungwazi et al., 2018)

Sin embargo este tipo de digestores prefabricado presentan una serie de ventajas como la calidad mejorada debido a su diseño y fabricación. Así mismo se caracterizan por su resistencia mecánica adecuada, hermeticidad, larga vida útil, su peso ligero y fácil instalación (Cheng et al., 2014).

### 3.4. Variables a Considerar

Para el diseño y construcción de un sistema de digestión anaerobio se deben tener en cuenta los siguientes aspectos como la recolección, transporte y acondicionamiento de las materias primas del biogás y del efluente producido, así como también se debe considerar el suelo disponible, el clima, los materiales de construcción, el suministro de agua, entre otras. A continuación se

plasman algunas de estas consideraciones a tener en cuenta para su correcta producción del biogás (Rupf, Bahri, de Boer, & McHenry, 2017).

### ***3.4.1. Correcta Elección del Tipo de Digestor***

En este caso para la correcta elección del tipo de digestor a emplear, se debe tener en cuenta el presupuesto dispuesto para la elaboración del prototipo, así mismo la cantidad y el tipo de materias primas disponibles a emplear en el digestor. Considerando estas variables se puede definir el tamaño del digestor, la producción posible de biogás a emplear y así mismo el uso asignado al biogás producido. El tipo de terreno en el cual se va a construir el prototipo también es muy importante, ya que de este dependen sus dimensiones y el tipo de digestor a construir, se debe tener en cuenta el tipo de suelo y el nivel freático (Ministerio de Energía de Chile, 2011). Todos los digestores a emplear, sin importar cualquiera que sea que se desee construir deben cumplir con una serie de características que se plasman a continuación:

#### **3.4.1.1. Impermeabilidad**

El prototipo a emplear debe ser impermeable con el fin de evitar salidas indeseadas del líquido o material orgánico que se encuentra en el proceso de digestión hacia el exterior, ya que si de lo contrario se logra filtrar el material orgánico en forma de líquido podría ocasionar graves problemas de contaminación.

#### **3.4.1.2. Hermeticidad**

Todo digestor requiere de hermeticidad para evitar el contacto con el oxígeno proveniente del exterior con el fin de prevenir la salida del biogás generado lo cual se podría considerar como una pérdida de energía o eficiencia del proceso, representando riesgos de explosiones o incendios en el sistema.



### **3.4.1.3. Aislamiento**

Al igual que los factores anteriores, los digestores deben contar con un aislamiento que evite los cambios bruscos de temperatura, ya que estos son nocivos para los microorganismos presentes, llegando a afectar gravemente la producción del metano.

### **3.4.1.4. Resistencia**

Por último es necesario que el digestor sea estructuralmente resistente, es decir, que pueda soportar los diferentes esfuerzos a los que estará sometida la estructura, bien sea por presiones internas o por las cargas ejercidas en el suelo, entre otras acciones (Hilbert, 2010).

### ***3.4.2. Ubicación del Digestor***

Esta variable es de las más importantes al momento de llevar a cabo un proceso de digestión, la correcta ejecución y producción del sistema dependerá de la ubicación del digestor. Importante tener en cuenta que el sistema de digestión debe encontrarse a mínimo 15 metros de cualquier cuerpo de agua, la base del reactor debe estar ubicada sobre el nivel freático del suelo, todo esto con el fin de prevenir una posible contaminación a cualquier cuerpo hídrico que se encuentre cercano al sistema, esta posible contaminación se puede dar por una mala operación o mal mantenimiento del sistema. Durante el proceso de instalación y excavación es importante considerar que el equipo se debe encontrar alejado de los árboles con el fin de que las futuras raíces del árbol no afecten el sistema que se encontrara sepultado, así mismo la cimentación del equipo debe ubicarse a más de 2 metros de cualquier edificación presente en la zona con el fin de evitar cualquier riesgo de daños y así mismo facilitar la operación y mantenimiento (VanBuren, 1979).

El digestor debe encontrarse cerca al lugar donde son depositados las aguas residuales y los desechos orgánicos, justo ahí se debe contar con una tubería con una pendiente adecuada que

permita el ingreso de estos a una cámara o caja ubicada a la entrada del sistema. Así mismo debe haber una tubería con una pendiente adecuada para la salida del equipo la cual permita la evacuación por gravedad al tanque de almacenamiento. Por todo esto es importante evitar la ubicación del sistema en la parte más baja del terreno, ya que esto podría ocasionar problemas de acumulación de residuos (AEPC/NRREP, 2013).

Por último con respecto a la ubicación, el digestor debe estar en un lugar protegido de los cambios bruscos de temperatura producidos por las temporadas frías, especialmente en las noches, debido a que las bacterias patogénicas son particularmente sensibles a las fluctuaciones de temperatura, llegando así a inhibir la producción de biogás. Durante las horas del día, es preferible un lugar que reciba un máximo de calentamiento por energía solar y que no se vea obstaculizada por vegetaciones presentes aledañas (Ministerio de Energía de Chile, 2011)

### ***3.4.3. Volumen del Digestor***

El volumen del digestor se determina de acuerdo con la cantidad de gas que se quiere producir, la materia disponible para su producción y como este gas será empleado. Se propone de acuerdo a la experiencia con digestores de domo fijo elaborado y empleado en China, para una familia rural de al menos 5 personas, se requiere producir 1 m<sup>3</sup> por día de biogás para suplir las necesidades de cocina, luz y calor. Además se afirma que por cada metro cubico de volumen del reactor, se puede producir entre 0,1 m<sup>3</sup> y 0,2 m<sup>3</sup> por día de biogás dependiendo de las condiciones ambientales y la operación del digestor (VanBuren, 1979).

Se establece una regla empírica para determinar el volumen mínimo requerido de un digestor para viviendas rurales, en la cual se indica que de acuerdo al número de integrantes de la vivienda, este se multiplica por un factor (entre 3, 2 y 1,5) los cuales se encuentran en la Gráfica

22. Producción de Biogás a Partir de Algunas Materias Primas y que se simplifica mediante la ecuación indicada en la tercera columna de la tabla de mención.

*Gráfica 22. Producción de Biogás a Partir de Algunas Materias Primas*

<b>Integrantes de la Vivienda Rural</b>	<b>Factor (F)</b>	<b>Ecuación Aplicable</b>
<b>Menor a 3</b>	3	$V = F \times N$
<b>3 - 5</b>	2	En donde,
<b>Mayor a 5</b>	1,5	V: Volumen del digestor F: Factor N: Número de Integrantes de la Vivienda

*Tomado y Adaptado de (VanBuren., 1979)*

En el caso de los digestores tubulares además del volumen necesario para llevar a cabo la digestión (Volumen líquido), se debe tener en cuenta el volumen de biogás producido (Volumen gaseoso) que se almacenará dentro del digestor, es por esto que los fabricantes ofrecen tablas o programas que ayudan con el dimensionamiento y selección del digestor (FACR-ADPP, 2012). El volumen líquido deber ser el mínimo necesario para llevar a cabo la digestión anaerobia de la materia orgánica. Se obtiene como el producto del tiempo de retención hidráulico multiplicado por la carga de la materia prima que se alimentara diariamente. El volumen líquido se calcula como la tercera parte del volumen líquido (Martí, 2008).

#### **3.4.4. Sistema de Alimentación**

Una vez se cuenta con la materia prima mezclada con agua, que por ningún motivo debe ser agua potable, se procede con la descarga al digestor. La mezcla de la materia con el

agua mejora el proceso de digestión si se adiciona la cantidad correcta de agua, aumentando así la fluidez de la materia orgánica dentro del digestor, el exceso del agua podría reducir la tasa de producción de gas por unidad de volumen generando así nada más que una mayor cantidad de efluente a tratarse (Martí, 2008; Olaya & González, 2009).

Si la relación de agua en la mezcla es escasa el ácido acético formado se acumulará, y eventualmente inhibirá la formación de biogás. Se generará una escoria más densa en la interfase de sólido líquido el cual dificultará la salida de biogás y podrían también producirse taponamientos en cualquier punto del digestor (VanBuren, 1979). En los digestores de tipo tubular se ha podido considerar un porcentaje óptimo de sólidos que se encuentra entre el 8% y el 12% (Hilbert, 2010). Con fines prácticos a continuación en la Gráfica 23. Relaciones de Alimentación Estiércol-agua Según el Tipo de Digestor se emplea en la carga al reactor una relación cercana a la mínima, la cual varía dependiendo del tipo de digestor.

*Gráfica 23. Relaciones de Alimentación Estiércol-agua Según el Tipo de Digestor*

<b>Tipo de Digestor</b>	<b>Relación Mínima en Volumen Estiércol : Agua</b>	<b>Relación Máxima en Volumen Estiércol : Agua</b>
<b>Domo Fijo</b>	1 : 1	1 : 2
<b>Tanque Flotante</b>	1 : 1	1 : 2
<b>Tubular</b>	1 : 3	1 : 9

*Tomado y Adaptado de (Olaya & González, 2009; SEMARNAT, 2010; VanBuren, 1979)*

### **3.4.5. Almacenamiento del Biogás**

La forma más sencilla de almacenar el gas producido es a baja presión, es decir a la misma presión que se encuentre el digester dentro del espacio mismo del digester o mediante contenedores flexibles de volumen variable. Se debe tener en cuenta que en cualquiera de los sistemas de digestión anaerobia vistos anteriormente la presión del gas no sobrepasa generalmente los 0,1 m.c.a lo cual se considera como una presión aceptable para los artefactos domésticos como estufas o calentadores (HILBERT, 2010). Sin embargo a mayores presiones también se puede almacenar gas, especialmente cuando se producen grandes cantidades de biogás, requiriendo mayores costos de energía para comprimir el gas y removiendo impurezas como vapor de agua, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, todo esto con el fin de garantizar el correcto funcionamiento y una larga vida útil de los equipos que se alimentan y funcionan con el biogás.

#### **3.4.5.1. Secado del Biogás**

Una vez que se obtiene el biogás, producto del digester, este se encuentra saturado con vapor de agua, fluyendo hacia las tuberías enfriándose y el agua se condensa pudiendo llegar a obstruir las tuberías, por todo esto se debe contar con unas tuberías con una pendiente mínima del 1% hacia un dispositivo denominado trampa de agua donde se permite el almacenamiento condensado el cual debe estar en constante tratamiento y reparación (Hilbert, 2010). Se puede llevar a cabo un proceso de secado por adsorción mediante el empleo de zeolitas, geles de sílice o dióxido de aluminio.

#### **3.4.5.2. Remoción del Sulfuro de Hidrógeno**

El ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) es el producto del hidrógeno en contacto con el vapor de agua, este es un agente altamente corrosivo para los metales, además de esto es tóxico y posee un olor desagradable, por lo cual debe ser retirado este ácido antes de la alimentación del biogás a las

calderas, estufas, hornos, tuberías o cualquier equipo que necesite el biogás para su funcionamiento. Una vez se conoce el impacto negativo que tiene la presencia de este ácido en el sistema se busca la manera de retirarlo, uno de los métodos más empleados es la implementación de tuberías con un filtro, el cual contiene Hidróxido ferroso o sales de hierro tales como el cloruro y sulfatos de hierro formando así sulfuro de hierro y siendo menos perjudicial para el sistema (Hilbert, 2010).

#### **3.4.5.3. Remoción de Dióxido de Carbono**

Esta remoción se realiza con el fin de aumentar la concentración de metano, ya que cuando este valor de concentración es superior al 95%, se obtiene un biogás con poder calorífico lo más parecido al gas natural. El proceso de remoción del dióxido de carbono se puede llevar a cabo mediante la adsorción, absorción o mediante la implementación de membranas especiales.

#### **3.4.6. Tratamiento del Efluente**

El biol o fertilizante es el efluente líquido producto de la materia ingresada que ingresa al digester para producir el biogás, este está compuesto por una fase sólida la cual se origina con la descarga o limpieza del digester y otra fase líquida la cual es el producto más abundante de la digestión anaerobia y contiene elementos minerales tales como el fósforo y nitrógeno, los cuales son aprovechados en diversos cultivos agrícolas, ya que actúa como fertilizante foliar.

La aplicación del efluente líquido producto de la digestión puede ser empleado para el crecimiento vegetal gracias a sus altos contenidos de fósforo y nitrógeno. Este efluente nunca debe ser depositado directamente a cuerpos hídricos, ya que su alto contenido de nutrientes podría ocasionar el crecimiento de algas afectando el oxígeno del agua y las especies

presentes. La correcta disposición de este efluente puede ser la sedimentación y posteriormente la aplicación en filtros anaerobios o lagunas de estabilización. En este caso no se tratarán efluentes provenientes de las aguas negras, sin embargo se debe indicar que la disposición de estos se debe realizar de acuerdo con las directrices del informe de la Organización Mundial de la Salud. Y sobre todo, en ningún momento se puede permitir que este efluente sea depositado en vegetación, ya que afectaría bastante los cultivos y la vegetación presente (Vogeli et al; 2014).

#### **4. Digestión Anaerobia Rural a Través del Mundo**

A lo largo de este trabajo, se explican, se definen y se caracterizan los diferentes tipos de digestores que se encuentran en la actualidad, también se ha desarrollado información de interés la cual ayudará con la correcta elección para el diseño y construcción de un sistema de digestión anaerobia de acuerdo con las necesidades, materiales y suelos presentes en la zona. A continuación se plasma el estado de los digestores anaerobios de pequeña escala que han sido empleados por la población rural a través de todo el mundo.

##### **4.1. Continente Asiático**

Esta parte del mundo cuenta con el privilegio de estar como el número uno en la mayor cantidades de digestores desarrollados a pequeña escala, los cuales la mayoría de estos se ubican en las viviendas y zonas rurales. En los países como China, India, Nepal, Vietnam y Bangladesh la implementación de digestores domésticos cada vez más juega un papel importante en la vida rural, ya que estos países cuentan con el importante apoyo del gobierno para implementar estos sistemas.

Durante el año 2007 y el año 2012 se evidenció un crecimiento del 91% en el número de digestores rurales implementados en China, siendo el digestor de domo fijo el más querido e implementado por las comunidades. Por otra parte la India para el año 2007 ya contaba con 5 millones de digestores, siendo el digestor de tipo flotante el más empleado, especialmente al sur de país, mientras que en el norte del país el digestor de domo fijo marcaba la diferencia. Sin embargo se han realizado encuestas en países como Bangladesh donde lastimosamente sólo el 3% de los digestores se encuentran en correcto funcionamiento, ya que las principales fallas son la mala implementación de ellos, la baja alimentación de materia prima, alto consumo de agua para realizar la mezcla, diseño inapropiado, tamaño errado, digestión inefectiva y construcción mal elaborada, a todo esto se le debe sumar que la mayoría de los casos por falta de conocimiento en el tema se lleva una mala implementación de los equipos logrando que los resultados en la producción de biogás no sean los esperados y perdiendo el interés en la implementación de estos equipos.

#### **4.2. Continente Africano**

La necesidad de contar con nuevas fuentes de energía, llevó al continente africano a la implementación de estos equipos a pesar de las difíciles condiciones de vida y crisis energéticas que se encuentran en el continente, las temperaturas de la zona son un factor favorable a la hora de la fermentación de la materia orgánica, la implementación de abundantes y diversos materiales biodegradables como materia orgánica ingresada al proceso, representa una baja adopción y aceptación de la tecnología de biodigestión anaerobia. En países como Tanzania la ausencia del agua ha provocado que la implementación de los digestores no sea la más apropiada (Mwirigi et al; 2014).



Los gobiernos de los países como Ruanda, Tanzania, Burkina, Etiopía, Uganda, Kenia, Faso y Benin han venido motivando e implementando el uso de los sistemas de digestión anaerobia (Roopnarain & Adeleke, 2017).

### **4.3. América Latina**

Se dice que a principios de la década de los años 70 se inicia la digestión anaerobia en Latinoamérica, gracias a la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), la cual promovió esta tecnología, construyendo en países como Bolivia y algunos países del caribe los primeros digestores. En países como Perú y Bolivia también hacia los años 70, se empieza la implementación de los digestores aerobios gracias a la participación de las universidades públicas y entidades no gubernamentales, lastimosamente la mayoría de estas iniciativas fueron abandonas por falta de entrenamiento, información y acompañamiento por parte de personas capacitadas.

En nuestro país, Colombia, los primeros indicios de la digestión anaerobia datan del año 1986 en la ciudad de Cali, Valle del Cauca, donde el centro de Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), instaló los primeros digestores tubulares plásticos de flujo continuo. Desde entonces el uso de este tipo de digestores se ha expandido a las zonas rurales del país y de América Latina. En el año 2009 se crea la Red de Biodigestores para América Latina y el Caribe (RedBioLac) la cual comparte experiencias y busca integrar distintos organismos y grupos de interés para identificar y colaborar en la mejora continua de este tipo de tecnología. Tal como se veía anteriormente, la implementación de Programas Nacionales de Biogás se ha llevado a cabo en países de

Latinoamérica como Nicaragua en el año 2012, Bolivia 2013 y Perú en el año 2012 (Garfí et al; 2016).

#### **4.4. Continente Europeo**

Actualmente en este continente se cuenta con plantas de biogás, gracias a la colección de materia orgánica producto de la actividad agrícola, pecuaria y aguas residuales, pero a diferencia de Latinoamérica y el continente africano, aquí se cuenta con digestores de mayor tamaño y alta tasa de producción, contando así con una tecnología de punta y un proceso de producción eficiente. Alemania domina el mercado de producción de biogás a nivel mundial, contando con aproximadamente un 62% de las plantas, además de esto Alemania lidera la investigación y la publicación de artículos, seguido de Italia, España y Suecia (Lora Grando et al; 2017). El continente europeo viene realizando avances en el biogás producido con el fin de obtener un buen manejo de los residuos y adoptar una independencia de los combustibles fósiles.

### **5. Ejercicio de Aplicación Práctica**

Como ejemplo de aplicación a continuación se tomaron los datos obtenidos de un informe de trabajo desarrollado por estudiantes de la universidad Antonio Nariño de Bogotá en compañía del Grupo TGI de Energía de Bogotá. Los datos se obtuvieron durante el periodo bimensual comprendido entre los meses de octubre y noviembre del año 2019, en la Institución Educativa el Prado, ubicada en la vereda Calderón, en el municipio de Puerto Boyacá, Colombia. Se realizó la clasificación y cuantificación de los residuos sólidos alimenticios provenientes del restaurante escolar, para esto se estudiaron las rutinas de preparación de los alimentos y generación de los residuos tanto sólidos como líquidos, ya que esto es elemental para el diseño experimental

durante la operación de los sistemas a escala en el laboratorio y junto con el análisis físico-químico se complementará la información necesaria para proceder con la ejecución, diseño y construcción de un biodigestor.

### **5.1. Visita de Toma de Muestras En la Institución Educativa el Prado**

Una vez se obtiene la aprobación de las directivas encargadas de la institución, se concreta el inicio del proyecto con el fin de realizar las visitas pertinentes e identificar los siguientes factores:

- Red de descarga de agua residual.
- Medición de parámetros in situ y toma de muestras de la caja de inspección.
- Identificación del pozo séptico y toma de muestra para el análisis en laboratorio.
- Identificación de sanitarios y toma de muestras de agua potable suministrada a los lavamanos que son utilizados por los estudiantes.
- Clasificación y cuantificación de los residuos de preparación alimenticia del restaurante escolar obtenidos por los funcionarios una vez a la semana.
- Cuantificación de los residuos alimenticios posteriores al almuerzo escolar los cuales son obtenidos a diario.

#### ***5.1.1. Planeación de Visita para Medición de Caudales y Toma de Muestras del Agua Residual***

El comité ejecutor del proyecto en la UAN compuesto por dos ingenieros químicos, un microbiólogo industrial y un ingeniero ambiental fueron los encargados de las mediciones in situ implementando los equipos pertinentes para la medición del pH, oxígeno disuelto,

temperatura y conductividad, así como también los demás accesorios para la recolección de muestras, toma de parámetros in situ y mediciones de los caudales.

### ***5.1.2. Descripción de la Toma de Muestras para el Efluente***

La institución cuenta con una capacidad para 600 estudiantes en jornada continua de lunes a viernes junto con el personal administrativo de planta conformado por 38 profesores y el equipo administrativo.

Es importante tener una clara identificación de la red de conducción de las aguas residuales, ya que esto garantizaría un correcto esquema del sistema de tratamiento y recolección con el fin de aprovechar al máximo la materia orgánica residual generada, durante el desarrollo del informe se identificaron los sistemas de conducción y vertimiento de aguas residuales producto de los baños, en la caja de inspección sanitaria y el pozo séptico; para la elaboración de este ejemplo solo se consideraron los residuos provenientes del restaurante escolar.

## **5.2. Muestras de Residuos del Restaurante Escolar**

El instituto se encuentra exactamente en la vereda Calderón, a 35 minutos en vehículo desde el casco urbano del municipio de Puerto Boyacá, de acuerdo con las directivas y anteriores visitas se consideró que el 90% de los estudiantes asisten desde el municipio de Puerto Boyacá y algunas otras veredas aledañas, por tal motivo el gobierno nacional implementó el servicio de comedor escolar de la mano del Plan de Alimentación Escolar (PAE).

El comedor cuenta con capacidad de atención de 557 almuerzos escolares diarios durante 170 días de periodo académico. Se realizó la clasificación y cuantificación de los residuos alimenticios, ya que estos cuentan con un gran potencial de producción energética y con esto se busca evaluar su posible aprovechamiento.

El proceso de alimentación escolar tiene una rutina semanal y el PAE cuenta con un total de 20 menús de almuerzos diseñados por un nutricionista encargado con el fin de satisfacer las necesidades de los estudiantes, se observó que estos menús contaban con una amplia variedad de frutas y verduras, las cuales son alistadas todos los días por el personal de la cocina desde las 4 am; Es importante tener en cuenta que la caracterización de estos residuos se realizó el día viernes 08 de noviembre de 2019.

En el comedor institucional se encuentran cuatro funcionarias las cuales se encargan de la preparación de los alimentos y así mismo de los restos de comida, ellas descartan indiscriminadamente los restos alimenticios tales como, cascaras, semillas, frutas, y verduras en mal estado; En la Gráfica 24 se puede evidenciar como los diferentes residuos son depositados en los recipientes y previamente tirados en la parte trasera del colegio.

*Gráfica 24. Clasificación de los residuos*



Ante el descarte de los residuos en la parte trasera de la institución Gráfica 25 Área de Desecho de los Residuos, esto se puede considerar como un mal manejo de los residuos ya que se puede generar un foco de propagación de enfermedades, puesto que allí se atraen insectos como mosquitos y zancudos, los cuales son transmisores de enfermedades importantes para la salud de todos en la institución, así mismo se puede evidenciar la presencia de roedores y reptiles endémicos presentes en la zona. La idea de este informe es realizar un manejo adecuado de los residuos orgánicos desechados y así mismo emplearlos para la obtención de energía y abono para suelos cercanos a la institución.

*Gráfica 25 Área de Desecho de los Residuos*



*Fuente: Tomado y Adaptado de Convenio No 751187 TGI-UAN*

La cuantificación de los residuos se realizó in situ, y posteriormente se procedió con la separación de cada residuo según su procedencia, por ejemplo cáscaras, semillas, frutas o verduras. Otro tipo de residuos como los cárnicos aportan un contenido de grasas denominados lípidos los cuales pueden afectar los procesos biológicos, sin embargo dentro del restaurante la cantidad de este tipo de residuos es casi despreciable. Finalmente durante el proceso de cuantificación también se tuvieron en cuenta los residuos denominados post-almuerzo Gráfica 26 los cuales probablemente aporten un contenido de lípidos.

*Gráfica 26. Limpieza de Residuos y Utensilios Post-almuerzo*



*Fuente: Tomado y Adaptado de Convenio No 751187 TGI-UAN*

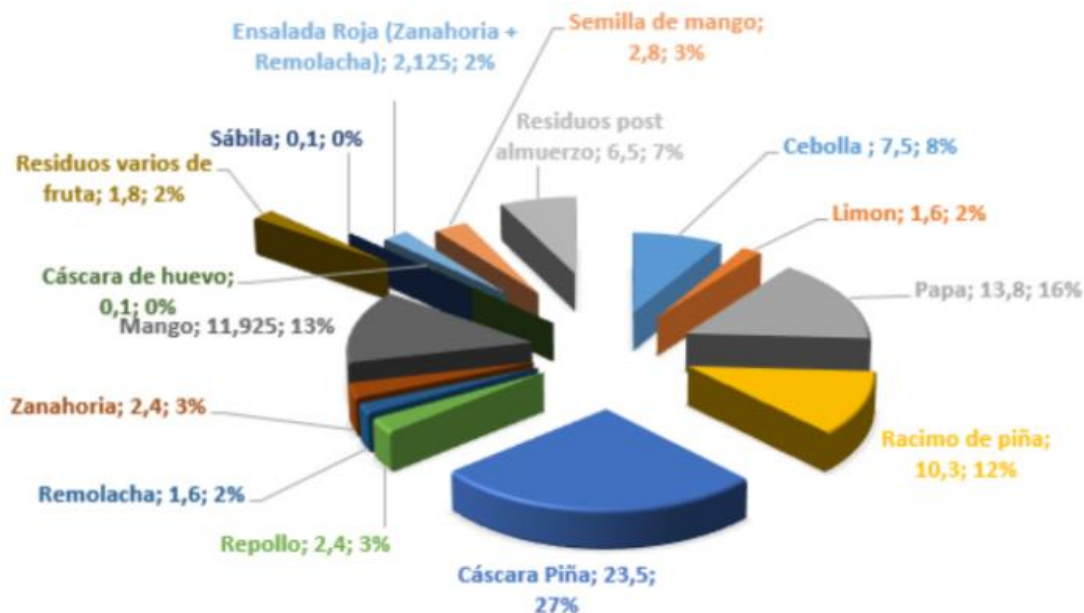
### **5.3. Resultados**

Los resultados obtenidos de la clasificación y cuantificación de los residuos generados por la institución se representan en la Gráfica 27. Clasificación de los Residuos Generados en el Restaurante Escolar del I.E. el Prado, estos muestran que se generaron un total de 88,45 Kg de residuos, esta cantidad de residuos totales se puede considerar como la muestra promedio por semana de acuerdo con la dinámica ya planteada en la institución. Durante la caracterización el residuo que más se identificó fue la cáscara de piña contando con 23,5 kg, lo cual corresponde al 27% de los residuos totales; Seguidamente se contó con 13,8 kg de papa equivalente al 16%, el mango con 11,92 kg, equivalente al 13% y el racimo de piña pesando 10,3 kg equivalente al 12% de la muestra, Todo esto evidencia que la principal fuente de residuos generados son las frutas y verduras, los cuales son fuentes ricas de fructuosa y vitaminas; También se evidenció la presencia de tubérculos los cuales son fuentes de almidón (Carbohidratos). Se debe considerar que todos los residuos obtenidos tanto en las frutas, verduras y tubérculos cuentan con alto contenido de agua, lo cual favorece en el proceso de digestión.



Gráfica 27. Clasificación de los Residuos Generados en el Restaurante Escolar del I.E.

el Prado



Fuente: Tomado y Adaptado de Convenio No 751187 TGI-UAN

La mayoría de los residuos obtenidos favorecen al proceso de digestión, ya que estos son fuente importante de materia orgánica, adicionalmente la mayoría de frutas son de carácter ácido lo cual va a contribuir con la disminución del pH al momento de ingresar el efluente al sistema. Todo esto indica que se podría obtener una buena producción de energía en el instituto si se elabora un buen proyecto de digestión anaerobia y si se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Se debe contar con el manejo adecuado de los residuos, para esto se debe capacitar al personal de la cocina con el fin de informar la correcta caracterización y disposición de los residuos orgánicos.

- Es importante realizar un secado previo a los residuos orgánicos, ya que esto contribuiría a la digestión, la institución cuenta con la infraestructura y la temperatura ambiente adecuada para llevar a cabo este proceso.
- Se debe considerar una fase de molienda la cual permitirá que ingresen al sistema partículas más pequeñas a lo habitual con el fin de obtener un buen mezclado entre el efluente y el agua residual doméstica, garantizando así el correcto funcionamiento del digestor y previniendo posibles fallas durante el proceso de digestión.

## **6. Predicción del Biogás**

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente en la cuantificación y clasificación de los residuos, se puede proceder con la implementación del Software para la predicción de biogás (R) definiendo así la cantidad de biogás a producir de acuerdo con los residuos, de tal manera que se pueda definir un uso correspondiente a la cantidad de biogás producido.

### **6.1. Producción Total**

Para establecer de manera correcta el valor total de biogás producido por el total de los residuos ingresados al sistema, se debió identificar, formular y tener en cuenta los siguientes parámetros para el correcto desarrollo y funcionamiento del programa herramienta.

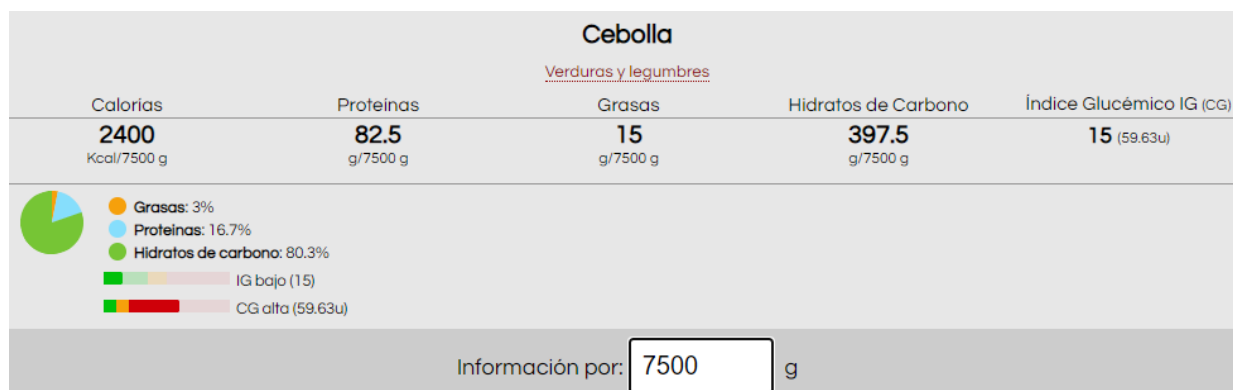
#### ***6.1.1. Composición Macromolecular***

Gracias a la aplicación de una calculadora nutricional online se obtuvo información nutricional de la mayoría de los residuos orgánicos provenientes del comedor de la institución. De acuerdo con los gramos de la fruta, verdura o alimento que se ingresó a la

calculadora, inmediatamente se obtuvo el porcentaje de proteínas, grasas y carbohidratos, también se pueden identificar valores del calorías, índice glucémico (I.G) y la carga glucémica (CG) de cada uno de ellos.

Para el caso de la cebolla, se ingresa a la calculadora el peso del residuo en gramos e inmediatamente se obtiene la composición porcentual en grasas, proteínas y carbohidratos, así mismo el peso seco de cada uno tal y como se observa en la Gráfica 28. Información Nutricional de la Cebolla

*Gráfica 28. Información Nutricional de la Cebolla*



*Tomado y Adaptado de [https://www.mujerdeelite.com/guia\\_de\\_alimentos/237/cebolla](https://www.mujerdeelite.com/guia_de_alimentos/237/cebolla)*

La mayoría de frutas y verduras se encontraban en la calculadora nutricional, sin embargo algunos residuos como el racimo de piña, residuos varios y ensalada roja estos valores se debieron suponer y obviar, ya que no se conoce información exacta de estos datos. En la Tabla 4. Cuantificación de los Residuos Obtenidos del I.E. el Prado se representa la composición macromolecular de cada uno de los residuos en términos de carbohidratos, proteínas y lípidos.

*Tabla 4. Cuantificación de los Residuos Obtenidos del I.E. el Prado*

<b>Residuo</b>	<b>Cantidad (%)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carboh idratos (%)</b>	<b>Peso (g) Carbohid ratos</b>	<b>Proteínas (%)</b>	<b>Peso (g) Proteínas</b>	<b>Grasas (%)</b>	<b>Peso Grasas (g)</b>
Cebolla	8	7500	80,3	397,5	16,7	82,5	3	15
Limón	2	1600	77,5	49,6	15	9,6	7,5	4,8
Papa	16	13800	89,4	2208	9,5	234,6	1,1	27,6
Repollo	3	2400	65,6	96	27,9	40,8	6,6	9,6
Remolacha	2	1600	84,7	132,8	15,3	24	0	0
Piña	27	23500	93,8	2467,5	3,6	94	2,7	70,5
Racimo de piña	12	10300	94	10	4,2	2	1,8	2,2
Zanahoria	3	2400	83,3	168	14,3	28,8	2,4	4,8
Cascara de huevo	0	100	2,4	0,6	50	12,6	47,6	12
Mango	13	11925	92,6	1490,6	4,4	71,6	3	47,7
Semilla de mango	3	2800	93	1638	3,5	61,6	3,5	61,6
Otros	11	10525	67,7	345	19,2	160	13,1	95,2
Total	100	88450		9003,6		822,1		351

*Fuente: Propia*

### 6.1.2. *Peso Seco*

Con la composición macromolecular, se pudo identificar el aporte en gramos para los carbohidratos, proteínas y lípidos de cada uno de los residuos. De esta manera se obtuvo el peso seco total de la muestra tal como se muestra en la Tabla 5. *Peso Seco Residuos Obtenidos del I.E.Prado*

*Tabla 5. Peso Seco Residuos Obtenidos del I.E.Prado*

<b>Residuo</b>	<b>Peso Residuo (g)</b>	<b>Peso (g) Carbohidratos</b>	<b>Peso (g) Proteínas</b>	<b>Peso Grasas (g)</b>	<b>Peso Seco (g)</b>
Cebolla	7500	397,5	82,5	15	495
Limón	1600	49,6	9,6	4,8	64
Papa	13800	2208	234,6	27,6	2470,2
Repollo	2400	96	40,8	9,6	146,4
Remolacha	1600	132,8	24	0	156,8
Piña	23500	2467,5	94	70,5	2632
Racimo de piña	10300	10	2	2,2	14,2
Zanahoria	2400	168	28,8	4,8	201,6
Cascara de huevo	100	0,6	12,6	12	25,2
Mango	11925	1490,6	71,6	47,7	1609,9
Semilla de mango	2800	1638	61,6	61,6	1761,2
Otros	10525	345	160	95,2	600,2
<b>Total</b>	<b>88450</b>	<b>9003,6</b>	<b>822,1</b>	<b>351</b>	<b>10176,7</b>

*Fuente: Propia*

### **6.1.3. Peso del Agua**

El aporte de agua en este tipo de residuos es muy alto ya que se cuenta con frutas y verduras en el efluente. Una vez se logra identificar el peso seco en gramos que aportan los carbohidratos, proteínas y lípidos a cada uno de los residuos, se obtiene el peso seco total el cual es clave para el cálculo del peso del agua para cada una de las frutas y verduras en el digestor.

*Tabla 6. Peso del Agua Residuos Obtenidos del I.E. el Prado*

<b>Residuo</b>	<b>Peso Residuo (g)</b>	<b>Peso Agua (g)</b>	<b>Porcentaje de Agua (%)</b>
Cebolla	7500	7005	93,4
Limón	1600	1536	96
Papa	13800	11329,8	82,1
Repollo	2400	2253,6	93,9
Remolacha	1600	1443,2	90,2
Piña	23500	20868	88,8
Racimo de piña	10300	10285,8	99,86
Zanahoria	2400	2198,4	91,6
Cascara de huevo	100	74,8	74,8
Mango	11925	10315,1	86,49

Semilla de	2800	1038,8	
mango			37,1
Otros	10525	9924,8	94,29
Total	88450	78273,3	<b>88,49</b>

*Fuente: Propia*

De acuerdo al peso del agua en cada uno de los residuos, se evidencia en la Tabla 6. Peso del Agua Residuos Obtenidos del I.E. el Prado el gran porcentaje de agua que contiene cada fruta y verdura.

#### **6.1.3.1. Digestión Líquida**

El porcentaje total de agua que aportan los residuos al digester es muy importante ya que de esto depende su desempeño. Para este caso se desempeña una digestión líquida, ya que el porcentaje de agua es del (88,49%) de tal manera que no se necesita adicionar agua al digester y solo con el agua aportada por los residuos es suficiente para un correcto funcionamiento del digester.

#### **6.1.4. Fracción Másica Macromolecular**

Para calcular la fracción másica de cada de residuo, esta se define como el peso seco que aporta la macromolécula sobre el peso seco total en gramos del residuo.

*Tabla 7. Fracción Másica Macromolecular Residuos Obtenidos del I.E. el Prado*

Residuo	Peso Residuo (g)	Peso (g) Carbohidratos	Peso (g) Grasa	Peso (g) Seco	Fracción Másica	Fracción Másica	Fracción Másica
---------	------------------	------------------------	----------------	---------------	-----------------	-----------------	-----------------

			<b>Proteí nas</b>			<b>Carbohid ratos (g)</b>	<b>Proteínas (g)</b>	<b>Lípidos (g)</b>
Cebolla	7500	397,5	82,5	15	495	0,8	0,17	0,03
Limón	1600	49,6	9,6	4,8	64	0,78	0,15	0,08
Papa	13800	2208	234,6	27,6	2470,2	0,89	0,09	0,01
Repollo	2400	96	40,8	9,6	146,4	0,66	0,28	0,07
Remolacha	1600	132,8	24	0	156,8	0,85	0,15	0
Piña	23500	2467,5	94	70,5	2632	0,94	0,04	0,03
Racimo de piña	10300	10	2	2,2	14,2	0,7	0,14	0,15
Zanahoria	2400	168	28,8	4,8	201,6	0,83	0,14	0,02
Cascara de huevo	100	0,6	12,6	12	25,2	0,02	0,5	0,48
Mango	11925	1490,6	71,6	47,7	1609,9	0,93	0,04	0,03
Semilla de mango	2800	1638	61,6	61,6	1761,2	0,93	0,03	0,03
Otros	10525	345	160	95,2	600,2	0,57	0,27	0,16
Total	88450	9003,6	822,1	351	10176, 7	<b>0,88</b>	<b>0,08</b>	<b>0,03</b>

*Fuente: Propia*

### **6.1.5. Ejecución del Programa**

Para que el paquete de biogás o software funcione de manera correcta y logre predecir un valor de biogás producido, es necesario tener en cuenta todos los parámetros establecidos



anteriormente, con el fin de obtener un sustrato complejo el cual indique la fracción másica para cada uno de las macromoléculas del sustrato.

*Gráfica 29. Ejecución del Programa*

```

▶ predBg(mcomp = c(carbohydrate = 0.88, protein = 0.08, lipid = 0.03),
mass = 1, fd = 0.4, fs = 0.1)

⏏ Warning message in predBg(mcomp = c(carbohydrate = 0.88, protein = 0.08, lipid = 0.03), :
"Sum of mcomp != 1.0 so dividing all elements by the sum for calculation of formula."
158.949571622671

```

*Fuente: Propia*

### **6.1.6. Resultados Arrojados**

Teniendo en cuenta los valores de fracción másica total para los carbohidratos (0,88), proteínas (0,08) y lípidos (0,03) representados en la Tabla 7. Estos se digitaron y considerando una reacción ideal del 40% se obtuvo que la producción de biogás esperado es de 158,95 mililitros de metano sobre gramo de residuo, es decir que para el peso seco total del residuo (10176,7) se espera una producción total de 1617586,5 mililitros de metano por día, lo que corresponde en metros cúbicos a 1,6 metros cúbicos por día.

### **6.2. Producción Parcial**

Con el fin de garantizar la producción de biogás, a continuación se evaluará la producción a partir de los diferentes residuos ingresados al sistema. Es importante tener en cuenta que se llevó a cabo la misma dinámica, cumpliendo con los parámetros establecidos, determinando cada uno de los valores solicitados por el software y considerando una reacción ideal del 40%.

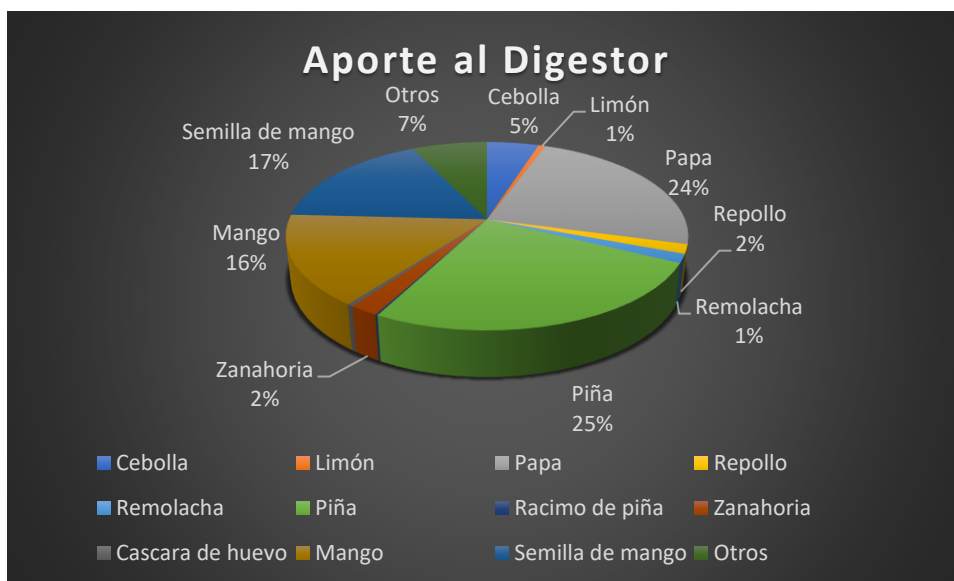
*Tabla 8. Producción Parcial Biogás*

<b>Residuo</b>	<b>Peso Seco (g)</b>	<b>Fracción</b>	<b>Fracción</b>	<b>Fracción</b>	<b>Producci</b>	<b>Producción de Biogás (mL/Día)</b>	<b>Aporte al Digestor (%)</b>
		<b>Másica Carbohid ratos (g)</b>	<b>Másica Proteínas (g)</b>	<b>Másica Lípidos (g)</b>	<b>ón de Biogás (mL/Gr)</b>		
Cebolla	495	0,8	0,17	0,03	162,75	80561,25	4,98
Limón	64	0,78	0,15	0,08	172,38	11032,32	0,68
Papa	2470,2	0,89	0,09	0,01	155,05	383004,51	23,68
Repollo	146,4	0,66	0,28	0,07	175,83	25741,51	1,59
Remolacha	156,8	0,85	0,15	0	155,44	24372,99	1,51
Piña	2632	0,94	0,04	0,03	157,04	413329,28	25,55
Racimo de piña	14,2	0,7	0,14	0,15	187,61	2664,06	0,16
Zanahoria	201,6	0,83	0,14	0,02	159,41	32137,06	1,99
Cascara de huevo	25,2	0,02	0,5	0,48	273,68	6896,736	0,43
Mango	1609,9	0,93	0,04	0,03	157,12	252947,48	15,64
Semilla de mango	1761,2	0,93	0,03	0,03	156,76	276085,71	17,07
Otros	600,2	0,57	0,27	0,16	195	117039	7,24
Total	10176,7	0,88	0,08	0,03	158,95	1617586,47	100,00

*Fuente: Propia*

De acuerdo con la fracción másica para cada una de las macromoléculas, se determinó digitando cada uno de los valores en el software la producción de biogás en términos de mililitro de metano por gramo de residuo. Al tener en cuenta el peso seco de cada uno de los residuos se obtuvo la producción de metano en mililitros por día. En la Gráfica 30 se representa de manera porcentual el aporte de cada uno de los residuos en la producción de biogás en el sistema.

*Gráfica 29. Producción Parcial de los Residuos*



*Fuente: Propia*

De esta manera se observa como los residuos tales como la piña, la papa y el mango son los principales productores de biogás en el sistema tanto por su composición macromolecular, y su porcentaje en masa. No está de más recomendar la implementación de este tipo de residuos con su correspondiente aporte en masa en el afluente del sistema, con el fin de garantizar una producción de biogás real y eficiente.

## 7. Análisis de Sensibilidad

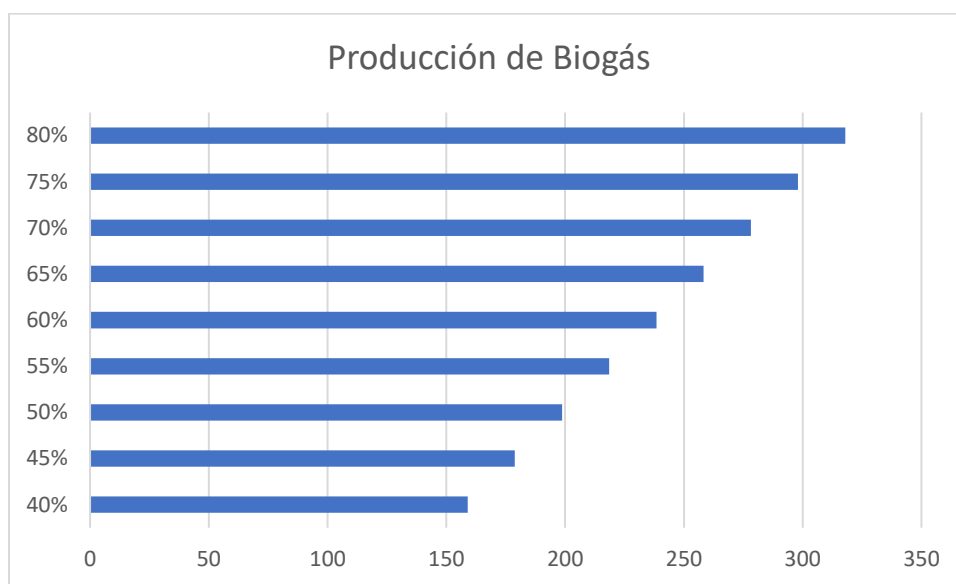
Durante el proceso de digestión se pueden presentar diferentes factores los cuales pueden favorecer o perjudicar la producción de biogás, todos estos deben ser tenidos en cuenta para garantizar el buen funcionamiento del sistema.

### 7.1. Reacción Ideal del Digestor

La reacción ideal de un digestor define de manera porcentual el funcionamiento del equipo.

Para este caso se consideran reacciones a partir del 40%, siendo el 60% una reacción optimista y el 80% una reacción eficiente para el proceso de digestión.

*Gráfica 31. Reacción Ideal del Digestor*



*Fuente: Propia*

De acuerdo con la Gráfica 31, se representaron valores de reacción a partir del 40% hasta el 80%, evidentemente entre mayor sea el valor indicado de reacción ideal, mayor será la producción de biogás.

## 7.2. Otros Tipos de Residuos

Si por diferentes motivos el nutricionista encargado del Plan de Alimentación Escolar (PAE) en conjunto con la Institución Educativa el Prado, deciden alterar el menú agregando nuevos alimentos con el fin de obtener nuevos platos y aportar nuevos nutrientes a los estudiantes.

### 7.2.1. Caracterización de los Residuos

Para este nuevo escenario se considerará una cantidad total de residuos similar a la del ejemplo de práctica. Todos los residuos nuevos se clasificaran en la Tabla 9, suponiendo su peso en gramos de manera equitativa.

Tabla 9. Caracterización de los Residuos

Otros Residuos	Cantidad (%)	Peso (g)	Peso			Peso Proteínas (g)	Grasas (%)	Peso Grasas (g)	Peso Agua (g)	Peso Seco (g)
			Carbohidratos (%)	Carbohidratos (g)	Proteínas (%)					
Aceite de Oliva	14,28	2	0	0	0	0	100	14,3	12837,7	14,3
Mantequilla	14,28	2	0	0	0,2	0	99,8	14,2	12837,8	14,2

		1285									
Tocino	14,28	2	0	0	5,5	0,6	94,5	10,1	12841,3	10,7	
Leche de		1285									
Vaca	14,28	2	39,3	0,7	27,4	0,5	33,3	0,6	12850,2	1,8	
Pechuga		1285									
de Pollo	14,28	2	0	0	85,8	2,9	14,2	0,5	12848,6	3,4	
Carne de		1285									
Vaca	14,28	2	0	0	56,9	2,6	43,1	2	12847,4	4,6	
		1285									
Salmón	14,28	2	0	0	63,2	2,9	36,8	1,7	12847,4	4,6	
		8996									
Total	99,96	4		0,7		9,5		43,4	89910,4	53,6	

*Fuente: Propia*

### 7.2.2. Fracción Másica Macromolecular

Con respecto a los residuos obtenidos originalmente en el restaurante del colegio, se agregaron residuos ricos en proteínas y lípidos, obteniendo un porcentaje de agua del 99,94% y fracciones másicas macromoleculares representadas en la Tabla 10.

*Tabla 10. Fracción Másica Macromolecular*

	<b>Fracción</b>	<b>Fracción</b>	<b>Fracción</b>
<b>Otros</b>	<b>Másica</b>	<b>Másica</b>	<b>Másica</b>
<b>Residuos</b>	<b>Carbohidratos</b>	<b>Proteínas</b>	<b>Lípidos</b>

Aceite de Oliva	0	0	1
Mantequilla	0	0	1
Tocino	0	0,06	0,94
Leche de Vaca	0,39	0,28	0,33
Pechuga de Pollo	0	0,85	0,15
Carne de Vaca	0	0,57	0,43
Salmón	0	0,63	0,37
Total	0,01	0,18	0,81

*Fuente: Propia*

### **7.2.3. Resultados Arrojadados**

La producción total que se obtuvo según el software es de 330,67 mililitros de metano sobre grado de residuo, lo que corresponde a 17723,91 mililitros de metano por día o también 0,018 metros cúbicos por día.

## **8. Análisis Económico**

En la actualidad el gas propano es el más utilizado en las tareas de la cocina en las zonas rurales del país, este se comercializa mediante recargas de pipetas o tanques de gas generalmente de 40 libras lo que corresponde a 24 metros cúbicos de propano. La implementación de este tipo de gas muchas veces es la mejor alternativa cuando no se

cuenta con una acometida de gas natural cercana, sin embargo se debe tener en cuenta que las pipetas tienen la desventaja de estar en constante recarga, lo cual es bastante molesto por el peso del tanque o pipeta y muchas veces no se cuenta con una buena distribución y comercialización del gas por parte de las empresas.

Una pipeta de gas propano de 40 libras se comercializa a partir de los 40.000 pesos colombianos y la recarga del gas propano para este tanque equivale a 26.500 pesos. Con respecto al gas natural doméstico, el metro cuadrado para el año 2021 tiene un precio unitario de 1.865,46 pesos, la instalación y acometida de gas tiene un costo único durante toda la vida del proyecto de 27.870 el metro de tubería y finalmente se debe considerar el valor de las revisiones periódicas las cuales tienen un costo de 79.287 para uso residencial y 121.761 para uso comercial. Todos estos valores son cargados de manera mensual a la factura residencial con su respectivo consumo y valores unitarios.



Gráfica 32. Factura Gas Natural Domestico

<b>Cuenta / Referencia de pago:</b> <b>61331004</b>		<b>Factura electrónica de venta</b> F15112878724					
Cliente: EDITH CRISTANCHO		Fecha y Hora de Generación: 2021/04/19 15:20:52					
Dirección de servicio: CL 48A SUR 79B 0043 101 00203		Fecha y Hora de Expedición: 2021/04/20 10:19:51					
Municipio: BOGOTA		Forma de pago: Crédito 11 días					
CUFE: c05ae70df1157908afb8134438fdd1027915932018f4c3273ce1e29ffec728230bf964d93e29cbb2e857242812d184e							
Componentes tarifarios: Gnc: 759.56 Tm: 606.53 Dm: 452.75 Cm: 1865.46 .p: 46.62 Cufm: 3.150.0 CUnm: 1865.48 Cvm: 0.0 Ccm: 0.0 Fpcm: 42.624 M3/m3 su consumo en M3 de gas equivale a: 142 Kwh y el precio unitario de Kwh es: 179.828 DAUR: 0.0 DAURR: 0.0							
① Código	Conceptos de cargo	Und	Cantidad	Valor unitario	Subtotal	IVA 19%	Total
ZACUV	CONSUMO GAS	M3	12.0	1.865,46	22.385,52	0,00	22.385,52
ZACFJO	FIJO	UN	1.0	3.150,00	3.150,00	0,00	3.150,00
ZDECENAA	JUSTE DECENA	UN	1.0	4,48	4,48	0,00	4,48

Somos grandes distribuyentes Resplandor S.A. No. 49 del 17-Jul-1998 Autorización de Numeración de Facturas No. 1 hasta 50000000 con vigencia de 18 meses Facturación electrónica desde N° 1

Escaneado con CamScanner

*Fuente: Propia*

En la ciudad de Bogotá, al sur occidente de la ciudad, en el barrio Kennedy, categorizado como estrato 3, una familia conformada por dos personas adultas consume alrededor de 12 metros cúbicos por mes tal como se representa en la factura mensual de la Gráfica 32. Una pipeta de gas de 40 libras tiene autonomía de 30 días para una familia conformada por 5 personas (3 adultos, 2 niños), empleándose solo en la cocina.

A partir de los residuos que se estudiaron en la Institución Educativa el Prado calculó una producción de 1,6 metros cúbicos de biogás por día. Si se emplearan los mismos residuos durante los 20 días de funcionamiento del restaurante, se podría obtener un total de 32

metros cúbicos, lo cual fácilmente podría cubrir la demanda mensual de gas propano de una familia o el consumo de gas natural de una familia de 5 personas en la ciudad de Bogotá.

## 9. Conclusiones

- A través de la recolección de residuos en la Institución Educativa el Prado, se evidencio como un buen manejo de los residuos puede generar un gran impacto ambiental, social y económico.
- Se identificaron las ventajas técnico económicas de la implementación de la digestión anaerobia, sin embargo es necesario garantizar mayor información por parte de equipos disciplinarios con el fin de desarrollar nuevos y mejorados sistemas de digestión, ganando así la confianza y aceptación por parte de las poblaciones a desarrollar este tipo de sistemas.
- Se evidencian oportunidades de mejora en los procesos de digestión, garantizando y facilitando el manejo de los residuos, permitiendo que la operación de los digestores sea más fácil, reduciendo el tiempo y el esfuerzo por parte del operario.
- La producción de energía no contaminante a través de esta alternativa se puede categorizar como la que mejor se acomoda a las condiciones rurales, así mismo es una alternativa económica y de fácil funcionamiento.

## 10. Referencias Bibliográficas

Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755– 781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>

IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C. Retrieved from [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA\\_2014.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf)

Resolución 031 de 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillados públicos y se dictan otras disposiciones. 17 de marzo de 2015.

AEPC/NRREP. (2013). Manual Model Biogas Plant. Khumaltar, Lalitpur. Retrieved from [http://www.aepc.gov.np/docs/resource/resgfm/20140708033708\\_Construction Manual.pdf](http://www.aepc.gov.np/docs/resource/resgfm/20140708033708_Construction Manual.pdf)

Castro, L., Escalante, H., Jaimes-Estévez, J., Díaz, L. J., Vecino, K., Rojas, G., & Mantilla, L. (2017). Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource Technology*, 239, 311–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.035>

Chernicharo, C. (2007). Anaerobic Reactors. *Biological Wastewater Treatment* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Chen, Q., & Liu, T. (2017). Biogas system in rural China: Upgrading from decentralized to centralized? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(January 2016), 933–944.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.113>

Garfi, M., Martí-Herrero, J., Garwood, A., & Ferrer, I. (2016). Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 599–614. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.071>

Hilbert, J. (2010). Manual para la producción de biogas. I.N.T.A. - Castelar. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Retrieved from

[https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_la\\_produccion\\_de\\_biogs\\_del\\_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)

IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D. C. Retrieved from [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA\\_2014.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf)

Gomes, K. (2009). Wastewater management. Jaipur, India: Oxford Book Co. Retrieved from <http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=583878>

Huerta, I., Butti, M., Intaschi, D., Masigogge, J., Pusineri, L., & Justianovich, S. (2016). Generación de Biogás : experiencia del tambo La Natividad, Coronel Dorrego, Buenos

Aire. (E. INTA, Ed.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Retrieved from  
[https://inta.gob.ar/sites/default/files/contenido\\_biogas-inta\\_ipaf\\_pampeana.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/contenido_biogas-inta_ipaf_pampeana.pdf)

Khan, E. U., & Martin, A. R. (2016). Review of biogas digester technology in rural Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 247–259.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.044>

Jantrania, A. R., & Gross, M. A. (2006). *Advanced Onsite Wastewater Systems Technologies*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

López, R. A. (1995). *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Martí-Herrero, J., & Cipriano, J. (2012). Design methodology for low cost tubular digesters. *Bioresource Technology*, 108, 21–27.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.117>

Martí, J. (2008). *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*. Bolivia. Retrieved from [http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/10bib\\_arch.pdf](http://www.cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/10bib_arch.pdf)

Werner, U., Stohr, U., Hees, N., Zusammenarbeit., D. G. fur T., & Exchange., G. A. T. (1989). *Biogas plants in animal husbandry : a practical guide*. Braunschweig; Wiesbaden: Vieweg.

Massoud, M. A., Tarhini, A., & Nasr, J. A. (2009). Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. *Journal of Environmental*

Ministerio de Energia de Chile. (2011). *Manual de Biogás*. (Ministerio de Energia de Chile, PNUD, FAO, & GEF, Eds.). Santiago de Chile: FAO. Retrieved from [www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf](http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf)

Olaya, Y., & Gonzalez, L. (2009). *Fundamentos para el diseño de biodigestores. Modulo para la asignatura de construcciones agrícolas*. Palmira.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Mutungwazi, A., Mukumba, P., & Makaka, G. (2018). Biogas digester types installed in South Africa: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 172–180.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.051>

Vögeli, Y., Riu, C., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries*. Sandec: Department of Water and Sanitation in Developing Countries. <https://doi.org/10.13140/2.1.2663.1045>

Mwirigi, J., Balana, B. B., Mugisha, J., Walekhwa, P., Melamu, R., Nakami, S., & Makenzi, P. (2014). Socio-economic hurdles to widespread adoption of small-scale biogas

digesters in Sub-Saharan Africa: A review. *Biomass and Bioenergy*, 70, 17–25.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.018>

Otis, R. J. (2010). Decentralized Wastewater Treatment [Figura]. Retrieved from

<http://slideplayer.com/slide/9317388/>

Riffat, R., & Press, C. R. C. (2013). *Fundamentals of wastewater treatment and engineering*. BOOK, Boca Raton; London: CRC Press ; IWA Publishing.

Parkinson, J., Tayler, K., Ludovico, P., Goiás, G., & Rh, W. S. (2003). Decentralized wastewater management in peri-urban areas in low-income countries, 75–90.

Rupf, G. V., Bahri, P. A., de Boer, K., & McHenry, M. P. (2017). Development of an optimal biogas system design model for Sub-Saharan Africa with case studies from Kenya and Cameroon. *Renewable Energy*, 109, 586–601.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.048>

Roopnarain, A., & Adeleke, R. (2017). Current status, hurdles and future prospects of biogas digestion technology in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67,

1162–1179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.087>

anBuren, A. (1979). *A Chinese Biogas Manual. A Chinese Biogas Manual Popularising Technology in the Countryside*. Londres, UK. Retrieved from [http://www.fastonline.org/CD3WD\\_40/JF/432/24-572.pdf](http://www.fastonline.org/CD3WD_40/JF/432/24-572.pdf)

SEMARNAT. (2010). *Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores en México*. México. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/CD001057.pdf>

Shen, Y., Linville, J. L., Urgun-Demirtas, M., Mintz, M. M., & Snyder, S. W. (2015). An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 346–362. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.129>

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Eddy., M. &. (2003). *Wastewater engineering : treatment and reuse*. Boston: McGraw-Hill.

Somanathan, E., & Bluffstone, R. (2015). Biogas: Clean Energy Access with Low-Cost Mitigation of Climate Change. *Environmental and Resource Economics*, 62(2), 265–277. <https://doi.org/10.1007/s10640-015-9961-6>





