

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y
AMBIENTAL**

CARRERA PROFESIONAL INGENIERÍA AMBIENTAL



**“ELABORACIÓN DE UN BIODIGESTOR PILOTO TUBULAR PARA
EL MANEJO DE ESTIÉRCOL PORCINO, EN UNA DE LAS
VIVIENDAS DE LA ASOCIACIÓN AGROPECUARIA LOS
LÚCUMOS DE PACHACAMAC”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER

YAUYO RAMOS, LUZ MARINA

**Villa El Salvador
2016**

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis Padres ya que son el principal pilar en mi vida y me enseñaron a valorar el amor, esfuerzo y comprensión que siempre me brindaron.

A mis hermanos mayores por su dedicación y enseñanza. A mi hermano menor Aldo que desde el cielo me da las fuerzas para seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento:

A la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, por la formación académica brindada a mi persona.

A mis profesores, por su amplia colaboración y exigencia en el estudio durante mi formación profesional.

A mi asesor el Ingeniero Huamán Huatuco Fernando por su orientación y confianza a mi persona.

A mis amigos y compañeros de la universidad, y a todas las personas que siempre me dieron palabras de aliento y que de alguna manera colaboraron para la realización de este trabajo.

INDICE

LISTADO DE FIGURAS.....	vii
LISTADO DE TABLAS.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la Realidad Problemática.....	3
1.2 Justificación del Proyecto.....	4
1.3 Delimitación del Proyecto.....	4
1.4 Formulación del Problema.....	5
1.5 Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación.....	6
2.2 Bases Teóricas.....	10
2.2.1 Legislación Ambiental.....	10
2.2.2 Impacto Ambiental en la producción porcina.....	13
2.2.2.1 Contaminación en las explotaciones porcinas.....	13
2.2.3 Estiércol.....	17
2.2.3.1 Estiércol de cerdo.....	18
2.2.3.2 Composición del estiércol.....	21
2.2.3.3 Usos potenciales del estiércol.....	23
2.2.3.4 Aprovechamiento del estiércol para la producción de biogás.....	25
2.2.3.5 Contaminación por el estiércol.....	26
2.2.4. Digestión Anaeróbica.....	28
2.2.4.1 Proceso de digestión anaerobia.....	28

2.2.4.2 Proceso microbiológico y bioquímico de las etapas de la digestión anaerobia.....	29
2.2.5 Biogás.....	35
2.2.5.1. Características del biogás.....	37
2.2.5.2. Factores importantes para la producción de biogás.....	38
2.2.5.3. Utilización del biogás.....	43
2.2.6. Bioabono / biol.....	43
2.2.7. Biodigestor.....	45
2.2.7.1. Tipos de biodigestores.....	48
2.2.7.2. Biodigestor Tubular.....	51
2.3. Marco conceptual.....	60

CAPÍTULO III: DISEÑO/ DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA/ MODELO/SISTEMA

3.1. Análisis del modelo/ herramienta/sistema.....	63
3.1.1. Lugar de investigación.....	63
3.1.2. Procedimientos y equipos.....	64
3.1.2.1. Etapas del proyecto.....	64
3.2. Construcción, diseño o simulación de la herramienta/modelo/ sistema....	77
3.2.1. Calculo de diseño.....	77
3.2.1.1. Volumen del biodigestor.....	77
3.2.1.2. Diámetro del biodigestor.....	80
3.2.1.3. Longitud del biodigestor.....	80
3.2.1.4. Cálculo de la presión hidrostática en el interior del biodigestor.....	81
3.2.1.5. Estimación de la producción de biogás.....	83
3.2.1.6. Producción de bioabono.....	84
3.2.2. Construcción del biodigestor tubular.....	84
3.2.2.1. Construcción de la zanja.....	85
3.2.2.2. Construcción del biodigestor.....	86
3.2.2.3. Instalación del biodigestor.....	87

3.2.2.4. Conducción del biogás.....	88
3.2.2.5. Válvula de seguridad.....	89
3.2.2.6. Filtro.....	90
3.2.2.7. Reservorio de biogás.....	91
3.2.3. Operación del biodigestor.	92
3.2.3.1. Carga inicial.	94
3.2.3.2. Estabilización.....	94
3.2.3.3. Cargas diarias.....	96
3.3. Revisión y consolidación de resultados.....	97
3.3.1. Cálculos de diseño.....	97
3.3.2. Temperaturas promedio obtenidas en el interior del invernadero y ambiente.....	98
3.3.3. Variación del PH durante el proceso anaeróbico.....	101
3.3.4. Volumen de biogás producido.....	102
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFIA.....	106
ANEXOS.....	115

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica.	30
<i>Figura 2.</i> Formación de los monómeros en la hidrólisis.	32
Figura 3. Esquema general de la degradación acetogénica.	33
Figura 4. Tiempo de retención en función de la temperatura.	42
<i>Figura 5.</i> Biodigestor tipo chino.	49
Figura 6. Biodigestor de domo flotante.	50
Figura 7. Biodigestor de estructura flexible (Polietileno).	50
Figura 8. Esquema general de un biodigestor tubular.	53
Figura 9. Tanque de biogás (Polietileno).	54
Figura 10. Sistema de conducción de biogás.	54
Figura 11. Válvula de seguridad.	55
Figura 12. Purificador de biogás.	57
<i>Figura 13.</i> Forma de la zanja, con sus dos cortes.	58
Figura 14. Distribución de la presión dentro del biodigestor.	59
Figura 15. Vista transversal de la zanja.	69
Figura 16. Variación de la temperatura.	99
Figura 17. Variación del PH durante el proceso anaerobico.	101
Figura 18. Producción de biogas en funcion del tiempo de retención.	102

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Partículas causantes del mal olor en las heces del cerdo	16
Tabla 2. Producción de materia fecal y orina como proporción del peso vivo.	20
Tabla 3. Composición media de estiércoles frescos de diferentes animales domésticos (como porcentaje de la materia seca).	22
Tabla 4. Relación del contenido de nitrógeno y carbono en estiércol porcino comparado con otras razas.	22
Tabla 5. Características de las fases microbiológicas de la biomasa.	35
Tabla 6. Composición porcentual del biogás	37
Tabla 7. Relación carbono / nitrógeno de acuerdo al tipo de sustrato.	39
Tabla 8. Relación carbono / nitrógeno de acuerdo al tipo de sustrato.	40
Tabla 9. Rangos de temperatura de fermentación anaeróbica.	40
Tabla 10. Tiempo de retención según la temperatura.....	41
Tabla 11. Rangos de PH en la generación de biogás.....	42
Tabla 12. Sistemas utilizados en la biodigestión.	47
Tabla 13. Dimensiones de la zanja	69
Tabla 14. Estimación de la proporción de sólidos totales contenidos en la carga diaria.	72
Tabla 15. Factores de producción de biogás.....	74
Tabla 16. Lista de materiales utilizados en la construcción y armado del biodigestor. ..	76
Tabla 17. Determinación de la cantidad de excretas diarias.	78
Tabla 18. Resultados de los cálculos de diseño del biodigestor.....	97
Tabla 19. Temperaturas promedio obtenidas para el TR.	98

INTRODUCCIÓN

La contaminación del ambiente sugiere la necesidad de asumir una nueva actitud de administración y desarrollo sostenible, para conservar y al mismo tiempo mantener la sostenibilidad de los recursos. La mitigación de estos impactos ambientales impone mejorar las prácticas actuales de gestión para lograr un tratamiento adecuado de los residuos que se generan, con el consecuente aprovechamiento ecológico de los mismos. El tratamiento y depuración del estiércol y otros desechos orgánicos producidos por los animales en las instalaciones agropecuarias forma parte de estas mejoras.

Una de las formas en que se puede tratar el estiércol para reducir la contaminación, atribuible a explotaciones pecuarias, es mediante el proceso de biodigestión anaeróbica. La creación de un sistema de este tipo que permita captar la producción de biogás proveniente de las excretas de animales descompuestas en biodigestores, permite contar con una fuente alternativa de energía y a la vez disminuir la liberación al ambiente de gases de efecto invernadero.

El presente trabajo se encuentra enfocada en el diseño e implementación de un biodigestor piloto tubular en La Asociación Agropecuaria Los Lúcumos de Pachacamac, con el objetivo de que se difunda entre los pobladores ya que es una alternativa energética no muy costosa, de fácil acceso de la cual se puede obtener varios beneficios entre los principales tenemos: el tratamiento del estiércol proveniente del ganado porcino transformándolo en un tipo de abono fácilmente

asimilable por los suelos y como producto de esta degradación la producción de biogás que puede ser utilizado tanto para cocinar y en algunos casos para la generación de energía eléctrica, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida de los pobladores agropecuarios.

El trabajo consta de 3 capítulos. En el capítulo I se desarrolla de manera clara y precisa la descripción realidad problemática, justificación del problema, delimitación del área de estudio, formulación del problema y por último el establecimiento de los objetivos.

En el capítulo II se desarrolla el marco teórico en el cual se dan a conocer los antecedentes tanto a nivel nacional como internacional explicando de manera precisa las metodologías y conclusiones a las que llegaron cada autor. Además se desarrollan las principales definiciones y conceptos utilizados en la temática.

En el capítulo III, se describe detalladamente la metodología a desarrollar para la elaboración del biodigestor así como también los cálculos respectivos para el dimensionamiento.

Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones que fueron fruto de la investigación, así como la bibliografía consultada y algunos anexos que se consideraron de vital importancia.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la Realidad Problemática

Este proyecto se realizó en La Asociación agropecuaria Los Lúcumos de Pachacamac, la cual está ubicada en las Lomas de Lúcumo del distrito de Pachacamac - provincia de Lima, a 87 msnm, de clima húmedo con temperaturas que van desde 20 – 25 °C.

La asociación agropecuaria cuenta con más de 200 propietarios de terreno, de los cuales el 80% está dedicado a la crianza del ganado porcino. Actualmente la crianza de estos cerdos no cumple con los criterios sanitarios que se exigen, dado que estos son para consumo humano; ello está generando un mal manejo de los desechos orgánicos del ganado ya que son dispuestos libremente al ambiente , trayendo consigo la presencia de malos olores, focos infecciosos, alteración del paisaje, contaminación de mantos freáticos, etc.

1.2. Justificación del Problema

El presente proyecto se justifica ya que el biodigestor es una tecnología limpia que ayuda a un adecuado manejo de los residuos que genera el ganado porcino, creando así una alternativa para la producir energía renovable importante para las actividades de los propietarios del lugar, además esta opción sería una alternativa para prevenir la degradación de los suelos, atenuación del cambio climático, preservación del recurso hídrico y biodiversidad.

Además producto de la degradación anaeróbica del estiércol porcino dentro del biodigestor se obtendrán beneficios como la generación de biogás el cual puede tener un uso similar al GLP y la obtención de bioabono rico en nutrientes que al ser dispuestos en el suelo es fácilmente asimilable. Estos productos generaran un mayor ingreso económico para las familias porcicultoras ya que no gastaran en el consumo de gas y uso fertilizantes para sus cultivos.

1.3. Delimitación del Proyecto:

El presente proyecto se realiza en una de las viviendas de los criadores porcinos de la Asociación de Producción agropecuaria los Lúcumos de Pachacamac, ubicada en el distrito de Pachacamac – Lima. El propietario de esta vivienda posee un terreno de 200 m². de terreno del cual abarcaremos 5 m², así mismo se cuenta con 2 cerdos de 7 meses con 50kg de peso cada uno, que generan a diario un promedio

de 4 kg de excremento, los cuales actualmente no cuentan con una disposición adecuada y son arrojadas al aire libre, generando malos olores y la presencia de moscas.

1.4. Formulación del Problema

¿La elaboración de un biodigestor piloto tubular contribuirá en el manejo del estiércol porcino de una de las viviendas de La Asociación Agropecuaria Los Lúcumos de Pachacamac?

1.5. Objetivos:

1.5.1. Objetivo General:

Elaborar un biodigestor piloto tubular para el manejo de estiércol porcino, en una de las viviendas de La Asociación Agropecuaria Los Lúcumos de Pachacamac.

1.5.2. Objetivos Específicos:

- Cuantificar el volumen de estiércol porcino que se genera a diario dentro de la granja.
- Dimensionar, diseñar y construir el biodigestor de acuerdo a las condiciones de la zona.
- Obtener biogás y fertilizantes orgánicos (bioabono).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Bautista, (2010), realizó la investigación: Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos, en el Departamento de Ciencias de la Universidad de Carlos III, Madrid – España. El proyecto tuvo como objetivo la construcción de un biodigestor y la creación de una metodología que permita la replicación de dicha tecnología. El proyecto se centra en dos líneas; una parte experimental y otra orientada a la práctica constructiva de tres biodigestores portátiles para su uso como herramienta docente en la universidad. La parte experimental consistió en los análisis de la digestión dentro de los tres biodigestores portátiles con el fin de caracterizar la biodigestión de cada uno de los desechos orgánicos anteriormente citados. En la parte práctica se propuso un sistema biodigestor para una finca, cuyo diseño estuvo basado sobre los resultados experimentales, teniendo en cuenta las condiciones de terreno, disponibilidad de agua y otros recursos locales. Durante

este proyecto se pudo comprobar que cuando había días más calurosos los biodigestores funcionaban mucho mejor que en días fríos o por las noches.

Jaramillo, (2010), realizó la investigación: Plan piloto de biodigestores para el aprovechamiento de las heces de porcino obteniendo biogás y biofertilizantes, en la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Las Américas, Quito - Ecuador. El proyecto tuvo como objetivo principal el aprovechar los recursos inherentes en el estiércol porcino como son el biogás y el biofertilizante, con el propósito de contrarrestar la contaminación y generar energía mediante un recurso renovable. La investigación tubo como conclusión que si se cuenta con condiciones de temperatura no óptima existe la posibilidad de adicionar microorganismos para acelerar el proceso de biodigestión, además la selección, diseño y construcción del biodigestor se fundamenta del estiércol obtenido diariamente en la finca.

Moreto, (2013), realizó la investigación: Diseño de un biodigestor de estiércol porcino para una granja agrícola ubicada en el barrio La Morita, parroquia de Tumbaco para el año 2012-2013, en la Facultad de Ciencia Ambientales de la Universidad Internacional Sek, Quito – Ecuador. Esta investigación tuvo como objetivo principal el desarrollar una alternativa de manejo ambiental de los residuos (estiércol) que produce la actividad ganadera, apoyando así el desarrollo de la granja con la implementación de un biodigestor para la producción de energías renovables y fertilizantes orgánicos, reduciendo así los costos por consumo de servicios básicos y fertilizantes químicos respectivamente dentro de dicho lugar.

Este trabajo concluyo en que para obtener productos de calidad del biodigestor se deben tener en cuenta el diseño con las medidas apropiadas y materiales adecuados. El presente proyecto nos sirve de referencia en el establecimiento de los parámetros necesarios para el dimensionamiento de nuestro biodigestor y los procedimientos a realizar para obtener productos de calidad.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Ruiz,(2010), realizó la investigación: Mejora de las condiciones de vida de las familias porcicultoras del Parque Porcino de Ventanilla, mediante un sistema de biodigestión y manejo integral de residuos sólidos y líquidos, Lima, Perú, en el departamento de Ingeniería Química de La Universidad Ramón Llull, Barcelona – España. El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal trabajar en la mejora de la gestión de los residuos sólidos, en la mejora de las granjas y de los planes de manejo y alimentación de los cerdos, en el tratamiento de los residuos sólidos y líquidos con el fin de mejorar las condiciones sanitarias y obtener subproductos susceptibles de ser utilizados. El trabajo realizado concluye en que la mejora de las granjas es un tema clave para empezar cualquier programa de construcción de biodigestores, tanto en el parque Porcino de Ventanilla como en cualquier otro lugar de crianza de cerdos, donde las granjas cuenten con instalaciones precarias.

Lozano, (2012), realizó la investigación: Diseño de biodigestores para las familias caprinocultoras de la cuenca baja del Río Chillón, en la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú. El presente proyecto tuvo como objetivo principal evaluar la implementación de un biodigestor modelo tubular estándar de bajo costo, de fácil manejo y construcción; aplicable a las condiciones existentes en los hatos de los caprinocultores de la cuenca baja del río Chillón contribuyendo a mejorar el tratamiento de excretas caprinas y brindar energía para el funcionamiento de una cocina familiar. El proyecto concluye en que es absolutamente necesario determinar el número de animales y las condiciones de manejo que tiene la explotación del ganado.

Cueva, (2012), realizó la investigación: Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua, en la Facultad de Ciencias de La Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna – Perú. El objetivo de la investigación fue producir biogás a partir de estiércol porcino y residuos orgánicos, por fermentación semicontinua, la parte experimental del proyecto se realizó en un laboratorio de la universidad, ahí la muestra del estiércol porcino y restos vegetales previamente prefermentados fueron dispuestos en un biodigestor tipo chino modificado de fibra de vidrio para fermentarse en su totalidad. El trabajo de investigación concluyo en que la producción de biogás está influenciada por varios factores como son el tipo de substrato fermentativo, la temperatura, el tipo de fermentación, la relación carbono nitrógeno en el substrato entre otros.

2.2. Bases Teóricas:

2.2.1. Legislación Ambiental.

Ley General del Ambiente, Ley Nro. 28611

Capítulo 3. Calidad ambiental.

Artículo 119.- Del manejo de los residuos sólidos.

La gestión de los residuos sólidos de origen doméstico, comercial o que siendo de origen distinto presenten características similares a aquellos, son de responsabilidad de los gobiernos locales. La gestión de residuos sólidos distintos a lo señalado son de responsabilidad del generador hasta su adecuada disposición final, bajo las condiciones de control y supervisión establecidas en la legislación vigente.

Ley General de Residuos sólidos, Ley Nro. 27314

DECRETO SUPREMO Nº 016-2012-AG

Reglamento de Manejo de los Residuos Sólidos del Sector Agrario.

Artículo 29.- Gestión de los residuos de actividades de crianza y faenamiento de animales mayores (bovinos, porcinos, ovinos, camélidos sudamericanos domésticos, caprinos y équidos):

Las deyecciones animales con restos de cama, alimentos y agua en cantidades variables, que resultan del sistema productivo de los animales y que presentan consistencia fluida, con un contenido aproximado de sólidos menor al 12% pueden ser reaprovechados en los cultivos agrícolas como abono órgano mineral, para lo cual deberán disponer de balsas de estiércol, cercadas e impermeabilizadas, natural o artificialmente, que eviten el riesgo de infiltración y contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, asegurando que se impidan pérdidas o rebosamiento por inestabilidad geotécnica, con el tamaño preciso para poder almacenar la producción de al menos tres meses, que permitan la gestión adecuada de los mismos. El tratamiento de la deyección de los animales, pueden darse mediante compostaje, secado artificial y otros, con la finalidad de transformarse en un producto orgánico estable, con características óptimas para su utilización en cultivos agrícolas. Asimismo, estos residuos pueden ser aprovechados energéticamente, mediante técnicas de fermentación anaerobia, para la producción y el aprovechamiento de biogás. Otros sistemas de tratamiento susceptibles son la incorporación de aditivos, separación sólidos líquidos y nitrificación-desnitrificación.

Dirección General de Salud Ambiental [DIGESA], (2002, p.15).

Refiere que el acondicionamiento de los residuos sólidos generados por la actividad no debe estar expuestos al medio ambiente a fin de evitar los malos olores, la presencia de vectores y roedores y preservar el ambiente. Las excretas deben ser dispuestas en un estercolero, ubicado en un área alejada de los corrales

evitando el acceso al área por parte de animales o de personas no autorizadas para su manejo. Se debe evitar su acumulación y su recolección o disposición sanitaria debe ser oportuna para evitar malos olores y la contaminación ambiental.

Las crías de cerdos deben contar con un Programa de Higiene y Saneamiento en el cual se establezcan como mínimo, los criterios, frecuencias y responsabilidades para la limpieza y desinfección de las diferentes áreas del establecimiento, acondicionamiento y disposición de residuos sólidos y excretas, control de la calidad del agua, prevención y control de vectores, entre otros. Los corrales deben ser limpiados diariamente y desinfectados después de cada saca, considerando un descanso sin animales no menor de 15 días entre ciclo de crianza.

Protocolo de Kioto.

El protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir el 5% las emisiones de seis gases provocadores del calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆).

El Perú en el año 2012 establece un segundo período de compromisos para los años 2013 – 2020. Esto con el fin de continuar con la tarea de estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2.2. Impacto Ambiental en la producción porcina.

2.2.2.1. Contaminación en las explotaciones porcinas:

La explotación porcina genera contaminación tanto de las aguas como del suelo y del aire. Contaminación que puede variar de acuerdo al estado fisiológico de los animales y al tipo de alimentación utilizada, cuyo nivel de afectación dependerá de la cantidad de agua usada, de que si se hace o no separación de sólidos y del manejo dado a los residuos. Concellón (1974).

A. Contaminación del agua.

Barons (2005) menciona que “En el sector agrícola y ganadero, la contaminación de agua a nivel superficial y de subsuelo generalmente se produce por vertidos inadecuados, pérdidas de deyecciones ganaderas de las zonas de almacenaje y abonados en general”.

Para Hernández (2010) la lixiviación es uno de los principales efectos contaminantes de las aguas, la cual se produce porque al no retener el suelo el excedente de nutrientes, éstos se filtran a través del medio líquido hasta llegar a los acuíferos; éste fenómeno se da principalmente en la contaminación por nitratos y especialmente en otoño e invierno, cuando no hay actividad vegetativa.

Según Margalef (1991), uno de los problemas derivado de la lixiviación es la eutrofización este fenómeno se produce cuando el agua recibe gran cantidad de nutrientes como el nitrógeno, fósforo o potasio, que las algas necesitan para su crecimiento, de tal manera que proliferan desmesuradamente y el agua aparece turbia y verde. Para descomponer los restos de algas que mueren, las bacterias descomponedoras consumen mucho oxígeno que pronto será insuficiente. La falta de oxígeno provoca la muerte masiva de peces, algas y otros organismos. En estas condiciones se multiplican los microorganismos anaerobios, es decir, que descomponen la materia orgánica sin necesidad de oxígeno, pero que desprenden metano, ácido sulfúrico y otras sustancias de olor y gusto desagradables y a veces tóxicos.

El uso de determinados detergentes, abonos, estiércoles y purines constituye la causa principal de la eutrofización, dado que aportan al agua gran cantidad de nitratos y fosfatos. Hernández (2010).

B. Contaminación del suelo.

En general los porcicultores reciclan las excretas sólidas en terrenos de cultivo; la mayor porción se lo hace en fresco. Las excretas son recogidas manualmente y son depositadas directo al suelo en donde, en ciertos casos, se mantienen frescas evitando el proceso de descomposición y

contaminando la zona. Otras explotaciones acumulan las heces en un estercolero, en donde se apilan por meses y se deshidratan. Las corrientes de agua de lluvia arrastran los nutrientes de las excretas a terrenos más bajos, o por lixiviación, a cuerpos de agua superficiales o subterráneos, dejando el cultivo mal abonado y la zona contaminada. También podría contaminar el alimento del ganado con excretas frescas que pueden producir enfermedades en los animales y posteriormente en los humanos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], (1986, p.12).

Para Concellón (1974, p.174) las deyecciones de 25 cerdos son suficientes para abonar 1 Ha por un año, pero si se repiten los esparcimientos de las excretas en un cultivo, se aprecia una progresiva concentración de heces en el suelo. Las consecuencias se ven sobre la flora (desaparición del trébol en provecho de las gramíneas), y en el suelo (aumento del contenido en elementos como el cobre y cloro que pueden llegar a ser tóxicos). La mala utilización de las heces puede llegar a destruir la textura del suelo y asfixiar los microorganismos y plantas.

C. Contaminación del aire.

Los malos olores que desprende el estiércol porcino a causa de una gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles, representan riesgos para la salud de los trabajadores y de los cerdos de la explotación. El amoniaco

es un irritante por lo que tiende a producir un malestar en los cerdos decreciendo en la ganancia diaria de peso, en exposiciones de amonio de 50 a 150 ppm. Bavera (2007).

Tabla 1.

Partículas causantes del mal olor en las heces del cerdo.

Compuesto	Mínimo (mg. / m ³ .)	Máximo (mg. /m ³ .)
Acido Acético	25,0	1000,0
Acido Propanoico	3,0	890,0
Acido Butanoico	4,0	3000,0
Acido 3 Metil Butanoico (isovalérico)	5,0	5,0
Acido Pentanoico (Valérico)	0,8	70,0
Fenol	22,0	4000,0
Indol	0,6	0,6
4 Metil Fenol	0,2	35,0
3 Metil Indol	0,4	0,8
Metanetiol	0,5	0,5
Dimetil Sulfito	2,0	30,0
Dimetil Disulfito	3,0	14,0
Dimetil Trisulfito	7,3	7,3

Fuente: *Construcciones Prácticas Porcinas*, (p. 174), por Concellon A., 1974, Barcelona - España.

En la tabla 1. se cuantifican los principales contaminantes de las excretas porcinas pueden dividirse a su vez en: físicos como la materia orgánica y los sólidos en suspensión; químicos como el nitrógeno, el fósforo y el potasio excretados y el olor el cual es ocasionado por una gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles. Concellón (1974).

2.2.3. Estiércol

Según el autor Urbano (2001), citado por Moreto (2012, p.29.), sostiene que:

El estiércol natural está formado por las excreciones sólidas y líquidas del ganado, mezcladas con los materiales que le sirven de cama. El conjunto constituye un producto que empieza a descomponerse en el alojamiento del ganado.

De acuerdo con el estado de descomposición que presentan sus constituyentes, suelen considerarse los siguientes tipos:

- **Estiércol fresco:** Aquellos en que la fermentación no ha hecho más que empezar y aún pueden identificarse en él las camas y las excreciones.
- **Estiércol semi-hecho:** Presentan un estado intermedio de descomposición y, aunque aún es posible distinguir sus componentes, ya se encuentra porciones en que esta identificación no puede hacerse con facilidad.
- **Estiércol maduro:** Muy fermentado; la cama no puede identificarse pues se han descompuesto totalmente.

La materia prima para la producción de biogás y fertilizante es el estiércol fresco. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cáscara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras). Gómez (2014).

El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de cerdo, pero el fertilizante que producen es muy ácido, por ello previo a ingresar al biodigestor se debe realizar un tratamiento a este para que el biol que salga no sea un fermento, sino un fertilizante que sirva para el suelo. (Herrero, 2008, p.21).

2.2.3.1. Estiércol de cerdo

El alimento casi siempre acuoso que se da al cerdo hace que igualmente su estiércol tenga una gran cantidad de agua, por este motivo, se le clasifica entre los abonos frescos. Generalmente al ser alimentados con granos, papas, restos de maleza, sobras de la cocina, etc., hace que su estiércol sea muy bueno para procesos de degradación anaerobia con producción de gas. El estiércol de cerdo con frecuencia contiene altas concentraciones de Cu y Zn comparado con heces de otras especies, debido a que el Cu se adiciona a las raciones, con el fin de aumentar las ganancias de peso y la conversión alimentaria de cerdos de engorde, mientras que el Zn se utiliza para contrarrestar el potencial de toxicidad del Cu, sin embargo

la presencia de estos dos minerales es beneficioso para su uso como abono en los cultivos (García, 2000, p.23).

Para Salazar (2004) la tasa de producción de excretas se puede ver afectada por varios factores, entre los cuales se puede señalar:

- Edad del animal
- Madurez fisiológica
- Cantidad y calidad del alimento ingerido
- Volumen de agua consumida
- Clima.

La producción de porquinaza se cuantifica en términos de cantidades de excretas por día y por animal; puede ser expresada como valores por cada 100 kilos de peso vivo. En la Tabla 2 se muestran las tasas de producción de heces y orina, expresadas como proporción del peso vivo en los diferentes estados fisiológicos. Salazar (2004).

Tabla 2.

Producción de materia fecal y orina como proporción del peso vivo.

Estado	Promedio	Rango
Hembra vacía	4.61	3.3 – 6.4
Hembra gestante	3.00	2.7 -3.2
Hembra lactante	7.72	6.0 -8.9
Macho reproductor	2.81	2.0 -3.3
Lechón lactante	8.02	6.8 -10.9
Precebos	7.64	6.6 -10.6
Levante	6.26	5.9 -6.5
Finalización	6.26	5.7 -6.5

Fuente: *Uso de los desechos de origen animal en México*, (p. 73), por Salazar G., 2004, México.

La orina representa aproximadamente el 45% de la porquinaza, y las heces, el 55%. El contenido de humedad de la porquinaza está alrededor del 88%, y el contenido de materia seca es del 12%. La excreción de sólidos es del 90% en heces y 10% en orina. Salazar (2004).

La densidad de la porquinaza fresca es ligeramente menor de 1.0 Km/l, aunque son comunes las referencias de valores ligeramente superiores a esta cifra. El total de los sólidos tiene una densidad baja, de 0.84 Kg/l. La porquinaza porcina tiene sólidos que flotan, otros que se sedimentan y algunos están en suspensión.

Diariamente se producen 0,25 Kg. de demanda biológica de oxígeno (DBO), y 0.75 Kg. de demanda química de oxígeno (DQO) por cada 100 Kg de peso vivo. Por lo general, la DBO es un tercio de la DQO y cerca de un tercio de los sólidos totales en porquinazas porcinas frescas. Salazar (2004).

El PH varía entre 6.0 y 8.0. Mientras más frescas sean las porquinazas, más neutro será su pH. La alcalinidad y conductividad son propiedades más del agua de lavado y de bebida, que propiamente de la porquinaza. . (Castrillón, Jiménez y Bedoya, 2002, p.73)

La temperatura de la porquinaza fresca al momento de su expulsión es la misma que la del cuerpo del cerdo. Poco después, la porquinaza alcanza la temperatura del piso y de la instalación que estará fuertemente determinada por la temperatura del agua con la cual se mezcle. (p.75).

2.2.3.2. Composición del estiércol:

La porción fecal del estiércol contiene un gran número de ingredientes alimenticios en su forma original. Las excretas contienen sustancias que son transformadas por la actividad metabólica de las bacterias en el tracto digestivo, así como la acción enzimática de los jugos digestivos. Gómez (2014).

La composición nutricional de la porquinaza es afectada principalmente por estas variables: variaciones en la formulación de las dietas utilizadas, el método de procesamiento y manejo de la porquinaza, la etapa productiva, el ambiente y el manejo de los cerdos. Castrillón, et al. (2002, p.74).

A continuación la Tabla 3, muestra una comparación entre los nutrientes encontrados en el estiércol porcino con otros.

Tabla 3.

Composición media de estiércoles frescos de diferentes animales domésticos (como porcentaje de la materia seca).

Nutrientes	Vacunos	Porcinos	Caprinos	Conejos	Gallinas
Materia orgánica (%)	48,9	45,3	52,8	63,9	54,1
Nitrógeno total (%)	1,27	1,36	1,55	1,94	2,38
Fósforo asimilable (P ₂ O ₅ , %)	0,81	1,98	2,92	1,82	3,86
Potasio (K ₂ O, %)	0,84	0,66	0,74	0,95	1,39
Calcio (CaO, %)	2,03	2,72	3,2	2,36	3,63
Magnesio (MgO, %)	0,51	0,65	0,57	0,45	0,77

Fuente: *El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente*, (p. 6), por Gómez G., 2014, Madrid: Copyright 2014 por Editorial Agronotas.

Tabla 4.

Relación del contenido de nitrógeno y carbono en estiércol porcino comparado con otras razas de animales.

Tipo de Estiércol	Carbono	Nitrógeno	C/N
	%		
Vacuno	7	0,5	15
Ave	15	1,5	10
Cerdo	8	0,7	12
Oveja	16	0,8	20
Equino	15	0,5	30
Harina de sangre	35	1,5	2

Fuente: *La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos*, (p. 22), por Sierra C y Rojas C. (2010), Chile: Copyright 2010 por Centro Nacional de Investigación La Platina.

Para Herrero (2008), la composición del estiércol influye también la composición de las raciones alimentarias. Cuantas más ricas son estas en un determinado elemento, mayor es la cantidad que de ese elemento se encuentra en los excrementos. Las camas que se juntan con el estiércol, también influencia según su composición y cantidad, de aquel.

2.2.3.3. Usos potenciales del estiércol

Para López, P., Antonio, C. (2003) El potencial uso del estiércol durante varias generaciones agropecuarias, ha sido la elaboración del compost, esta práctica permite obtener un producto libre de gérmenes patógenos, contrarrestando malos olores, y produciendo sustancias húmicas similares a las del suelo, facilitando la fertilización de los cultivos.

El estiércol no solamente puede ser utilizado para la elaboración de compost, sino también para la producción de biogás y fertilizantes líquidos, sometiéndolo a una degradación en condiciones anaerobias, el biogás producido tiene un alto contenido de metano altamente inflamable, la cual con instalaciones adecuadas, se puede producir energía eléctrica y a su vez ser utilizado en la cocina doméstica. Además se está probando la elaboración de raciones alimentarias para el ganado, debido a la significativa cantidad de proteínas que poseen. Por lo cual es primordial efectuar un acondicionamiento o tratamiento previo de las excretas para lograr con el objetivo. Castrillón, et al. (2002).

➤ **Uso de estiércol como fertilizante.**

Esto se enfoca principalmente en la aplicación directa sobre el suelo, sin embargo la reutilización de N, P y K en la producción vegetal, puede llegar a ser imposible debido a lo limitado de las áreas de tierra disponibles concentrando cantidades excesivas de N, lo que resulta una amenaza para el ambiente. Además no es muy recomendable pues en el caso del estiércol de cerdo el fuerte olor emitido durante su almacenamiento y esparcimiento pueden volverse una verdadera molestia, eliminando al aire CO₂, CH₄, amoníaco, NO_x y otros gases, lo que contribuye al efecto invernadero del planeta. García (2000).

➤ **Utilización de estiércol como compost.**

En los últimos años se ha implementado un sistema llamado “cerdos criados sobre cama o composta in situ”, que consiste en criar a los cerdos en establos con un piso cubierto por aproximadamente 30 cm de aserrín y una mezcla de un producto comercial bacteriano; esta cama permanece durante todo el período de crianza, el producto final contiene grandes cantidades de materia orgánica, N, P, K y elementos trazas, que luego de un tiempo de espera estará libre de patógenos listo para ser aplicado en el suelo. López (2009).

2.2.3.4. Aprovechamiento del estiércol para la producción de biogás.

La digestión anaerobia como bien se ha mencionado es una tecnología ampliamente conocida y utilizada desde hace muchos años, en donde la materia orgánica es transformada en gas metano, que puede ser utilizado como combustible y suplir parte de los requerimientos del lugar donde se necesite. Pérez (2010).

Sin embargo el aprovechamiento de metano a partir de excretas de rumiantes y no rumiantes para la generación de energía, requiere establecer condiciones de temperatura y humedad para tener un proceso eficiente, además de un complejo control microbiano. Pérez (2010).

Ramírez (2010), en la publicación titulada “Emisiones de metano generadas por excretas de animales de granja y contenido ruminal de bovino” realizó un estudio comparativo de biogás total y metano producido por fermentación de excretas de ganado vacuno de engorde y lechero, porcino, borrego, cabra y aves de corral de postura a temperatura ambiente; mediante el cual pudo concluir, que luego de 72 horas de fermentación las muestras de menor a mayor producción de CH₄ fueron gallinaza con 1,5%, estiércol de ganado de engorde con 18,7%, estiércol de ganado lechero con 23,2%, excretas de borrego con 33,2%, excretas de cabra con 33,84% y finalmente estiércol de cerdo con 46,34%.

Robalino (2008), en la publicación “Estudio comparativo y aplicación de materia prima alternativa en biodigestores unifamiliares de flujo continuo en la Zona de Intag.

Cotacachi-Imbabura”, comparó la producción de biogás. Con la utilización de materia prima alternativa, excretas sólidas y líquidas del hombre frente a la materia fecal de cerdos, concluyendo que luego de tres meses de estudio el digestor con excretas humanas más excretas de cerdo presentaron un 61,55% de metano, mientras que el digestor solo con excretas de cerdo registró un 64,23%, considerando que no existe mayor diferencia entre ellos.

En el estudio “Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos” Sogari (2003), realizó pruebas con excremento de vaca, excremento de cerdo y mezcla de restos de ensilado y maíz, con lo cual pudo concluir, que la velocidad de generación de gas fue mayor al usar estiércol de cerdo, además obtuvo 85 Litros de metano con excremento de vaca, 110 Litros con excremento de cerdo y 135 Litros con la mezcla de restos de ensilado y maíz.

2.2.3.5. Contaminación por el estiércol:

Según La Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], (2015, p.10). “El sector ganadero es uno de los principales responsables del efecto invernadero en el mundo y resulta más nocivo que el sector del transporte.”

(p.13). “La ganadería no sólo amenaza al medio ambiente sino que también es una de las principales causas de la degradación del suelo y de los recursos hídricos.”

(p. 14). El sector ganadero es responsable del 9 por ciento del CO₂ procedente de las actividades humanas, pero produce un porcentaje mucho más elevado de los gases de efecto invernadero más perjudiciales. Además genera el 65% del óxido nitroso de origen humano, que tiene 296 veces el Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés) del CO₂. La mayor parte de este gas procede del estiércol, señalan los expertos.

La principal forma de contaminación del estiércol es la polución con nitratos del agua que puede utilizarse posteriormente para consumo como potable, pero no hay que olvidar la posible contaminación que pueden producir los malos olores que desprende. (Gómez, 2014, p.4)

Existe gran cantidad de pequeños productores que no dan tratamiento alguno al estiércol y lo arrojan a pequeñas fosas o incluso directamente a pozos o partes bajas de la granja propiciando serios problemas de contaminación por coliformes y nitratos en suelos y acuíferos. (Vázquez y Manjarrez, 1993, p.13).

Las excretas contienen nutrientes que los cultivos pueden utilizar, pero también poseen altas concentraciones de coliformes fecales que producen enfermedades infecciosas, capaces de causar hasta la muerte en los humanos. Por ello, para utilizarlas como fertilizantes, es necesario darles un tratamiento que elimine estos agentes infecciosos. Una forma de hacerlo es mediante la biodigestión. Al usar un biodigestor se utilizan los nutrimentos contenidos en las excretas y, además, se

reduce la contaminación ambiental, ya que convierte las excretas que contienen microorganismos patógenos como bacterias, protozoos, larvas, huevos, pupas de insectos, etc., en residuos útiles y sin riesgo de transmisión de enfermedades.(p.15).

2.2.4. Digestión Anaerobia.

García (2009, p.22) La digestión anaeróbica es la degradación biológica u oxidación del material orgánico, donde interviene microorganismos específicos en ausencia de aire (oxígeno molecular). En este proceso el material a degradar se transforma en dos productos utilizables, el uno en un producto estable e inerte llamado biol y el otro en biogás con un alto contenido de metano, ambos productos de este proceso poseen cualidades energéticas.

La degradación anaerobia interactúan diferentes grupos microbianos, haciendo un proceso complejo, pero de manera coordinada y secuencial para la degradación de la materia orgánica.

2.2.4.1. Proceso de digestión anaerobia.

Bermúdez, Cánovas, Manjon, Iborra, y Howel (1988) mencionan que la digestión anaerobia es un proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno.

La fermentación es uno de los mecanismos de degradación de la biomasa más frecuente en la naturaleza, y en la actualidad conocido como el proceso unitario de tratamiento de digestión anaerobia, es empleado como bien lo menciona Pérez (2010), para la depuración de aguas residuales, fangos procedentes de la industria química, alimentaria, papelera, residuos vegetales, estiércol entre otros.

En este proceso las moléculas orgánicas complejas son descompuestas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea por medio de microorganismos. Debido a que el proceso sucede en condiciones rigurosas de ausencia de oxígeno y se prolonga el tiempo necesario, más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en una mezcla de productos gaseosos principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), conocido como biogás; consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano y dando lugar a una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos o fangos), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno (N_2), el fósforo (P) y la totalidad de los elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa (De La Torre, 2008) (Pérez, 2010).

2.2.4.2. Proceso microbiológico y bioquímico de las etapas de la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia es un proceso complejo, tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. Martí (2006).

De acuerdo a De La Torre (2008) y Martí (2006), tanto los estudios bioquímicos y microbiológicos, dividen al proceso de descomposición anaerobia de la materia orgánica en cuatro fases o procesos: Hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, etapa acetogénica y etapa metanogénica.

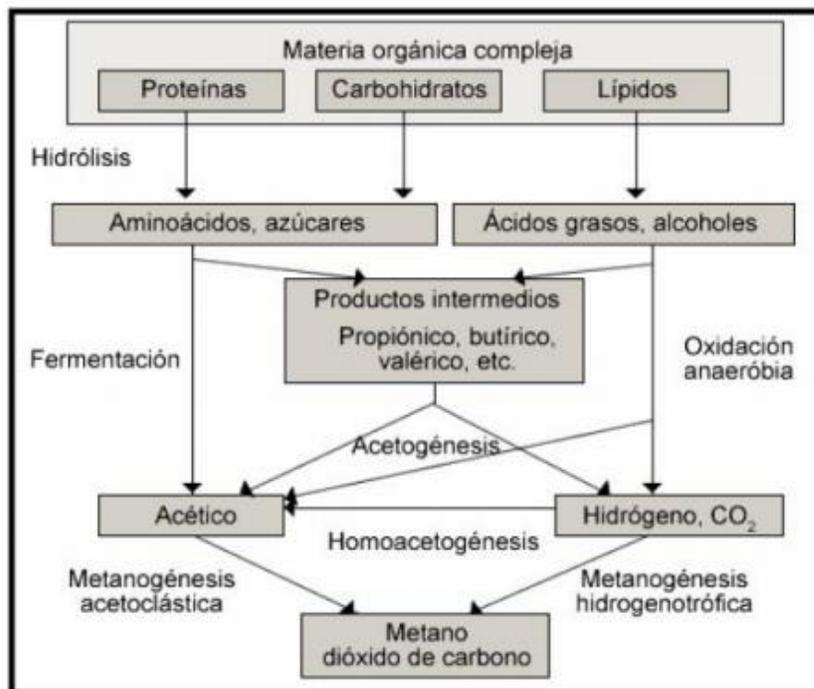


Figura 1. Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica. Fuente: Estudio del proceso de digestión anaerobia para optimizar la recuperación de fósforo en EDAR'S, p. 33, por Martí N., 2006, Boca Ratón. Florida. USA.

- **Hidrólisis.**

Esta es la etapa donde las proteínas, carbohidratos y grasas son transformados en compuestos solubles por acción de bacterias proteolíticas, celulíticas y lipolíticas, respectivamente. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos

orgánicos necesarios para la estabilización anaeróbica en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes. Martí (2006).

Como lo cita Martí (2006) a Giraldo (1991), la etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratándose de residuos con alto contenido de sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso.

La celulosa, proteínas y grasas son fragmentados en monómeros por hidrolasas, estas enzimas provienen exclusivamente de bacterias de metabolismo anaeróbico y actúan sobre los polímeros orgánicos u otros materiales complejos despolimerizándolos enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos (Pérez, 2010, p.24).

Posteriormente estos compuestos experimentan un proceso de fermentación que origina diferentes ácidos orgánicos. Esta etapa resulta indispensable para lograr la ruptura de los biopolímeros complejos en polímeros solubles o monómeros, puesto que los microorganismos que realizan la depuración solamente son capaces de actuar sobre materia orgánica disuelta. Pérez (2010).

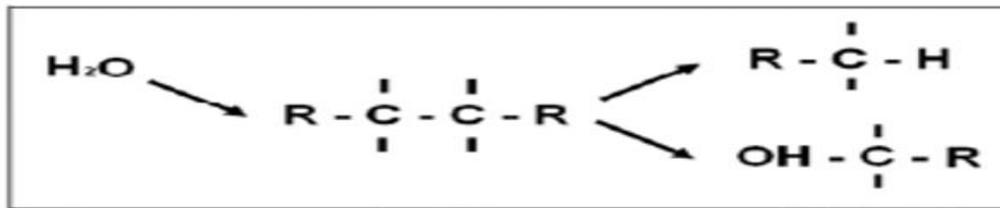


Figura 2. Formación de los monómeros en la hidrólisis. Fuente. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en ganaderos y lecheros, p. 24, por Pérez, J., 2010, Universidad de Chile. Chile.

De La Torre (2008) y Pérez (2010), coinciden en que no todas las partículas del sustrato tienen la misma facilidad para degradarse, existen factores que afectan la hidrólisis y entre ellos:

- ✓ El pH (solubilización de las partículas) y las variaciones de temperatura.
- ✓ Tamaño de las partículas, las partículas grandes son más lentas en la degradación que las partículas pequeñas.
- ✓ Tipo de materia a degradarse, los almidones, proteínas y la celulosa se degradan a diferentes ritmos para un rango de 15-35°C.

- **Acidogénesis**

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias

etanol, ácidos grasos volátiles como valerato, butirato, propionato, etc. y algunos compuestos aromáticos, deben ser transformados en productos más sencillos como acetato e Hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas. De La Torre (2008).

- **Metanogénesis**

Pérez (2010) menciona que mediante la acción de las bacterias metanogénicas, el hidrogeno y parte de los acetatos, son transformados en metano y bióxido de carbono. El amoniaco se estabiliza en forma de sales de amonio, permaneciendo en esta forma todo el contenido original de nitrógeno de la materia orgánica, que está sometido al proceso de biodegradación anaeróbica. El metabolismo de estas bacterias es más lento, y son más sensibles a distintas condiciones ambientales.

De La Torre (2008), claramente expone que la acción de las bacterias productoras de metano en esta fase, es el factor determinante para el desarrollo de la fermentación anaerobia, debido a que estos microorganismos son muy sensibles a los cambios bruscos de temperatura y de acidez, además varían de acuerdo a la toxicidad de ciertos materiales presentes en el medio ocasionando la reducción inclusive la paralización de la digestión.

A continuación se muestra en una Tabla de resumen las características de las fases hidrólisis, acidogénica, acetogénica y metanogénica.

Tabla 5.*Características de las fases microbiológicas de la biomasa.*

Característica	Fase de Hidrólisis	Fase Acidogénica	Fase Acetogénica	Fase Metanogénica
Tipo de Bacteria	Bacterias hidrolíticas.	Bacterias facultativas.	Bacterias facultativas.	Bacterias anaeróbicas estrictas.
Velocidad de Reproducción	Depende del contenido del sustrato.	Reproducción muy rápida.		Reproducción lenta.
Elementos inhibidores	pH, tamaño de partículas, metales pesados dentro del sustrato.	Poco a los cambios de acidez y temperatura.	Sensibles a la concentración del hidrógeno, la acidez y AGCL.	Muy sensibles a cambios de acidez y temperatura.
Productos	Aminoácidos, azúcares, ácidos grasos, alcoholes.	Propionato, butirato, acetato, dióxido de carbono e hidrógeno.	Principal producto acetatos.	Principales productos finales metano y CO ₂ .

Fuente. Digestión anaerobia en comunidades rurales, (p.27), por De La Torre, N, 2008, Universidad Carlos III de Madrid. España.

2.2.5. Biogás

Es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un grupo de microorganismos que interactúan con otros factores. (Albarracín, 1995, p.23).

Es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaerobias y está constituido principalmente por gas metano y bióxido de carbono. La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y devuelven los productos de la descomposición al medio ambiente (Sandoval, 2 006, p.7).

El biogás se puede quemar para producir calor, electricidad o ambos, además se puede mejorar a metano puro también llamado biometano renovable o gas natural por eliminación de agua, dióxido de carbono, ácido sulfhídrico, y otros elementos traza, llegando de tal forma a ser comparable al gas natural, pudiendo ser inyectado en la red de tuberías para utilizarse como combustible para el transporte de forma comprimida o licuado. Cáceres, J. y Gutiérrez, J. (1985),

El biogás se compone de las siguientes moléculas: metano (CH_4) en un 54- 70%, bióxido de carbono (CO_2) en un 27- 45%, hidrógeno (H_2) en un 1-10%, nitrógeno (N_2) en un 0,3-3% y ácido sulfhídrico (H_2S) en un 0,1%, respectivamente (Valdivia, 2 000, p10.).

2.2.5.1. Características del biogás

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70%) y dióxido de carbono (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno) Aunque la composición del biogás depende de muchas variables, es posible determinar un rango típico de sus componentes (Flotats, Bonmati, Campos y Teira, 2000, p.19).

Tabla 6.

Composición porcentual del biogás

GAS	PORCENTAJE
Metano, CH ₄	50 - 70%
Dióxido de Carbono CO ₂	27 - 45 %
Hidrogeno	1 - 10%
Nitrógeno	0.5 - 3%
Ácido sulfúrico H ₂ S	0.1%

Fuente: Diseño de biodigestores, (p. 10), por Infantes C. (2006), Argentina: Copyright 2006 por Engormix Porcicultura.

La materia orgánica, constituye el sustrato fundamental para la producción de biogás. El material de fermentación puede ser de origen animal, tales como estiércol del ganado vacuno, cerdos, ovejas, caballos, aves, otras de origen vegetal, tales

como pulpa de café, hojas de papa, desechos de banana, remolachas, cascarilla de arroz y otras; desechos de cultivos acuáticos como algas marinas, maleza acuática y de origen doméstico, aguas residuales de letrina y cocina, sin contenido de jabón variando su porcentaje de metano. Flotats, et al.(2000, p.19).

2.2.5.2. Factores importantes para la producción de biogás.

Presentan gran influencia sobre la calidad y cantidad del biogás producido así como la velocidad a la que se logra obtener.

A. Sustrato

- **Composición.-** Pueden ser efluentes municipales, agrícolas, pecuarios, pesqueros e industriales, de consistencia líquida, sólida o semisólida. Díaz (2010).

A continuación en la tabla 7, se presenta la cantidad de biogás que se genera en L/Kg Biomasa seca de acuerdo al sustrato sometido.

Tabla 7.

Generación de biogás de acuerdo al tipo de sustrato.

SUSTRATO	GENERACION DE GAS (L/Kg. Biomasa seca)	PROMEDIO (L/Kg. Biomasa seca)
Excreta de Porcino	340 – 550	450
Excreta de Vacuno	150 – 350	250
Excreta de Aves.	310 - 620	460
Excreta de Caballo.	200 - 350	250
Excreta de Oveja.	100 - 310	200
Guano de Establo	175 - 320	225
Desperdicio de verduras	300 - 400	350
Algas	380 - 550	460
Lodos de aguas servidas.	310 - 640	450

Fuente: Diseño de biodigestores, (p. 13), por Infantes C. (2006), Argentina: Copyright 2006 por Engormix Porcicultura.

B. Relación Carbono/Nitrógeno.

Infantes C. (2006) indica que esta relación depende de la combinación de materiales con un significativo contenido de nitrógeno y carbono cuya fermentación generan una elevada producción de gas.

Tabla 8.

Relación carbono / nitrógeno de acuerdo al tipo de sustrato.

SUSTRATO	RELACION C/N
Orina	0.8
Excreta de vacuno	10 - 20
Excreta de porcino	9 - 13
Excreta de gallina	5 - 8
Excreta de caprino / ovino	30
Excreta de Humanos	8
Paja de cereales	80 - 140
Paja de maíz	30 - 65
Gras fresco	12
Desperdicios de verduras.	35

Fuente: Diseño de biodigestores, (p. 14), por Infantes C. (2006), Argentina: Copyright 2006 por Engormix Porcicultura.

C. Proceso.

- **Temperatura.-** Tiene una relación directamente proporcional a la tasa de hidrólisis (primera fase de la digestión anaerobia), ya que conforme aumenta la temperatura la tasa incrementa, provocando un aumento en la velocidad metabólica de las bacterias y en la producción de biogás. Olaya (2012).

Tabla 9.

Rangos de temperatura de fermentación anaeróbica.

FERMENTACION	MINIMO	OPTIMO	MAXIMO
Psycrophilica	4 -10 °C	15 - 18 °C	25 - 30 °C
Mesophilica	15 -20 °C	28 - 33 °C	35 - 45 °C
Thermophilica	25 - 45 °C	50 - 60 °C	75 - 80 °C

Fuente: Diseño de biodigestores, (p.14), por Infantes C. (2006), Argentina: Copyright 2006 por Engormix Porcicultura.

- **Concentración de agua y sustrato en la mezcla de carga.-** Los microorganismos no pueden funcionar adecuadamente cuando el contenido de agua en la mezcla es demasiado bajo, y la cantidad de biogás producido será pequeña, y si por el contrario es demasiado diluida, se puede digerir poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada. El uso de excretas humanas, estiércol, y desechos de agricultura, como alimento para el digestor, debe ser una relación de biomasa: agua entre 1:1 y 1:2; y por cada 100 Kg de heces y orina, para así promover una digestión efectiva. Olaya (2012).

- **Tiempo de permanencia del sustrato en el Biodigestor.-** es el tiempo por el cual la materia orgánica o sustrato permanece dentro del biodigestor para que se realice su digestión anaeróbica completa, durante este periodo se puede determinar la fracción de biogás que se obtenga de la producción máxima. Cáceres y Gutiérrez (1985).

Tabla 10.

Tiempo de retención según la temperatura.

Tiempo de retención según temperatura		
Región característica	Temperatura (°C)	Tiempo de retención (días)
Trópico	30	15
Valle	20	25
Altiplano	10	60

Fuente: Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación, (p.22), por Herrero J., 2008, Bolivia: Copyright 2008 por Editorial Creative Commons.

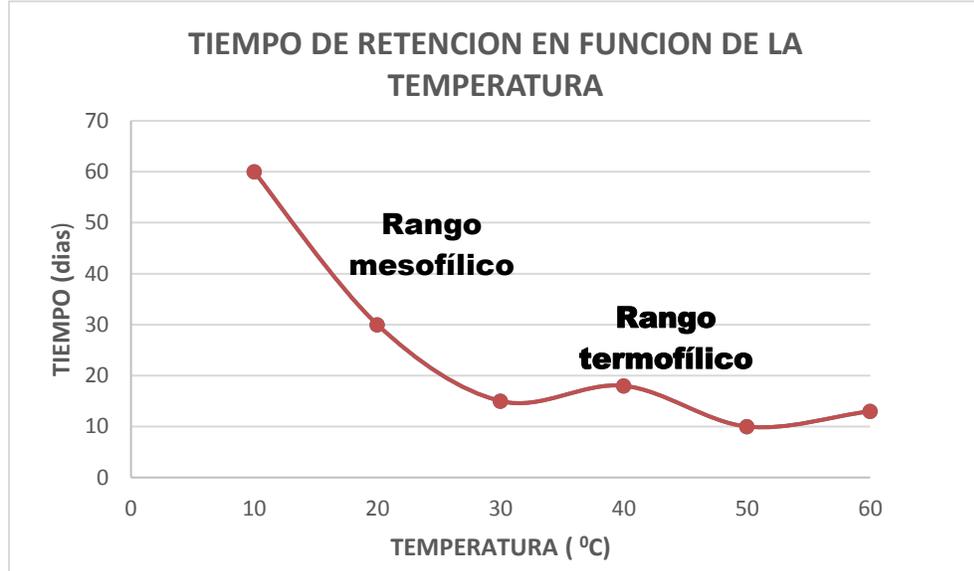


Figura 4. : Tiempo de retención en función de la temperatura. En la siguiente figura se puede observar la variación del tiempo de retención de un biodigestor en función a su temperatura de operación. *Fuente.* Aumento de la producción de biogás del digestor, p. 33, por Cáceres J. y Gutiérrez J.1985, Ecuador.

- **Valor de pH.-** Los digestores son operados generalmente a pH7, ya que sus tasas metabólicas son favorables para los formadores de metano y su actividad disminuye considerablemente cuando el pH cae fuera del rango entre 6-8. Cáceres y Gutiérrez (1985).

Tabla 11.

Rangos de PH en la generación de biogás

VALOR DE PH	CARACTERISTICA
7 - 7.2	Optimo
Menor de 6.2	Retardo por ácidos
Mayor a 7.6	Retardo por amonios

Fuente: Diseño de biodigestores, (p. 14), por Infantes C. (2006), Argentina: Copyright 2006 por Engormix Porcicultura.

2.2.5.3. Utilización del biogás

A pequeña y mediana escala, el biogás ha sido utilizado en la mayor parte de los casos para cocinar en combustión directa, sin embargo también puede ser utilizado para iluminación, calefacción, como reemplazo de la gasolina o el diésel en motores de combustión interna, operar maquinaria agrícola o bombear agua. Sandoval (2006).

El poder calorífico aprovechable depende del rendimiento de los quemadores o de los aparatos. Se debe tener especial cuidado con el ácido sulfhídrico del biogás, ya que ocasiona corrosión prematura en los equipos, por esta razón es necesario colocar una trampa de limadura de hierro en la línea de transporte del biogás. Valdivia (2000).

2.2.6. Bioabono / biol.

Es el producto del proceso de la digestión anaerobia, puede ser sólido o líquido, no posee mal olor, no atrae a moscas a diferencia del estiércol fresco. Este puede aplicarse en cantidades recomendadas directamente al campo en forma líquida o sólida (McCaskey, 1990), citado por (Sosa et al., 2001).

Según Martí (2008), la composición del bioabono en promedio tiene nitrógeno de

2 a 3%, de fósforo de 1 a 2%, de potasio entorno al 1% y entorno a un 85% de materia orgánica con un pH de 7,5.

Un biol operado correctamente en un biodigestor tiene un color claro con algunos sólidos suspendidos y sin olor. Éste fertilizante se lo puede usar para fertilizar los campos agrícolas o como material para una pila de compost. Herrero (2008).

El biol se lo puede usar durante el arado del terreno para regar cada surco, un día antes de la siembra se pueden introducir las semillas en una mezcla de 1 a 1 de biol con agua por un tiempo de 4 a 5 horas. Una vez en crecimiento la planta se puede filtrar el fertilizante en agua en una relación de 1:4 utilizándolo de forma foliar en cultivos cuyo fruto sea subterráneo (papas, cebolla, zanahoria, etc.), siempre considerando no regar el biol sobre el fruto ya que del 5 al 20% de coliformes sobreviven a la biodigestión. Herrero (2008).

Si se tiene un exceso de cantidad de biol, es necesario saber que se va a hacer con él, en algunos biodigestores éste exceso es retornado como afluente nuevamente. Según A. J. Fischer este método puede causar problemas en el digestor si el contenido total de sólidos excede el 0.30 – 0.50 %, pero aún así este método es el más práctico en biodigestores de pequeña escala cargados manualmente. El biol puede ser reciclado en el digestor como un solvente con el desperdicio seco para formar un sustrato afluente. Herrero (2008).

2.2.7. Biodigestor

Un Biodigestor, es una planta productora de biogás, biol y bioabono, donde se realiza un proceso anaeróbico de descomposición (proceso de fermentación anaeróbica). La materia prima está constituida por materia orgánica, como desechos agrícolas, residuos animales, residuos humanos, etc.; Es decir, en el biodigestor tal como indica su nombre sucede una digestión de la materia prima, luego de la cual se obtiene biogás, biol y bioabono. Bravo (1992).

El proceso de biodigestión se da porque existe un grupo de microorganismos bacterianos anaeróbicos (ausencia de oxígeno) en los excrementos que al actuar en el material orgánico lo transforman en biogás y fertilizante. El biogás es un excelente combustible y puede ser empleado como combustible en las cocinas, calefacción o iluminación, etc. El fertilizante, llamado biol, inicialmente se consideraba un producto secundario, pero actualmente se está tratando con la mayor importancia que el biogás, debido a que provee a las familias de un fertilizante natural, ya que por el tratamiento anaeróbico los malos olores son eliminados, por ello mejora fuertemente el rendimiento de las cosechas (Herrero, 2008. p.26).

Por ser un sistema sencillo uno de los beneficios de los Biodigestores o biorreactores es el costo, ya que su instalación y material son de fácil acceso, saber utilizarlo representa también un costo minoritario, es fácil de instalar, su mantenimiento es sencillo y también genera un gasto menor. No requieren mano de

obra a tiempo completa y los únicos suministros operativos que se necesitan son la materia orgánica y el agua. (Werner, 1989)(Ruiz, 2010, p.44).

Cualquier persona con una cantidad apropiada de materia orgánica, disponibilidad de espacio y agua (como familias agrícolas y ganaderas), pueden aprovechar el estiércol y la vegetación para producir su propio combustible y un fertilizante natural mejorado. La realización de un biodigestor o biorreactor se convierten en una muy buena solución sanitaria, ya que el estiércol y la vegetación en descomposición acumulada cerca de las viviendas supone un foco de infección, olores y vectores que desaparecerán cuando estos sean introducidos diariamente en el biodigestor. También es importante recordar la cantidad de enfermedades respiratorias que sufren, principalmente las mujeres y niños, por la inhalación de humo al cocinar en espacios cerrados con leña o los costos elevados que tendrían que pagar por un tanque de GLP (si tuvieran acceso a él). La combustión del biogás no produce humos visibles y su carga en ceniza es infinitamente menor que el humo proveniente de la quema de madera. (p.48)

Herrero (2008) sostiene que son tres los límites básicos de los biodigestores: la disponibilidad de agua para hacer la mezcla con el estiércol que será introducida en el biodigestor, la cantidad de ganado que se posea y la apropiación de la tecnología por parte de la familia.

En la tabla 12 se agrupan los diferentes tipos de Biodigestores, desde los más sencillos y de bajo costo hasta los de última generación, reactores de alta eficiencia y costos elevados. Lara e Hidalgo (2011).

Tabla 12.

Sistemas utilizados en la biodigestión.

CARGA	Sistema Batch Sistema Continuo o Semi-continuo
INTENSIDAD DE LA MEZCLA	Mezcla Completa Mezcla parcial o mala
MANEJO DEL SUSTRATO	Contacto Anaerobio U.A.S.B (Upflow Anaerobic Sludge Blunket) Lecho fluidizado Filtro anaerobico
MANEJO BIOQUÍMICO	Una etapa Dos etapas

Fuente: Diseño de un biorreactor y conducción del biogás generado por las excretas de ganado vacuno, estación Tunshi-epoch, (p.23), por Lara, E., Hidalgo, M. (2011), Ecuador.

Los modelos más usados o que más se han difundido son los de Carga, ya que se caracterizan principalmente por la forma en que el sustrato alimenta al tanque. A continuación se describe cada uno de ellos.

- **Modo discontinuo o batch:** El crecimiento de microorganismos en batch se refiere a que las células se cultivan en un recipiente con una concentración inicial, sin que esta sea alterada por nutrientes adicionales o el lavado, por lo que el volumen permanece constante y sólo las condiciones ambientales del medio (pH, temperatura, velocidad de agitación, etc.) son controladas por el operador. El proceso finaliza cuando todo el sustrato es consumido por la

biomasa. Esta forma de cultivo es simple y se utiliza extensamente tanto en laboratorio como a escala industrial. Ruiz (2010).

- **Modo semicontinuo o fed-batch:** En un cultivo semicontinuo o fed-batch, los nutrientes son alimentados al biorreactor de forma continua o semicontinuo, mientras que no hay efluente en el sistema. Según sea el objetivo de la operación, la adición intermitente del sustrato mejora la productividad de la fermentación manteniendo baja la concentración del sustrato. Un proceso de este tipo está restringido por la capacidad volumétrica del reactor. Ruiz (2010).

- **Modo continuo:** Un cultivo continuo consiste en alimentar nutrientes y retirar productos continuamente de un biodigestor. Bajo ciertas condiciones el cultivo puede alcanzar un estado estacionario, donde no existe variación con el tiempo del volumen del biodigestor. De esta manera se puede utilizar para producir sustancias biológicas a condiciones óptimas y para estudios fisiológicos. Ruiz (2010).

2.2.7.1. Tipos de biodigestores.

- A. Tipo Chino.-** Este reactor consiste en una cámara de gas-firme construida de ladrillos, piedra u hormigón. La cima y “fondos son hemisféricos y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas

delgadas de mortero para hacerlo firme. Su peculiaridad es la cúpula fija en la parte superior. Esta inmovilidad hace que la presión del gas en el interior varíe en función de su producción y consumo. Pérez (2010).

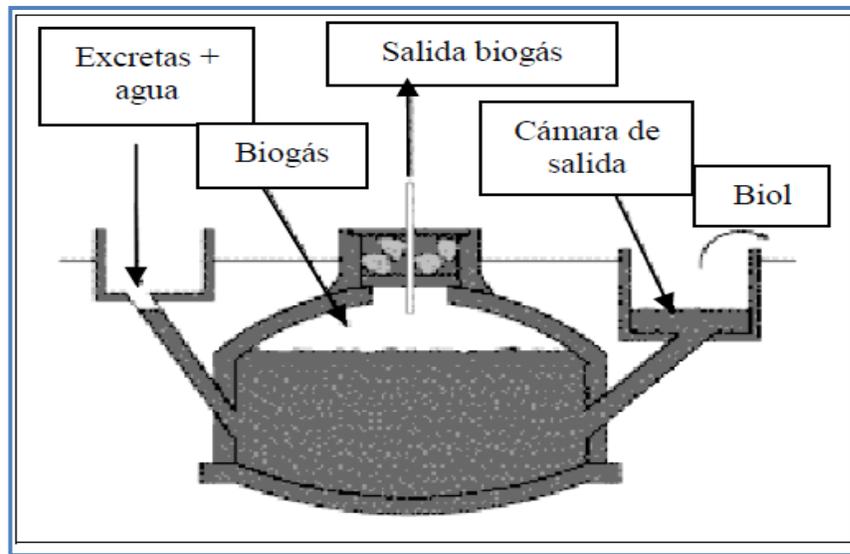


Figura 5. Biodigestor tipo chino. Fuente. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en ganaderos y lecheros, por Pérez. 2010. Universidad de Chile. Chile.

B. Tipo hindú: Estos biodigestores son muy parecidos a los anteriores, excepto por el hecho de que en los de tipo hindú la cúpula es flotante, es decir que sube o baja en función de la presión interna de biogás.

El gas se acumula en la campana, haciéndola subir y luego vuelve a bajar cuando se extrae el gas a través de un tubo instalado en la campana misma. Para evitar que la campana se ladee, se construye un soporte de hierro como guía. Pérez (2010).

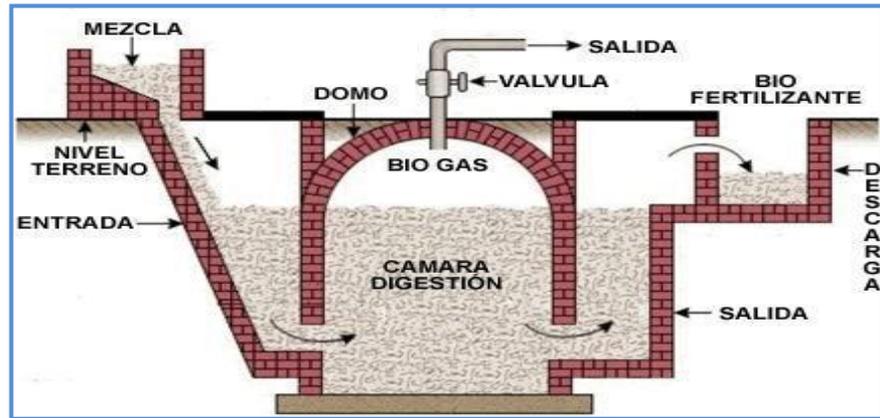


Figura 6. Biodigestor de domo flotante. Fuente. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en ganaderos y lecheros, por Pérez. 2010. Universidad de Chile. Chile

C. Biodigestor Tubular (Polietileno).- Estos biodigestores consisten en una manga de plástico a la que se le instalan unos tubos en los extremos que hacen las veces de tubos de entrada y salida. Este tipo de biodigestor es mucho más barato que los anteriores, pero con una vida más corta, debido a la menor durabilidad de sus materiales.

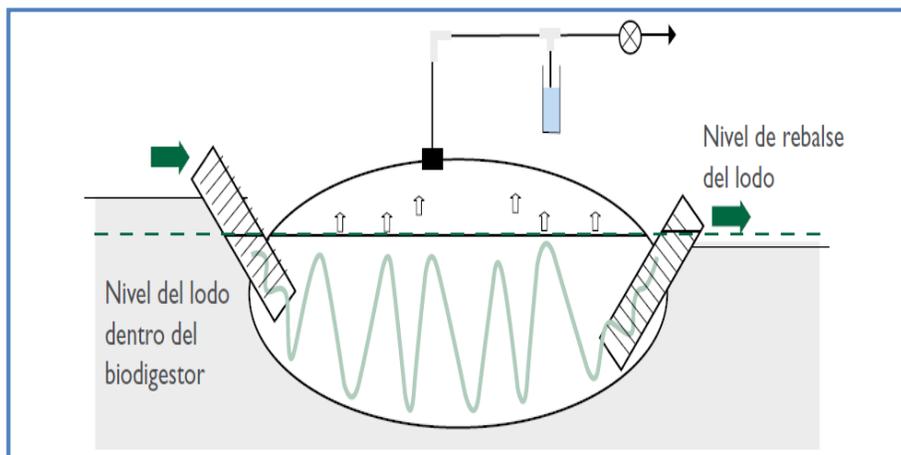


Figura 7. Biodigestor de estructura flexible (Polietileno). Fuente. "Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación", p.28, por Herrero J. 2008, Bolivia: Ediciones Creative Commons.

Para pequeños productores, la tecnología más apropiada es la biodigestión en los digestores tubulares. Por sus características constructivas y por su bajo costo son una alternativa adecuada para gestionar las excretas y otros residuos orgánicos de la granja de modo que su revalorización los integra de nuevo a los sistemas de producción de la propia granja. Ruiz (2010).

2.2.7.2. Biodigestor Tubular

Según Botero (2009) “Los biodigestores construidos a partir de mangas de polietileno tubular, se caracterizan por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, así como por requerir sólo de materiales locales para su construcción”.

De La Torre (2008) menciona que el limitante económico motivo a ingenieros Taiwaneses a investigar para realizar digestores hechos con materiales flexibles, que suponen un costo menor. Inicialmente se utilizó el nylon y neopreno, pero los resultados fueron negativos puesto que resultaron ser muy costosos. A través de los años los materiales se han desarrollado y hoy en día las comunidades que usan este tipo de digestor lo hacen con polietileno.

La bolsa representa la cámara de digestión donde la biomasa se fermenta y se va inflando con una presión baja a media que se produce el biogás, y cuenta con otra bolsa en la parte superior para el almacenamiento del biogás producido, que

será llevado por las tuberías a los objetos de uso final como cocinas, lámparas, motores, etc. Se tiene un dispositivo para la entrada de la biomasa y otra para la salida de los fertilizantes. De La Torre (2008).

A. Componentes

Un sistema de digestión anaeróbica mediante digester tubular de plástico está compuesto de las siguientes partes.

A.1. Tanque de digestión.

También conocida como cámara de fermentación anaeróbica en la que se ubica el material a descomponer y que permanecerá durante todo el tiempo de retención, en el cual ocurre la degradación y liberación del biogás. Su geometría es cilíndrica y su capacidad está dada por el volumen de material a degradar, el volumen de Fase líquida representa el 75% y la fase gaseosa el 25% de la capacidad total. Herrero (2008).

La entrada o alimentación y la salida o descarga del biodigestor se realiza a través de un tubo PVC de 4" o de 6", dependiendo del tamaño del biodigestor, los cuales se ubican en la parte media de los extremos del plástico, van bien sujetos para evitar cualquier tipo de fuga, sus longitudes son de 50cm cada uno. Herrero (2008).

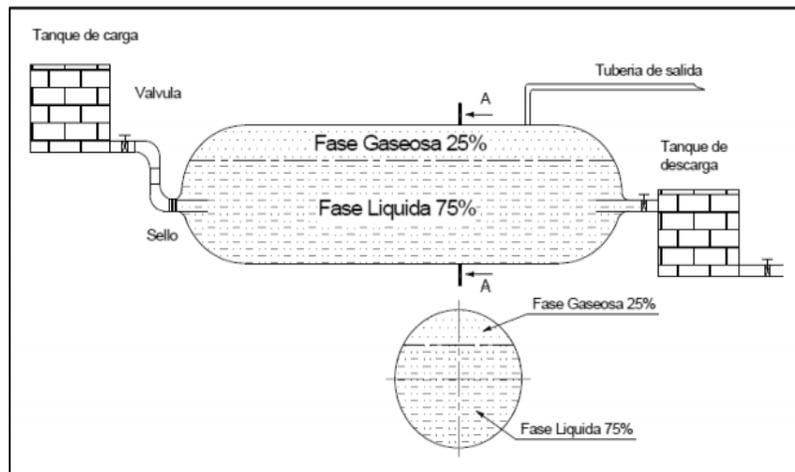


Figura 8. Esquema general de un biodigestor tubular. En la siguiente figura se puede observar la distribución del volumen dejando un porcentaje del volumen total equivalente al 75% para la fase líquida a degradar y un 25% restante servirá como campana o gasómetro que será ocupado por el metano que se produzca durante la desintegración. *Fuente.* Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación”, p.23, por Herrero J, Bolivia: Ediciones Creative Commons.

A.2. Tanque de biogás.

El tanque de biogás es el dispositivo donde se va a almacenar el biogás producido en el biodigestor. El biogás va a llegar a este reservorio por medio de las tuberías del sistema. Su dimensionamiento va a depender de la cantidad de gas a almacenar y el material del que está construido es de manga de polietileno. Herrero (2008).



Figura 9. Tanque de biogás (Polietileno). Fuente. “Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación”, p.32, por Herrero J. 2008, Bolivia: Ediciones Creative Commons.

A.3. Sistema de tuberías para el biogás.

La tubería que conduce el biogás es de polietileno tiene resistencia química y al desgaste, bajo peso, baja toxicidad y economía, comúnmente son tuberías de 1” o de 1/2”. Herrero (2008).

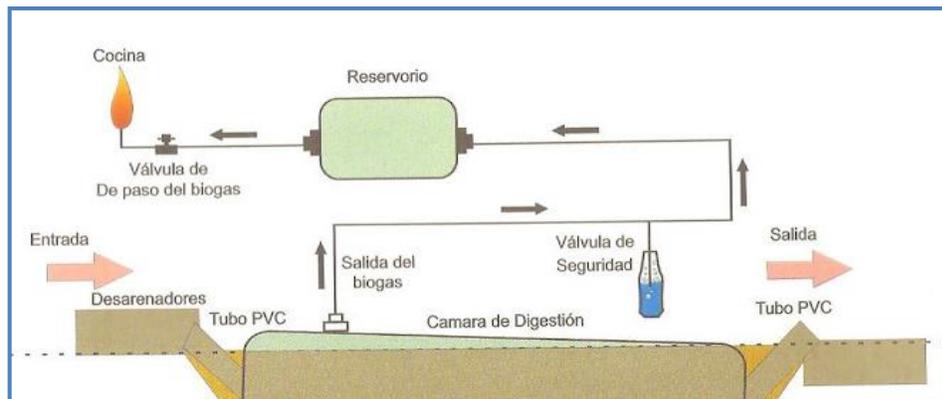


Figura 10. Sistema de conducción de biogás. Fuente. “Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación”, p.32, por Herrero J. 2008, Bolivia: Ediciones Creative Commons.

A.4. Válvula de seguridad.

La función de la válvula de seguridad es procurar que la presión que existe dentro del biodigestor especialmente la generada por el biogás no se incremente demasiado de tal forma que pueda sobrepasar la resistencia del plástico que lo conforma ya que puede ocasionar fisuras que disminuyen el tiempo de durabilidad del dispositivo, por ello el sistema de conducción de biogás debe contar con un mecanismo de escape ubicado cerca del biodigestor y elaborado a partir de una botella de plástico parcialmente llena de agua, permitiendo observar con facilidad el nivel del agua, la longitud de tubería que va dentro del agua depende de la presión requerida dentro del biodigestor, constituyendo así un sello de agua que permite controlar la presión dentro del digestor. Herrero (2008).

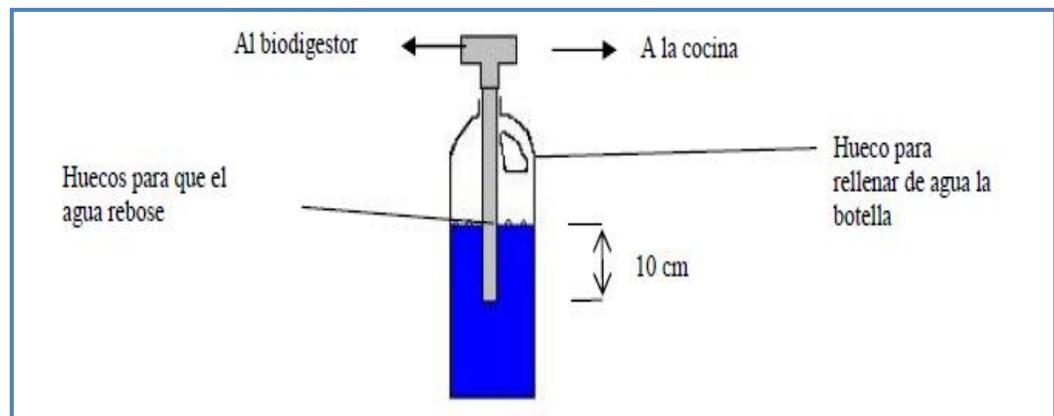


Figura 11. Válvula de seguridad. Fuente. "Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación", p.33, por Herrero J. 2008, Bolivia: Ediciones Creative Commons.

A.5. Purificador de Biogás.

Según Campos (2011) para que el biogás pueda ser utilizado es necesario eliminar el sulfuro de hidrógeno (H_2S) que viene incorporado, ya que no solo es corrosivo, sino venenoso para las personas, su presencia se puede notar por su olor característico similar a un huevo podrido. Los métodos para poder eliminar este gas son:

- Burbujeando aire biológico para capturar el azufre dentro de la biomasa, impidiendo la formación de H_2S .
- Eliminando el vapor de agua que está presente en el biogás mediante su condensación, es decir producir un enfriamiento del gas para evitar la formación de ácido sulfúrico.
- Absorbiendo el H_2S mediante el uso de limaduras o virutas de hierro que han pasado por el siguiente proceso: primero lavarlas con detergente para que estén libres de grasas , luego sumergirlas en una solución de HCl al 5% por 5-10 minutos, retirarlas y dejarlas secar, luego dejarlas dentro de una solución de NaOH al 5% por el mismo tiempo, luego secarlas; de esta forma las virutas se han transformado en óxido férrico (Fe_2O_3) que reacciona de forma rápida con el H_2S .

$\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3$ (reacción lenta con virutas de hierro no tratadas).

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ (reacción rápida con virutas de hierro tratadas)

Reacciones que suceden durante el tratamiento de las virutas de hierro.

$\text{Fe} + \text{HCL} \rightarrow \text{FeCL}_3$ (secado al aire).

$\text{FeCL}_3 + \text{NAOH} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$.

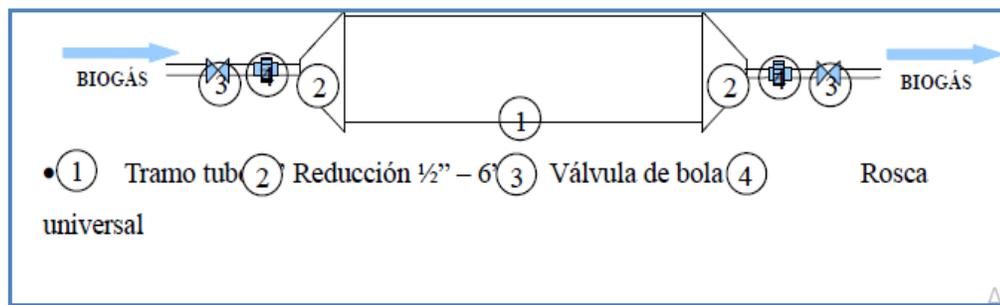


Figura 12. Purificador de biogás. Fuente. "Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación", p.33, por Herrero J. 2008, Bolivia: Ediciones Creative Commons.

A.6. Zanja para el biodigestor.

La zanja va a brindar soporte al biodigestor, este puede ser construida bajo tierra o también se puede hacer un soporte de madera a nivel superficial, la ubicación de este debe ser cerca a la fuente del sustrato y al lugar en el que se vaya a realizar el aprovechamiento del biogás, además de ser un espacio a que el sol lo mantenga cálido. Su dimensionamiento va a depender

del biodigestor ya que de ello dependerá la longitud y ancho de la zanja.
Herrero (2008).

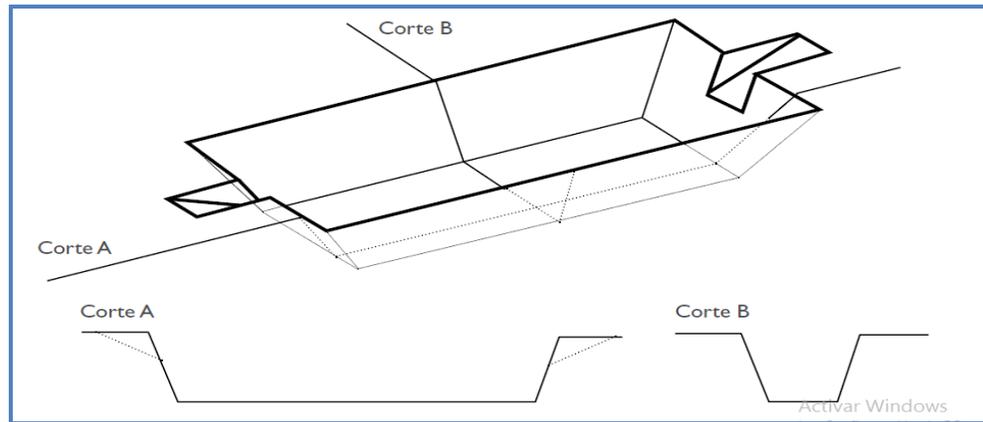


Figura 13. Forma de la zanja, con sus dos cortes. En la imagen se ve que la zanja tiene las paredes inclinadas.. También se puede ver los huecos para la entrada y la salida. De no poder cavar el terreno, se puede hacer a nivel de superficie con maderas.
Fuente. “Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación”, p.34, por Herrero J. 2008, Bolivia: Ediciones Creative Commons.

A.7. Presión hidrostática presente en el interior del biodigestor.

Ya que el sustrato diluido en el interior del biodigestor está en reposo la única presión existente es la presión hidrostática la cual se define:

- **Presión hidrostática.-** La presión que un fluido en reposo ejerce va a ser la misma en todas direcciones (de forma horizontal), ya que con respecto a la profundidad (dirección vertical) esta presión va irse incrementando debido a que el fluido soporta más presión

mientras más cerca esta del fondo y menos presión mientras más cerca de la superficie se encuentra. Chungaro y Manitio (2010).

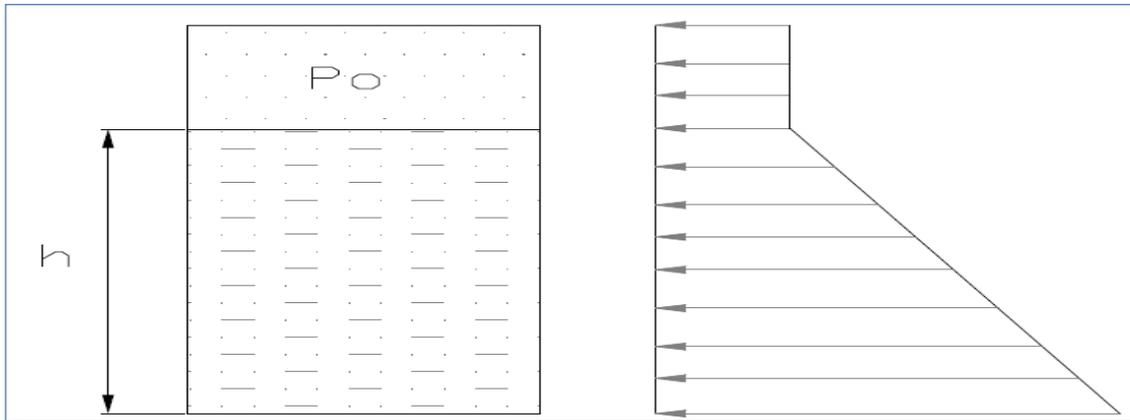


Figura 14. Distribución de la presión dentro del biodigestor. Fuente. *Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas, (p.52), por Chungaro, M y Manitio, G. Ecuador.*

De acuerdo al gráfico se puede observar que la presión en el fluido se incrementa de forma vertical de arriba hacia abajo y la presión que ejerce el gas sobre el fluido es uniforme.

2.3. Marco Conceptual.

- **Ganado porcino:** El ganado porcino comprende una serie de animales que son domesticados para sacarle el mejor aprovechamiento posible; este tipo de ganado está compuesto por cerdos, puercos o cochinos. Estos animales están adaptado a la producción de carne ya que crecen y maduran con rapidez.
- **Estiércol:** Es el nombre con el que se denominan los excrementos de los animales que se utilizan para fertilizar los cultivos. En ocasiones el estiércol está constituido por excrementos de animales y restos de las camas, como sucede con la paja.
- **Porquinaza:** La porquinaza está formada por heces fecales y orina mezclados con el material utilizado como cama, residuos de alimento, polvo, otras partículas y una cantidad variable de agua proveniente de las labores de lavado y pérdidas desde los bebederos durante la crianza de los cerdos.
- **Gallinaza:** La Gallinaza es el estiércol de gallina preparado para ser utilizado en la industria ganadera o en la industria agropecuaria.
- **Biodigestor:** Es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar en determinada

dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia produzca el biogás y biol logrando así el aprovechamiento energético de la materia orgánica dispuesta.

- **Digestión Anaerobia:** La digestión anaeróbica es la degradación biológica u oxidación del material orgánico, donde interviene microorganismos específicos en ausencia de aire (oxígeno molecular). En este proceso el material a degradar se transforma en dos productos utilizables, el uno en un producto estable e inerte llamado biol y el otro en biogás con un alto contenido de metano, ambos productos de este proceso poseen cualidades energéticas.

- **Biogás:** Es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaerobias y está constituido principalmente por gas metano y bióxido de carbono. Presenta una serie de factores importantes para su producción dentro del biodigestor: Temperatura, PH, tipo de sustrato, relación carbono/nitrógeno, tiempo de retención, relación de mezcla sustrato/agua.

- **Biol:** Es el producto del proceso de la digestión anaeróbica, el cual se caracteriza por no poseer mal olor y no atraer a las moscas, es de color claro y posee algunos sólidos suspendidos. Su producción de calidad

requiere un mayor tiempo de retención comparado con la producción de biogás. Este producto es un excelente estimulante foliar para las plantas y un completo potenciador de suelos, puede aplicarse en cantidades recomendadas directamente al campo en forma líquida durante el arado de la tierra.

3. CAPÍTULO III: DISEÑO/ DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA/ MODELO/SISTEMA.

3.1. ANÁLISIS DEL MODELO/ HERRAMIENTA/SISTEMA

3.1.1. Lugar de investigación:

La vivienda en la que se realizó nuestro proyecto de tesis se encuentra ubicada en La Asociación Agropecuaria Los Lúcumos de Pachacamac, distrito de Pachacamac – Lima, localizada en las siguientes coordenadas geográficas $12^{\circ} 20'$ y $12^{\circ} 10'$ latitud sur y los $76^{\circ} 50'$ $76^{\circ} 43'$ de longitud oeste, a una altitud de 87 msnm, con una temperatura anual promedio de 20°C .

El área de implementación del biodigestor de preferencia debe estar entre la cocina y el establo a distancias reducidas, esto es para que la recolección de estiércol fresco cada mañana sea lo más fácil posible, a la vez que se ahorra en conducción de biogás al ser menor el recorrido. Nuestro biodigestor está ubicado a

8.5 m de la cocina de la familia beneficiaria y a 1.2 metros del establo donde duermen las cerdos, de esa manera la recolección del estiércol se realiza rápidamente y sin mayor esfuerzo en cuanto a su traslado. El área del establo es de 30 m², en donde se encuentran 2 cerdos, con una producción promedio diaria de 4 Kg de estiércol.

3.1.2. Procedimientos y equipos.

A continuación se describe los pasos que se siguieron en la realización de este proyecto basado en la bibliografía que trata sobre digestión anaerobia, construcción de digestores, biofertilizantes y parámetros que deben ser controlados para la generación de biogás y biol: La Guía de diseño y Manual de Instalación de Biodigestores Familiares, escrito por Jaime Martí Herrero en 2008; se tomó en cuenta las condiciones ambientales y de sustrato específico del área de estudio.

3.1.2.1. Etapas del proyecto.

A. Etapa preliminar.

Esta etapa consiste en la medición de la cantidad de estiércol que se genera a diario por el ganado en la granja, el estudio se realiza durante 5 días como mínimo, cada día se realiza el pesaje procurando recoger el excremento a la

misma hora todos los días estimando así un promedio general al final de esta etapa dato que nos sirve para el dimensionamiento del biodigestor.

B. Diseño y construcción del biodigestor.

El digestor anaerobio se diseñó determinando los parámetros para su funcionamiento, para lo cual se consideró los factores que intervienen en el proceso de degradación orgánica.

B.1. Determinación de los parámetros de diseño

A continuación, se detallan los parámetros que se consideraron:

- Volumen de digestor
- Volumen del inóculo
- Tiempo de retención
- Temperatura ambiente
- Necesidad de gasómetro.
- Necesidad de aislante térmico.

B.2. Dimensionamiento del sistema de digestión anaerobio

➤ **Tanque de digestión:** Para su dimensionamiento es necesario determinar los valores de los siguientes parámetros:

- a) Cantidad en Kg de la materia orgánica o residuo disponible para ser utilizado.
- b) Determinar la relación de la mezcla sustrato: agua, para de esta forma conocer el valor de carga
- c) diaria que será alimentada al biodigestor.

$$Cd = S(Kg) + H_2O (Kg) \quad \text{Ecuación 1.}$$

$$H_2O (Kg) = 4 * S(Kg) \quad \text{Ecuación 2.}$$

Cd: Carga diaria.

S: Cantidad de sustrato diario disponible en Kg.

H₂O: Cantidad de agua diario en Kg.

- d) Tiempo de retención hidráulica que es igual al tiempo de retención celular el cual se determina en base a la temperatura ambiente promedio del lugar en el que será ubicado el biodigestor.

Conocidos estos valores podemos aplicar la siguiente formula:

$$VTd = Vl + Vg \quad \text{Ecuación 3.}$$

VTd: volumen total del biodigestor.

Vl: volumen líquido.

Vg: volumen del biogás producido.

$$Vl = Cd * T_{RH} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Vl: volumen líquido.

Cd: Carga diaria en Kg.

T_{RH}: Tiempo de retención hidráulica en días.

A partir de esto tenemos la siguiente ecuación para calcular el volumen del gas.

$$Vg = 25\% * Vl \quad \text{Ecuación 5.}$$

Vg: volumen que ocupa la fase gaseosa.

Vl: Volumen líquido.

La longitud del biodigestor depende del ancho del plástico que se utilice ya que este puede ser de 1.25m, 1.5m, 1.75m, 2m, debido a que la forma del digestor es tubular se aplica la ecuación del volumen de un cilindro:

$$D = \frac{P}{\pi} \quad \text{Ecuación 6.}$$

$$VTd = \pi * \frac{D^2}{4} * L \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$L = \frac{4*VTd}{\pi D^2} \quad \text{Ecuación 8.}$$

VTd: volumen total del biodigestor.

L: longitud del biodigestor

D: diámetro

P: perímetro.

➤ **Zanja para el biodigestor.**

La longitud de la zanja queda determinada por la longitud del biodigestor y la profundidad y ancho de la misma dependerán del ancho de rollo empleado en la construcción del biodigestor.

Tabla 13.

Dimensiones de la zanja

Dimensiones de la zanja según el Ancho de Rollo (AR)					
AR (m)	2	1.75	1.5	1.25	1
a(m)	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
b(m)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
p(m)	1	0.9	0.8	0.7	0.6

Fuente: Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación, (p.48), por Herrero J., 2008, Bolivia: Copyright 2008 por Editorial Creative Commons.

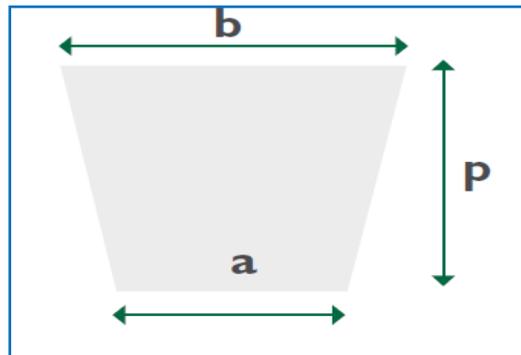


Figura 15. Vista transversal de la zanja.

Fuente. Herrero J, 2008.

➤ **Presión hidrostática presente en el interior del biodigestor.**

La presión que se va a calcular es la generada en el punto más bajo, dicho esto tenemos que la presión generada en el interior del biodigestor será igual

a la suma de presión generada por el gas más la presión generada por el fluido.

Siendo P_0 la presión ejercida por el gas la cual es igual a la longitud del tubo sumergido en la botella expresado como mm de columna de agua, más la presión atmosférica que existe en la válvula de seguridad la cual depende de la altitud del lugar. Debido a que el lugar en el que se realizó el proyecto está ubicado a una altitud de 87msnm la presión atmosférica es de 0,99 atm que equivalen a 100,31 KPa.

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \rho gh + P_0$$

Ecuación 9

Dónde:

P: presión hidrostática

ρ : densidad del fluido (Kg/m^3)

g: aceleración de la gravedad (m/s^2)

h: altura del fluido (m)

P_0 : es la presión ejercida por el gas producido dentro del digestor sobre el fluido (Pa).

➤ **Gasómetro.**

Para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de gas, se debe realizar el cálculo de la producción teórica de biogás, para ello se utilizó el método de sólidos volátiles indicado por (Herrero 2008).

➤ **Estimación de la producción de biogás.**

Según Herrero (2008, p.16) para calcular el volumen de metano o biogás producido es necesario tener como dato la cantidad de sólidos volátiles (ST) y sólidos volátiles (SV) que son generados por día.

➤ **ST: Sólidos totales (Kg/m³)**

De forma general, el estiércol fresco tiene entorno a un 17% de sólidos totales. El rango puede variar de 13 a 20 %. Los sólidos totales representan el peso del estiércol una vez seco y por tanto es la carga real de materia sólida que se estará introduciendo en el biodigestor. Para calcular los sólidos totales que introducimos diariamente en un biodigestor, basta con multiplicar la carga de estiércol por 0.17 y se mide en kilogramos.

Si se desea estimar la proporción de sólidos totales contenidos en la carga diaria (estiércol más agua) del biodigestor se deberá considerar la mezcla realizada con agua. De esta manera:

Tabla 14.

Estimación de la proporción de sólidos totales contenidos en la carga diaria

Material	Sólidos Totales
Estiércol fresco	17
Mezcla 1:4	3.4
Mezcla 1:3	4.25

Fuente. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación, (p.16), por Herrero J., 2008, Bolivia: Copyright 2008 por Editorial Creative Commons.

$$ST = Cd \times 0.17 / VI. \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Ecuación 10.

ST= Sólidos totales

VI: volumen líquido en m³.

Cd: Carga diaria en Kg.

Sv: Sólidos Volátiles (Kg/m³ día).

Los sólidos volátiles representan la parte de los sólidos totales del estiércol que están sujetos a pasar a fase gaseosa. Su valor corresponde

aproximadamente -y de forma general- al 77% del sólido total introducido por día.

$$SV = ST \times 0.77 \text{ (Kg/m}^3 \text{ día).}$$

Ecuación 11.

ST= Sólidos totales

Sv= Sólidos volátiles.

PB: Producción de biogás (m³/Kg SV m³ día).

La producción de biogás diaria depende de la cantidad de sólidos volátiles que haya en la carga de estiércol. Por ello, para conocer la producción de biogás es necesario conocer previamente la cantidad de estiércol que se va a introducir diariamente al biodigestor, se debe determinar la cantidad de sólidos totales que hay en el estiércol (multiplicando Kg de estiércol por 0.17), y a partir de ese resultado, se estima los sólidos volátiles (multiplicando los sólidos totales por 0.77). Conocidos los sólidos volátiles, dependiendo del tipo de estiércol que se esté empleando, la producción de biogás será mayor o menor.

Tabla 15.

Factores de producción de biogás.

Residuo orgánico	PCH₄ [m³/ Kg SV]
Vaca	0.2
Res	0.35
Desecho municipal	0.2
Cerdo	0.45
Gallina	0.39
Aguas negras	0.406

Fuente. Biodigestores familiares guía de diseño y manual de instalación, (p.16), por Herrero J., 2008, Bolivia: Copyright 2008 por Editorial Creative Commons.

$$PB = 0.45 \times SV \quad (m^3_{biogás} / m^3_{VL} / día)$$

Ecuación 12.

PB= Producción de biogás.

SV= Sólidos volátiles.

➤ **Producción de bioabono por día.**

Según Herrero, 2008; En el proceso de la fermentación se perdió una fracción de sólidos totales. El estiércol fresco tiene entorno a un 17% de sólidos totales. El rango puede variar de 13 a 20%. Los sólidos totales representan el peso del estiércol una vez seco y por tanto es la carga real de materia sólida que se estará introduciendo en el biodigestor.

$$\text{Bioabono} = \text{Carga EF} - (\text{Carga EF} \times 0.17)$$

Ecuación 13.

EF: estiércol fresco. (Kg)

B.3. Construcción y armado del biodigestor.

El biodigestor fue diseñado mediante las condiciones del lugar, la topografía y la accesibilidad a la materia prima su construcción e instalación se basa en la Guía de diseño y Manual De Instalación de Biodigestores Familiares, Martí Herrero Jaime.

A continuación en la tabla 16, se menciona los materiales y accesorios que se utilizaron para la construcción y armado del biodigestor planteado para este proyecto.

Tabla 16.

Lista de materiales utilizados en la construcción y armado del biodigestor.

Accesorios	Cantidad
Plástico de polietileno grueso color negro	7 m
plástico de polietileno simple	5 m
Tubo PVC de 4"	1 m
Tubo PVC de 1/2"	5m
Tubo PVC de 1"	1m
Reducciones de 1" a 1/2"	2
Tee de 1/2" de PVC	4
codos PVC de 1/2"	6
Rosca macho 1/2".	1
Rosca hembra 1/2".	1
Discos de jebe (caucho) de 15 cm de diámetro	2
Discos de PVC rígido de 10 cm de diámetro	2
Válvula de esfera 1/2"	5
manguera de plástico 3/4"	2m
Alambre	1m
Clavos de madera	1/2 Kg
Cámara de llanta	3
Esponjas de alambre	5
Pegamento de PVC (azul)	2
Guantes látex	2

Fuente: Elaboración propia.

C. Monitoreo y control.

Durante el tiempo que se realizó la carga diaria se registraron parámetros que ayudaron con la de producción de biogás. La temperatura y humedad del interior de la carpa solar se determinaba antes de colocar el sustrato ya que con estas trabajó el biodigestor. Se registraron los kg diarios de estiércol

producido por el ganado porcino, mientras que de la mezcla de agua y estiércol se controlaba el pH tanto a la entrada como la salida del biodigestor.

- Controlar el pH del sustrato de salida para evitar una alteración en el proceso de fermentación.
- Con un termómetro se tomaba la temperatura dentro de la caseta plástica donde se encontraba el biodigestor.
- Cuando el Biodigestor alcanza su volumen máximo se hizo pruebas de olor, llama del biogás.

3.2. Construcción, diseño o simulación del biodigestor.

3.2.1. Calculo de diseño.

3.2.1.1. Volumen del biodigestor.

Para el dimensionamiento del biodigestor se utilizó la cantidad de estiércol producido por 2 cerdos de 7 meses, con un peso de 50 kg cada uno.

A. Volumen de carga.

Se pesó durante 5 días el estiércol generado por los dos cerdos obteniendo la siguiente tabla:

Tabla 17.

Determinación de la cantidad de excretas diarias.

Cantidad de excretas de cerdo /día en Kg.				
dia 1	dia 2	dia 3	dia 4	dia 5
3.89	3.96	4.12	3.91	4.13

Fuente: Elaboración propia.

$$Ced = \frac{3.89 + 3.96 + 4.12 + 3.91 + 4.13}{5}$$

$$Ced = \frac{20.01}{5}$$

$$Ced = 4.00$$

La cantidad de sustrato que ingresa en el biodigestor viene determinada por la relación existente entre el estiércol y agua, lo cual se lo realizo tomando en cuenta el tipo de biodigestor empleado ya que según estudios realizados la relación recomendada para biodigestores tubulares es de 1:4, esto es conveniente por que no se formaran “natas” en la superficie. Además, una buena dilución de la mezcla asegura que el biodigestor realmente sea de flujo continuo, evitando que se atasque por exceso de materia sólida en su interior.

De acuerdo a la ecuación 1 y 2 tenemos:

$$Cd = 4 \text{ (Kg)de estiércol} + 16 \text{ (Kg)de agua.}$$

$$Cd = 20 \text{ Kg.}$$

La determinación del volumen de carga total viene dado por el tiempo de retención que en nuestro caso es de 25 días.

De acuerdo a la ecuación 4 tenemos que el volumen líquido se calcula de la siguiente manera:

$$Vl = 20 \text{ Kg} \times 25 \text{ dias.}$$

$$Vl = 500 \text{ Kg} = 500 \text{ L} = 0.5 \text{ m}^3$$

B. Volumen de metano producido.

De acuerdo a varias bibliografías consultadas se considera que el 75% del volumen del digester está constituido por la fase líquida y el 25 % por la fase gaseosa, este volumen a la vez sirve como gasómetro o campana de biogás.

De acuerdo a la ecuación 5 tenemos que el volumen del biogás es:

$$Vg = \frac{0.25}{0.75} \times 0.5 \text{ m}^3$$

$$Vg = 0.17 \text{ m}^3$$

Por lo tanto el volumen del biodigester será según la ecuación 3.

$$VTd = (0.5 + 0.17) m^3$$

$$VTd = 0.67 m^3$$

3.2.1.2. Diámetro del biodigestor

Una vez calculado el volumen del biodigestor se puede determinar las dimensiones del biodigestor, tomando como referencia el ancho de la membrana de polietileno tubular seleccionada que en nuestro caso tiene 2m de perímetro.

Calculo del diámetro del biodigestor, ecuación 6:

$$D = \frac{2 m}{\pi}$$

$$D = 0.64 m$$

3.2.1.3. Longitud del biodigestor

Para lo cual se tomó al biodigestor como un cilindro, para lo cual nos basamos en la ecuación 8:

$$L = \frac{4 \times 0.67 m^3}{\pi \times 0.409 m^2}$$

$$L = 2.08m.$$

3.2.1.4. Cálculo de la presión hidrostática presente en el interior del biodigestor.

Debido a que la presión ejercida por el agua sobre el gas en la válvula de seguridad vario se tiene dos presiones la primera correspondiente a los primeros 10 días de funcionamiento en los cuales la longitud del tubo dentro del agua fue de 13cm en la válvula de seguridad y la segunda del resto de días de retención en los que la longitud fue de 5cm.

➤ Presión inicial los primeros 10 días del tiempo de retención.

Tenemos que la presión atmosférica es de 0,99 atm que equivalen a 100,31 KPa, además que 1mm de columna de H₂O =9,81 Pa.

$$P_o = 130\text{mm de columna de H}_2\text{O} + \text{Patmosférica}$$

$$P_o = 130 * 9.81 \text{ Pa} + 100310 \text{ Pa}$$

$$P_o = 101585.3 \text{ Pa} = 101.58 \text{ KPa.}$$

Ahora aplicando la ecuación 9 tomando en cuenta que al fluido se lo considera Tener la misma densidad que el agua:

ρ : densidad del fluido 1000 Kg/m³

g : aceleración de la gravedad 9,8m/s².

h: altura del fluido 0,96 m.

P₀: 101585.3 Pa.

$$P = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.96\text{m} + 101585.3 \text{ Pa.}$$

$$P = 110993.3 \text{ Pa.} = 110.993 \text{ KPa.}$$

➤ **Presión final**

P₀ = 50mm de columna de H₂O + Patmosférica

$$P_0 = 50 * 9.81 \text{ Pa} + 100310 \text{ Pa}$$

$$P_0 = 100800.5 \text{ Pa} = 100.801 \text{ KPa.}$$

Luego la presión hidrostática se calcula mediante la ecuación 9, tomando en cuenta que al fluido se lo considera tener la misma densidad que el agua:

ρ: densidad del fluido 1000 Kg/m³

g: aceleración de la gravedad 9,8m/s².

h: altura del fluido 0,96 m.

P₀: 100800.5 Pa.

$$P = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0.96\text{m} + 100800.5 \text{ Pa.}$$

$$P = 110208.5 \text{ Pa.} = 110.208 \text{ KPa.}$$

3.2.1.5. Estimación de producción de biogás.

Para determinar de forma teórica el volumen de biogás producido diariamente se hizo uso de las ecuaciones 10, 11 y 12.

Para estimar el biogás producido es necesario partir de la carga de estiércol, que en este caso es de 4kg. Además se tiene que el volumen líquido es de 0.5 m³.

Por lo tanto los sólidos totales serán:

$$ST = 4 \text{ Kg} \times \frac{0.17}{0.5 \text{ m}^3}$$

$$ST = 1.36 \text{ Kg/m}^3 \text{ día}$$

Los sólidos volátiles serán:

$$SV = 1.36 \times 0.77 \text{ (Kg/m}^3 \text{ día)}.$$

$$SV = 1.05 \text{ (Kg/m}^3 \text{ día)}.$$

La producción de biogás será:

$$PB = 0.45 \times 1.05 \text{ (m}^3_{\text{biogas}} / \text{m}^3_{\text{VL}} / \text{día)}$$

$$PB = 0.47 \text{ (m}^3_{\text{biogas}} / \text{m}^3_{\text{VL}} / \text{día)}$$

Que para un biodigestor con un VL de 0.5 m³ significa que cada día se va a producir 0.23 m³ de biogás.

$$\text{Biogás m}^3/\text{día} = 0.23 \text{ m}^3 = 230 \text{ L/día.}$$

3.2.1.6. Producción de bioabono.

Para estimar la cantidad de bioabono producido hacemos uso de la ecuación 13.

La cantidad de estiércol fresco/ día es de: 4Kg.

$$\text{Bioabono} = 4Kg - (4Kg \times 0.17)$$

$$\text{Bioabono} = 3.32Kg/\text{dia.}$$

3.2.2. Construcción del biodigestor tubular de plástico.

Este digestor tiene unas dimensiones adecuadas para el tratamiento de 4 kg de excretas diarias, con una proporción de mezcla de excretas y agua de 1:4 (es decir, 4 kg de excretas y 16 L de agua). El biodigestor se construye con plástico de polietileno el más grueso del mercado la razón es de obtener resistencia ante pinchazos o golpes y su mayor durabilidad.

A continuación se detalla la construcción de los diferentes elementos que integran el sistema de producción de biogás y biol. Al principio de cada sección se listan las herramientas y materiales necesarios en cada una de ellas.

3.2.2.1. Construcción de la zanja (Soporte de madera)

Materiales

- Tablas
- Clavos
- Nivel
- Sacos o fundas de plástico
- Aserrín
- Plástico de invernadero.

Procedimiento

Conociendo los parámetros de dimensionamiento de la zanja mencionados en el capítulo II, componentes del Biodigestor, para un plástico de ancho 1 metro; se comenzó a construir el soporte de madera para el biodigestor. El soporte según los cálculos de dimensión posee una longitud de 2.1 m (l) y una profundidad de 0.7 m (p), adicionalmente 10cm de la profundidad se llenó con material aislante (aserrín y paja) y la base posee un ancho de 0.3m (a), terminando en una abertura de 0.5m (b). Se colocó en el fondo plástico y sacos, posteriormente se esparció aserrín cubriendo todo el espacio, se forró las paredes clavando de igual manera plásticos y sacos con el fin de aislar la humedad y mantener una temperatura adecuada para favorecer con la fermentación del sustrato. (Ver anexo 05).

3.2.2.2. Construcción del biodigestor

Materiales.

- 5 m de Plástico de invernadero negro de 1m de ancho.
- 1m de tubo PVC de 4"
- Rosca macho y hembra de ½".
- 02 discos de jebe (caucho) de 15 cm de diámetro, con un agujero en el centro de ½".
- 02 discos de PVC rígido o nylon de unos 10 cm de diámetro, con un agujero en el centro de ½".
- Teflón
- Tiras de caucho (cámara de llanta)
- Tijera

Procedimiento

Lo primero que se realizó fue cortar en la mitad la manga de plástico obteniendo 2 mangas de 2.5 m de longitud, luego se tomó las dos mangas de plásticos y se extendieron, una de ellas en un lugar libre de piedras y ramas para que no se pueda lastimar el plástico, la otra manga se recogió y extendió por el interior del primer plástico logrando que este se queden cruzados obteniendo así una manga de doble capa. Una vez obtenida la manga de plástico de doble capa se perforó un hoyo en la mitad de esta y se introdujo una rosca macho y hembra en la abertura

asegurándola y ajustándola con teflón para evitar que existan fugas cuando empiece a salir el gas durante el proceso de fermentación.

Se cortó dos tubos de 4 pulgadas para la entrada y salida del sistema, cada uno de 50 cm de longitud, para sujetarlos bien al biodigestor y evitar fugas se usaron tiras de caucho de 10 cm de grosor, estas se envolvieron en cada uno de los extremos (bocas) de los tubos que van dentro del digestor para protegerlo de posibles rupturas ya que normalmente son ásperos, los mismos que se introducen en los extremos de la manga de plástico y así la liga se amordaza sobre sí misma y protege al plástico por el interior y evita que se rompa , se dejó fuera del plástico 20 cm del tubo y posteriormente se realizaron pliegues con el plástico hasta ponerlo en contacto con el tubo y se lo ajustaron con tiras de caucho del mismo grosor para cerrar los extremos de la manga; se lo ajustó fuertemente para que no haya fugas; el mismo proceso se realizó por ambos lados, se midió 20 cm a partir del origen del plástico para empezar a envolverlo con las ligas quedando 10cm de la tubería sin amarrar ya que se encuentra en el interior. (Ver anexo 06).

3.2.2.3. Instalación del biodigestor.

El biodigestor una vez armado se trasladó hacia el soporte de madera, ahí se lo extendió a lo largo colocando correctamente la entrada y la salida del mismo, de manera que las tuberías queden bien ubicadas y faciliten tanto el ingreso como la

salida del sustrato. Luego se tapó con plástico y maderas para mantener la temperatura del biodigestor y evitar que se moje con la lluvia.

3.2.2.4. Conducción del biogás.

Materiales

- 4 codos PVC de ½”
- 4 Llaves de bola de ½”
- 3 Tee de ½” de plástico
- 5 m de Tubería PVC ½”
- 2 Reducciones de 1” a ½”
- Teflón
- 2 abrazaderas de ½”.

Procedimiento

A partir de la rosca central del biodigestor se levantó 80 cm de tubería, a continuación se acopló un codo de 90° para dar dirección a la tubería, luego de 60cm de tubería instalada se colocó una tee de ½ “, en la pierna inferior se enroscó 40cm de tubería PVC la cual forma parte de la válvula de seguridad, en el otro extremo se continuó con 10cm de tubería la cual fue acoplada a una válvula de bola que sirve para enviar o detener la salida del biogás, luego de 1 m de tubería más se colocó otra tee de ½ “, en la pierna central de este se acopló 80 cm de tubería para

la conducción del biogás hacia el reservorio con su respectiva válvula de bola. En el extremo siguiente de la tee de ½", se siguió con 1.20 m más de tubería, al término de este se adaptó un filtro de 36cm y de 1 pulgada de diámetro.

A partir del filtro se colocó una tee de ½", a sus dos lados fue adaptado una válvula de bola la cual ayudara a regular la cantidad de biogás que sale hacia la cocineta, mediante los adaptadores de llave a manguera se unió 90 cm de manguera de ½ punto rojo PVC a cada lado para finalizar con la unión a las hornillas de la cocineta. (Ver anexo 07).

3.2.2.5. Válvula de seguridad.

Materiales.

- Botella plástica de soda de 3 L
- Tijera
- Tee de ½"
- Agua
- Tubería PVC ½ "
- Alambre.

Procedimiento

A partir de los 40 cm de tubería para la válvula de seguridad se encajó una botella de 3L a la cual se le hizo una abertura en la parte superior con la finalidad de colocar agua cuando esta se haya evaporado. La botella se sujetó con un alambre para que esta no caiga y la tubería este sumergida a la distancia correcta para controlar la presión del sistema. Como se ha mencionado en la Guía de diseño y Manual de Instalación de Biodigestores Familiares, Martí Herrero Jaime, la presión va a estar determinada por la altura del lugar, la distancia que existe entre el digestor y la cocina y el tipo de estufa que se va a utilizar, cuando a mayor altura se presenta el lugar menor presión debe existir y menos tiene que estar sumergida, la tubería se la sumergió así unos 13 cm de acuerdo a 87 m.s.n.m. de altura a la que está ubicada la vivienda. (Ver anexo 07).

3.2.2.6. Filtro.

Materiales

- Tubería PVC de 1”
- Virutas de hierro.

Procedimiento.

Primero se lavó las virutas de hierro con detergente para que estén libre de grasas, una vez preparadas las virutas se colocó dentro de una tubería de 1” de 36

cm de longitud, Luego de haber armado el filtro se procedió a instalarlo en el sistema de tuberías para la conducción del biogás, acoplándolo con las reducciones de 1 - 1/2”.

3.2.2.7. Reservorio de biogás

Materiales:

- 2 m de plástico polietileno ancho de rollo 1 m.
- 1m de tubo PVC de 1/2 ”
- Manguera de plástico de 3/4”
- Tiras de caucho (cámara de llanta)
- Tijera

Procedimiento.

Lo primero que se realizó fue cortar la manga por la mitad (de modo que se tengan dos mangas de 1 m de largo) e introducirlo una dentro de la otra para de ese modo tener una manga de 1m de largo de doble capa, con lo que se reduce la posibilidad de que se malogre la manga. Luego se tomó un tramo de 0,5 m de tubo de PVC de 1/2” y se introdujo 30 cm en una de las aberturas de la manga. Se dobló

la manga en acordeón y se ató todo con jebe, igual como se hizo al construir el biodigestor.

Una vez bien ligado el jebe, se pegó una válvula de bola en el extremo libre del tubo. Luego nuevamente un pequeño tramo de tubo (15 cm) y ahí se conectó con un tramo de 1 m de manguera de $\frac{3}{4}$ ". El tubo fue introducido a presión dentro de la manguera, y todo se ajustó con una abrazadera del tamaño adecuado. El otro extremo de la manguera se conectó al tubo que viene del biodigestor. La función de la manguera es dar la flexibilidad a esta unión, ya que el reservorio de gas, al hincharse y deshincharse, subirá y bajará.

3.2.3. Operación del biodigestor.

3.2.3.1. Carga inicial.

Materiales

- Agua
- Excreta de cerdo
- Carretilla
- Lampa
- Baldes
- Cilindros

- Guantes
- Embudo de metal.

Procedimiento.

Una vez colocado la manga en su lugar y fijados los tubos, se llenó el biodigestor con la primera carga la cual es una mezcla homogénea de estiércol porcino con el agua en relación de 1:4. (Ver anexo 10).

- **Agua:** Se llenó el cilindro con agua y luego se fue contando con los baldes la cantidad de agua que se introducía.
- **Estiércol:** El estiércol usado para la carga inicial fue almacenado previamente en un cilindro cerrado con la finalidad de evitar su contacto con el aire y se mantuviera fresco. Para su llenado al biodigestor se usaron baldes para medir la cantidad introducida.

En una carretilla antes de llenar la primera carga se mezcló el agua con el estiércol para que quede lo más homogéneo posible evitando los grumos.

Los volúmenes para el cargado inicial de acuerdo a las dimensiones del biodigestor fueron:

Componente	Volumen (L)	%
EXCRETA	100	20%
AGUA	400	80%

Se observa como la proporción de excreta y agua es 1:4.

➤ **Estabilización.**

Una vez cargado el digester se inició con el proceso de degradación anaeróbica, esta etapa tuvo una duración de 30 días (20 de Junio al 20 de Julio/2016), durante la cual se registraron las mediciones de los parámetros de operación (PH y temperatura).

Durante esta etapa no se realizó cargas regulares con el fin de que no exista una sobre carga de materia orgánica y así evitar que la fermentación acida predomine sobre la fermentación metanogénica.

3.2.3.2. Cargas diarias.

Herramientas

- 1 Lampa.
- 1 baldes de 5 y 20L.

- 1 romanilla.
- Termómetro.
- Medidor de PH.

Procedimiento.

Una vez el biodigestor registro la producción mínima de gas, se dio por terminada la etapa de estabilización e inicio la etapa de operación. En el lapso de este tiempo se han ido realizando cargas y descargas regulares y a la vez se han ido monitoreando los factores operativos, poniendo especial énfasis en tres de ellos, que fueron determinantes para el funcionamiento del biodigestor.

- Cargas regulares
- PH
- Temperatura del biodigestor
- Temperatura del ambiente

Las cargas diarias se realizaron a la misma hora todos los días para de esta manera se ayude en la digestión de la materia prima. La recolección del excremento se realizó con ayuda de una lampa, los excrementos fueron dispuestos en baldes pequeños de 5L de ahí se pesaron en la romanilla obteniendo los 4 Kg deseado. Luego en un balde de 20L se mezclaron los 4 kg de estiércol con 16 litros de agua previamente temperada a 20-30°C. (Ver anexo 09, 10 y 11).

Componente	Volumen (L)
EXCRETA	4
AGUA	16

Es muy recomendable el uso de los orines de los cerdos en substitución del agua, lográndose así una reducción muy considerable en el consumo de agua.

3.3. REVISIÓN Y CONSOLIDACIÓN DE RESULTADOS.

3.3.1. Cálculos de diseño

Tabla 18.

Resultados de los cálculos de diseño del biodigestor.

DISEÑO DEL BIODIGESTOR		
Parámetro	Resultado	Unidad
Tiempo de retención	25	Días
Cantidad de excretas	4	Kg/día
Cantidad de sustrato	20	Kg
Volumen del liquido	0.5	m ³
Volumen del metano producido.	0.17	m ³
Volumen total del biodigestor.	0.67	m ³
Diámetro del biodigestor	0.64	m
Longitud del biodigestor	2.08	m
Volumen del reservorio de biogás.	0.13	m ³
Presión inicial (primeros 10 días del tiempo de retención.	100.801	Kpa
Presión final	110.208	Kpa

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Temperaturas promedio obtenidas en el interior del invernadero y ambiente.

Tabla 19.

Temperaturas promedio obtenidas para el TR.

Fecha	T °C Promedio Ambiente	T °C Promedio Invernadero.
18/06/2016	20.8	25.7
19/06/2016	19.4	27.3
20/06/2016	19.6	25.2
21/06/2016	19.5	24.8
22/06/2016	20.05	24.32
23/06/2016	19	25.85
24/06/2016	19.5	24.5
25/06/2016	20.2	26.9
26/06/2016	20.9	26.32
27/06/2016	20.3	25.9
28/06/2016	20.4	26.7
29/06/2016	20.1	26.2
30/06/2016	19.6	25.2
01/07/2016	20	27
02/07/2016	20.6	27.15
03/07/2016	18.5	25
04/07/2016	19.5	24.5
05/07/2016	20.2	26.9
06/07/2016	20.9	26.32
07/07/2016	20.3	25.9
08/07/2016	20.4	26.7
09/07/2016	20.1	26.2
10/07/2016	19.6	25.2
11/07/2016	20	27
12/07/2016	20.6	27.15
13/07/2016	18.5	25

14/07/2016	18	27.8
15/07/2016	19.8	29.34
16/07/2016	19.7	30.2
17/07/2016	19.1	29.05
18/07/2016	20.9	29.25
19/07/2016	19.2	29.9
20/07/2016	18.12	27.5
21/07/2016	19.7	27.9
22/07/2016	20.7	28.35

Fuente: Elaboración propia.

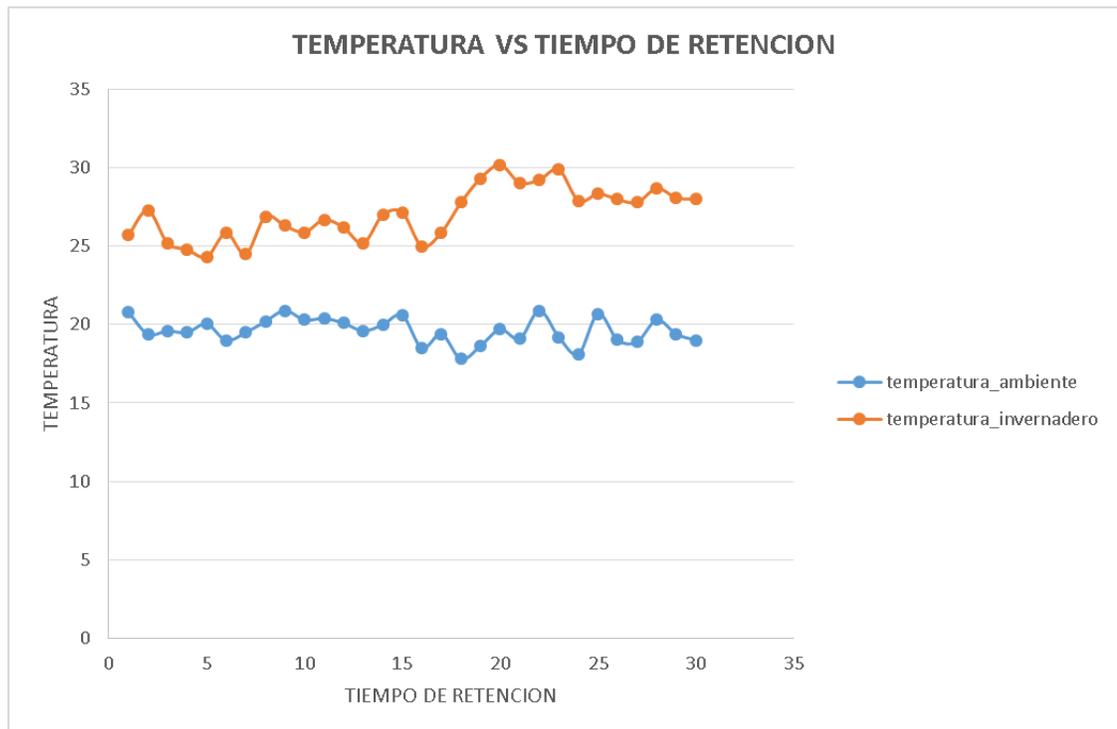


Figura 16. Variación de la temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en la figura 9, la variación de la temperatura promedio diaria que existe dentro el invernadero que cubre al biodigestor oscila entre 24-30 °C, mientras que la temperatura ambiente se encuentra entre 17-20°C; esta diferencia se debe al aislamiento térmico. Podemos observar que a partir del día 17 la temperatura del biodigestor tiene un comportamiento similar a la temperatura ambiente lo cual indica una estabilización del biodigestor coincidiendo de esta forma lo indicado en la teoría capítulo II Factores determinantes para la producción de biogás. En los primeros días del tiempo de retención hasta aproximadamente el quinto día no hay un incremento notable de temperatura dentro del biodigestor debido a que las bacterias están en periodo de adaptación a las condiciones del medio, a partir de ese día existen incrementos notables de temperatura del biodigestor ya que una vez que las bacterias se han adaptado se presenta la fase de crecimiento exponencial la cual presenta una velocidad que se va incrementando poco a poco hasta llegar a su máximo valor y permanecer constante.

3.3.4. Volumen de biogás producido.

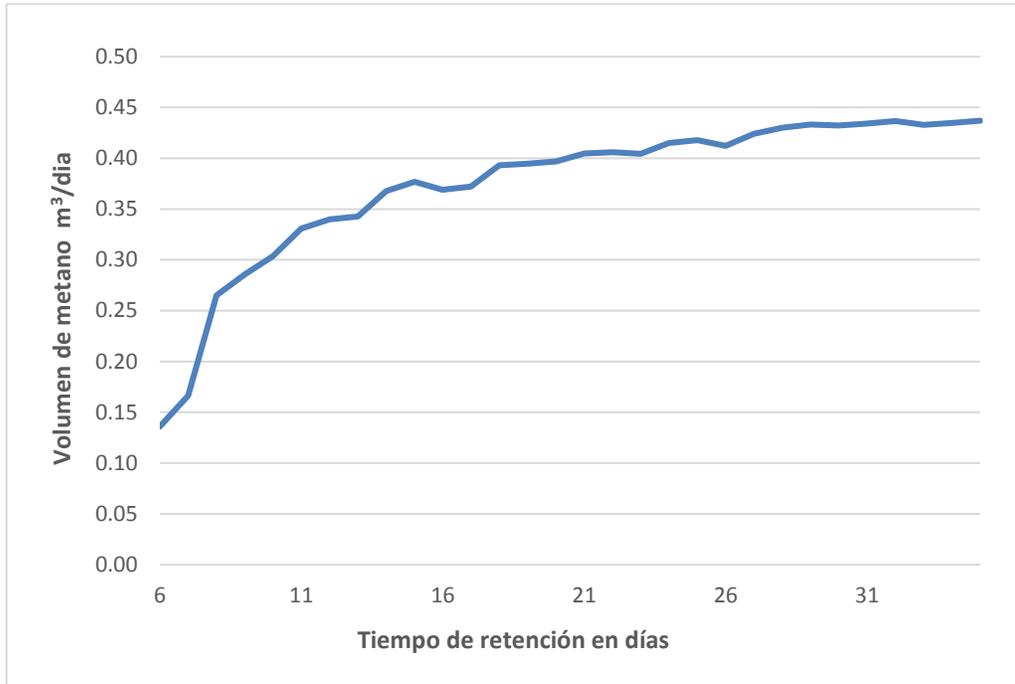


Figura 18. Producción de biogás en función del tiempo de retención.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 18, la producción de gas se mostró nula durante los primeros 6 días, los cuales se deben a las primeras etapas de digestión anaerobia (capítulo II , Descripción del proceso de digestión anaerobia) en las cuales existe una transformación enzimática de los compuestos de alto peso molecular hasta llegar a estabilizarse en la fase de metanogénesis (valores positivos), observando un aumento en la producción de biogás en días contiguos con caídas de volumen que coinciden con la disminución de la temperatura.

A partir del día 31 de fermentación se observa como la cantidad de producción de gas se mantuvo regular hasta la finalización del proyecto, esto se debe a la estabilización del sistema.

CONCLUSIONES

- Mediante la aplicación del biodigestor tubular a escala piloto, se pudo obtener biogás y biol al término de 30 días de fermentación del digestor, validando de esta forma los requerimientos teóricos.
- Para una cantidad de volumen total de 0.67 m³ de sustrato inicial se diseñó un biodigestor tubular de 2.08 m de longitud y diámetro 0.64 m (plástico negro doble de 1m de ancho).
- Se logró estimar el peso promedio de excretas de cerdo que se genera a diario en la granja, resultando 4 kg/día.
- El diseño de un biodigestor con medidas apropiadas y materiales adecuados, contribuyen a que el producto final que se obtenga de este proceso sea de calidad y garantizado para la aplicación a la granjas porcinas, evitando daños al ambiente.
- Durante el monitoreo constante en la etapa de estabilización se logró controlar la temperatura y el PH.
- Mediante la aplicación del biodigestor se pudo reducir la cantidad de excretas de cerdo que eran dispuestas inadecuadamente.

RECOMENDACIONES

- Para obtener un biol de mejor calidad es recomendable dejar un mayor tiempo al proceso de digestión.
- Para el control de temperatura del biodigestor es recomendable aislar al biodigestor del ambiente mediante la construcción de un invernadero.
- Es recomendable el control de la temperatura y PH para lograr mejores resultados en el proceso de biodigestión, puesto que las bacterias son muy sensibles a los cambios de estos, lo cual retrasa el proceso.
- Se recomienda el uso de la orina del ganado o agua de lluvia para la sustitución del agua potable.
- Es importante dar a conocer la tecnología de sistemas de tratamiento de excretas de ganado porcino utilizando biodigestores en las comunidades que lo requieran, ya que en la mayoría de nuestro país se conoce muy poco de los beneficios que tiene el tratar adecuadamente las excretas.
- En el Perú debería haber una mayor regulación y vigilancia sobre el uso y manejo de excretas animales, ya que sólo se especifican sobre la disposición final y descargas de contaminantes al agua, restando importancia a las emisiones a la atmósfera y suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Albarracín, D. (1995) Biblioteca del campo granja integral autosuficiente. Ecuador: Ed. Hogares Juveniles Campesinos.
- Barons, R. (2005). *Incidencia ambiental de las explotaciones porcinas: diseño de alojamientos ganaderos*. Consultado el 18 de Junio del 2016, de https://www.3tres3.com/medioambiente/incidencia-ambiental-de-las-explotaciones-porcinas-diseno-de-alojamie_1326/.
- Bautista, M. (2010), Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. (Tesis de titulación). Universidad de Carlos III, Madrid – España.
- Bavera, G. (2007, 25 de Marzo). *Crianza del porcino* .Sitio argentino de producción animal. Consultado el 01 de Julio del 2016, de <http://www.produccionbovina.com/>
- Bermúdez, J., Canovas, M., Manjon, A., Iborra, J., & Howel, J. (1988). Digestión Anaerobia. Murcia: Secretariado de Publicaciones.
- “Biorreactores”. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/1608/Capitulo2.pdf>.

- Bravo G. (1992). Construcción de un Biodigestor en Ferrocemento. (Tesis de titulación). Universidad Austral de Chile.

- Botero, R. (2009). Biogás a bajo costo en Costa Rica. Consultado el 21 de Mayo del 2016, de http://news.bbc.co.uk/hi/spanish/forums/newsid_7937000/7937917.stm

- Cáceres, J., Gutiérrez, J. (1985), *Aumento de la producción de biogás del Digestor de la F.I.Z.*, (Tesis de Titulación) Facultad de Ingeniería Mecánica., Escuela de Ingeniería Mecánica., Escuela Superior Politécnica de Chimborazo., Riobamba-Ecuador.

- Castrillón, Jiménez y Bedoya. (2002, 18 de Marzo), *Porquinaza en la alimentación animal*. Consultado el 10 de Junio del 2016, Revista Lasallista de investigación. URL: <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/07276%20Porquinaza%20en%20la%20alimentaci%C3%B3n%20animal.pdf>.

- Campos, B., (2011, 12 de Enero). Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias de la Universidad Agraria de la Habana., Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino. Consultado el 20 de Mayo del 2016, de la base de datos Scielo.

URL: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2071>.

- Concellón, A. (1974) *Construcciones prácticas porcinas*. España: Ed. Aedos.
- Canul, M. (2010), *Estudio de los parámetros de operación de un reactor anaerobio para la producción de hidrógeno a partir de residuos orgánicos*, (Tesis de Titulación) Universidad Estatal de Arizona. Arizona. USA.
- Cueva, A. (2012), *Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales, por fermentación semicontinua*. (Tesis doctoral) La Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna – Perú.
- CHUNGARO, M., MANITIO, G., *Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas.*, Facultad de Ingeniería Mecánica., Escuela Politécnica Nacional., Quito-Ecuador., TESIS., 2010., Pp. 52-124.
URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000>.
- [DIGESA] Dirección General de Salud Ambiental. (2002). *Guía para la crianza sanitaria de cerdos*. Perú: DIGESA.
- Díaz, M. (2010, 03 de Octubre). *Eliminación del Sulfuro de Hidrógeno en el Biogás*. Revista Científico Popular Trimestral de Cuba Solar. Consultado el 05 de Julio del 2016, de: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energi>

- De La Torre, N. (Octubre de 2008). Digestión anaerobia en comunidades rurales. Universidad Carlos III de Madrid. España.
- FAO, Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales, Producción de gas y saneamiento de efluentes, CEPIS, 1986, p. 12, 13, 14, Lima – Perú.
- FAO. (2012, 10 de Julio). Integración por Zonas de la Ganadería y de la Agricultura Especializadas (AWI): Análisis del impacto ambiental de la porcicultura y perspectivas del concepto AWI en la región. Consultado el 10 de Junio de 2016, de lavase de datos Deposito de documentos de la FAO.
<http://www.fao.org/wairdocs/lead/x6372s/x6372s07.htm>.
- Flotats, X., Bonmati, A., Campos, E., Teira, R. (2000, 12 de Octubre). El proceso de secado de purines en el marco de Gestión Integral de Residuos Ganadero, Tratamiento de residuos ganaderos. Consultado el 10 de Junio de 2016, de la base de datos Portal del coneixement obert de la UPC.
<http://upcommons.upc.edu/>
- García, k. (2010). *Codigestión anaeróbica de estiércol y lodos de depuradora para producción de biogás* (tesis de titulación). Universidad de Cádiz, Cádiz – España.

URL:<http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/7413/VERSION%20FINAL.pdf?sequence=1>.

- García, A. (2000). *Calidad alimentaria de la mezcla de cerdo y esquilmos agrícolas deshidratada al sol para bovinos de engorde.*(Tesis de titulación) Universidad de Colima, México.

- Gómez, G. (2014, 22 de Noviembre). El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente. Agronotas. Consultado el 23 de Junio del 2016,

URL:http://agronotas.es/A55CA3/Agronotas.nsf/v_postid/496DD3C732F54F37C1257B22006D45B9.

- Gutiérrez V. (2005, 10 de Enero). Métodos para la producción porcina y manejo del estiércol. Universo porcino. Consultado el 27 de Junio del 2016, de

http://www.aacporcinos.com.ar/articulos/metodos_para_la_produccion_porcina_y_manejo_del_estiercol.html

- Herrero, J. (2008). Biodigestores Familiares: Guía de diseño y manual de instalación. Bolivia: GTZ-Energía.

- Hernández, J. (2010). Rentabilidad privada de las granjas porcinas en el sur del estado de México. México: Ed. Universidad y Ciencia.
- Jaramillo, O. (2010), Plan piloto de biodigestores para el aprovechamiento de las heces de porcino obteniendo biogás y biofertilizantes, (Tesis de titulación). Universidad de Las Américas, Quito - Ecuador.
- Ley N° 27314 (2000). Ley General de Residuos Sólidos. Ministerio de Salud.
- Ley N° 28611 (2005). Ley General del Ambiente. Ministerio de Ambiente.
- LÓPEZ, P., ANTONIO, C. (2003) Valorización del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás. Colombia: Asociación Colombiana de Porcicultores. URL: <http://es.scribd.com/doc/-Manual-Bio-DigestOr>
- Lara, E., Hidalgo, M. (2011). *Diseño de un biorreactor y conducción del biogás generado por las excretas de ganado vacuno, estación Tunshi-epoch.* (Tesis de grado).Universidad de Chimborazo - Ecuador.
- López, A. (2009). *Valoración del estiércol de cerdo a través de la producción de biogás.* Asociación colombiana de porcicultores. Colombia.

- Lozano, (2012), Diseño de biodigestores para las familias caprinocultoras de la cuenca baja del Río Chillón. (Tesis de titulación). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú.

- Moreto C. (2012). *Diseño de un biodigestor de estiércol porcino para una granja agrícola ubicada en el barrio la morita, parroquia de Tumbaco para el año 2012-2013.* (Tesis titulación). Universidad Internacional Sek, Quito – Ecuador.

- Martí, N. (2006). Estudio del proceso de digestión anaerobia para optimizar la recuperación de fósforo en EDAR'S. Boca Ratón. Florida. USA.

- Margalef. R. (1991). Ecología. México: Ed. Omega.

- Olaya, V. (2012) *Fundamentos para el Diseño de Biodigestores.* Colombia: Ed. CPAV.

- OECD/FAO (2015), OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2015, OECD Publishing, París.

- Pérez, J. (2010). *Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en ganaderos y lecheros.* (Tesis de titulación) Universidad de Chile. Chile.

- Ruiz, R. (2010). *Mejora de las condiciones de vida de las familias porcicultoras del parque porcino de Ventanilla, mediante un sistema de biodigestión y manejo integral de residuos sólidos y líquidos, Lima, Perú* (Tesis de Doctorado) Universidad Ramón LLull, Barcelona - España.
- Ramírez, I. (2010). Emisiones de metano generadas por excretas de animales de granja y contenido rumial de bovino. Institución de enseñanza e investigación en ciencia agrícolas. Texcoco. México.
- Robalino, H. (2008). Estudio comparativo y aplicación de materia prima alternativa en biodigestores unifamiliares de flujo continuo en la Zona de Intag.Cotacachi-Imbabura. Universidad Técnica del Norte. Ecuador.
- Sierra C y Rojas C. (2010), *La materia orgánica y su efecto como enmienda y mejorador de la productividad de los cultivos.* (Tesis de titulación) Universidad de Chile. Chile.
- Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. Facultad de Cs. Exactas y Naturales y Agrimensura UNNE. Corriente. Argentina.
- Salazar, G. (2004). *Uso de los desechos de origen animal en México.* Consultado el 12 de Abril del 2016, de <http://www.fao.org/ag/frg/APH134>.

- Sosa, R., Chao, R., Cruz, E., y Diana, M. (5 de Mayo de 2007). *Boletín técnico porcino. Biodigestores*. Consultado el 10 de Julio de 2016, de la base de datos del Instituto de investigaciones porcinas. Punta Brava. Cuba. <http://www.iip.co.cu/BTP.html>.

- Sandoval, A. (2006) Manual de Tecnologías Limpias en PYMES del Sector Residuos Sólidos. Perú: Concytec.

- Valdivia, T. (2000). Uso de Biogás para la generación de energía eléctrica mediante un motor gasolinero estacionario modificado. México: Universidad Nacional de México.

- Vázquez, B., y Manjarrez, R. (1993, 18 de Noviembre / Diciembre). Contaminación del agua subterránea por la actividad porcícola. *Tecnología del Agua*, 23, 12-13.

ANEXOS

Anexo N°1. Asociación Agropecuaria Los Lúcumos de Pachacamac.



Anexo N°2. Área de estudio



Anexo N°3. Foto de los cerdos usados en la investigación.



Anexo N°4. Foto del estiércol de cerdo



Anexo N°5. Foto del soporte de madera para el biodigestor.



Anexo N°6. Fotos de la construcción del biodigestor





Anexo N°7. Foto de la construcción del sistema de tuberías para el transporte de biogás.





Anexo N°8. Foto de la recolección del estiércol de cerdo



Anexo N°9. Foto de la preparación de la carga inicial.



Anexo N°10. Llenado de la carga inicial.



Anexo N°11. Medición de la T° y PH durante la etapa de estabilización.

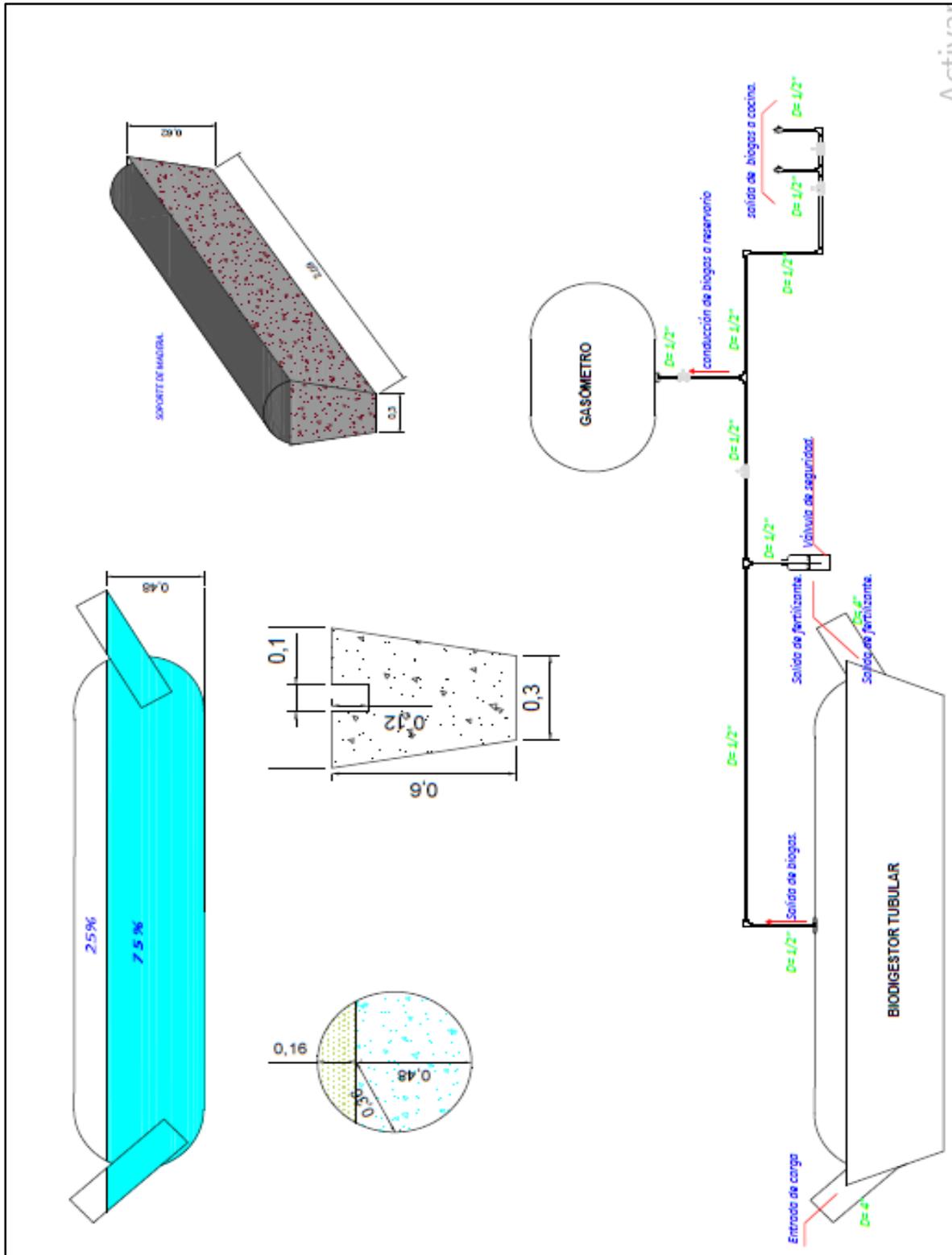


Anexo 12. Producción de biogás y bioabono.





Anexo N°12: Plano en AutoCAD del biodigestor Tubular.



ELABORACION PROPIA.