

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA



FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES

Módulo para la asignatura de Construcciones
Agrícolas

YEISON OLAYA ARBOLEDA, Ing. Agrícola.

LUIS OCTAVIO GONZÁLEZ SALCEDO, Ing. Civil, MSc.
Profesor Asociado

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
Palmira, Julio de 2009.

CONTENIDO

	Página
Presentación.	3
1. Introducción	4
2. Fundamentos sobre la tecnología del biogás.	4
2.1. La digestión anaeróbica.	8
2.1.1. Condiciones del proceso anaeróbico.	11
2.2. Biodigestores.	13
2.3. Productos obtenidos en los biodigestores: el biogás y el bioabono.	16
3. Metodología para el diseño de un biodigestor de campana fija – ejemplo ilustrativo.	17
4. Consideraciones finales sobre el arranque y operación del biodigestor.	27
5. Costos.	28
Bibliografía.	29

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
1	Síntesis de las etapas presentes en la digestión anaeróbica	10
2	Influencia de la temperatura sobre el tiempo de retención.	12
3	Reciclaje de desechos pecuarios y usos del biogás y bioabono.	13
4	Esquema de una planta de campana flotante (tipo hindú).	14
5	Esquema de una planta de cúpula fija.	15
6	Esquema de una planta de balón plástico.	15
7	Secuencia fotográfica de la construcción de un biodigestor de balón plástico por parte de la misma comunidad beneficiada.	16
8	Esquema de dispositivos para el aprovechamiento del biogás.	17
9	Lectura del factor de corrección para el tiempo de retención.	21
10	Variables involucradas en el dimensionamiento del biodigestor.	22
11	Volumen de almacenamiento de gas (área sombreada).	25
12	Tanque de compensación.	26
13	Corte transversal del esquema completo del biodigestor, del ejemplo ilustrativo.	26

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
1	Relaciones C/N de varios productos residuales.	6
2	Comportamiento de la carga de fermentación dentro del biodigestor, de acuerdo con el valor del pH	7
3	Características de los estiércoles.	8
4	Características de otros materiales orgánicos de origen animal, utilizados para carga en biodigestores.	8
5	Residuos vegetales y posible producción de biogás.	9
6	Tiempo de retención.	11
7	Composición química del biogás.	17
8	Valores del porcentaje de sólidos totales y volátiles.	19
9	Biogás producido en función de los sólidos totales.	19
10	Estimación de la posible carga orgánica o biomasa (representada en la producción diaria de estiércol).	20
11	Concentración inhibitoria de inhibidores comunes identificados.	27
12	Edad y proporción en porcentaje que se agrega de material inoculador, en la etapa de arranque de un biodigestor.	27
13	Edad y proporción en porcentaje que se agrega de material inoculador, en la etapa de arranque [Hilbert 2003].	29

PRESENTACIÓN

La explotación pecuaria genera materia orgánica, residuo que potencialmente es utilizado como materia prima en la elaboración de mezclas de carga para la producción de gas, a partir de la digestión anaeróbica de los mismos; el origen biológico de esta materia, denominada como biomasa, ha dado entonces, al uso de términos como biogás y biodigestor. Uno de los subproductos más utilizados es la porquinaza, materia orgánica de los cerdos, cuya proyección en la producción de biogás cada vez es más importante, teniendo en cuenta que la cría y explotación de esta especie, conocida como porcicultura, alcanzo en el último año una producción estimada de 2'118.257 de cabezas sacrificadas y 84.73 toneladas de estiércol como porquinaza¹. El curso de Construcciones Agrícolas, ha incluido en su temática, la utilización de las energías alternativas, en la cual ha sido considerado el aprovechamiento de la biomasa, en especial la proveniente de la explotación pecuaria, cuyas estadísticas muestran una alta potencialidad en su aprovechamiento; este módulo tiene como objetivo orientar el diseño de los biodigestores. La literatura permite mostrar el diseño de biodigestores tipo balón, razón por la cual, como ejemplo, se ha escogido el diseño de otros tipos, en este caso, el del biodigestor de cúpula fija.

El Suscrito, agradece la revisión realizada por el Profesor Titular Luis Arnoby Rodríguez Hurtado, PhD, quien nuevamente ha suministrado sus valiosos aportes académicos e intelectuales, los cuales han sido incorporados en la versión final del documento. De igual manera, al Ingeniero Agrícola Yeison Olaya Arboleda, con quien abordamos inicialmente la temática del diseño de biodigestores, y quien realizó un valioso documento, que permitió darle forma al documento aquí elaborado; considero que oportunamente comparte la coautoría de este proyecto académico. *Fundamentos para el Diseño de Biodigestores*, ha sido elaborado durante el año sabático concedido por la Facultad de Ingeniería y Administración, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, razón por la cual también deseo agradecer a su Consejo Directivo, que me permitió gozar de la respectiva descarga para escribir este material pedagógico. La concentración necesaria para tal fin, es debida también a la concesión del tiempo necesario, que nuevamente mi Esposa e Hijos, me otorgan.

Luis Octavio González Salcedo
Profesor Asociado
Palmira, Julio de 2009

¹ VELASCO Z., C.; (2008). *La experiencia colombiana en la reorganización de productores*. ASOPORCITULTORES – FNP. Conferencia: Querétaro, México, Septiembre 18. Disponible en Internet: <http://www.cmp.org/eventos/enc7Mem/ConsueloV.pdf> [Consultada Febrero 2009]

FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES

1. INTRODUCCIÓN

Una vez el ser humano conoció y aprendió a utilizar el fuego, el uso de éste ha llegado a ser una de las actividades fundamentales para su subsistencia y desarrollo. El fuego puede ser generado por diferentes combustibles, entre ellos la biomasa vegetal [Robles-Gil 2001], y aproximadamente alrededor de tres mil millones de personas en el mundo emplean todavía la leña como fuente de energía para calentar agua y cocinar, provocando junto a otros efectos, que anualmente se pierdan en el mundo entre 16 y 20 millones de hectáreas de bosques tropicales y zonas arboladas [Arguello de Fernández 1984; Robles-Gil 2001]. Esta situación ha permitido el uso de alternativas para llevar a cabo la cocción de alimentos, que tienen bajo impacto ambiental y su fuente de energía es considerada renovable, como la producción de biogás a partir de la fermentación de la materia orgánica [Yank et al., sf; Robles-Gil 2001]. Según la literatura, en la India se construyó la primera instalación para producir biogás, en una fecha cercana a 1900; a partir de ese momento se ha incrementado el número de biodigestores, y actualmente funcionan en ese país alrededor de miles de unidades [Aguilar & Botero 2006]. China es hoy la región que tiene un mayor número de este tipo de instalaciones, con valores cercanos a los 10 millones de unidades [Guevara 1996].

Considerando el beneficio que se puede obtener a partir de la producción de energía por medio de biodigestores, es de importancia aprender el diseño de éstos, en aquellos lugares donde se dispone de la materia prima necesaria para su funcionamiento; razón por la cual en el presente documento, se muestran las pautas necesarias para realizar el diseño de un biodigestor, habiéndose seleccionado en este caso, un biodigestor de cúpula fija. El diseño se ha orientado hacia el aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes de un alojamiento pecuario para cerdos (porqueriza) [Acevedo 2006, Ramón et al. 2006], típico del Valle del Cauca.

2. FUNDAMENTOS SOBRE LA TECNOLOGÍA DEL BIOGÁS

El término biomasa se refiere entonces a cualquier tipo de materia orgánica que tiene su origen en un proceso biológico, siendo ejemplo de esta biomasa la madera, los desechos agrícolas y el estiércol animal; la biomasa puede convertirse en energía a través de dos procesos, el bioquímico, en el cual se ubica la tecnología del biogás, y el termoquímico [Posso 2002]. La biomasa se clasifica de acuerdo con las siguientes categorías [Posso

2002]: natural, que corresponde a la que se produce espontáneamente en la naturaleza, como bosques, matorrales, hierbazales, entre otros; residual, obtenida de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales, como los estiércoles que son usados como materia prima para la producción del biogás; y de plantaciones energéticas, que corresponde a cultivos energéticos, es decir plantaciones que están dedicadas a la producción de un combustible, como la caña de azúcar, el maíz, especies de palma, entre otros [FAO 2008].

Una forma inmediata de aprovechar el recurso biomásico, es a partir de la fermentación anaeróbica, proceso denominado digestión anaeróbica, en el cual se convierte la compleja materia orgánica en metano (CH_4) y otros gases, y cuya producción depende de la cantidad y del tipo de materia adicionada al sistema, así como las condiciones psicométricas del aire en el interior del sistema; se ha podido establecer que usando materia altamente biodegradable se obtiene 0.5 m^3 de gas por Kg de masa, con un 70% de Metano [Guzmán 2008].

Las bacterias fermentan el material orgánico en ausencia de aire (es decir, fermentación anaeróbica) y producen biogás; este material de fermentación está constituido por sustancias sólidas orgánicas, inorgánicas y agua (el cual incrementa la fluidez del material de fermentación, característica importante para el funcionamiento de una planta de biogás), y su componente inorgánico no sufre modificación alguna durante el proceso de fermentación [Guevara 1996]. El biogás que generalmente se produce, es un gas incoloro, inflamable, y contiene 60% de metano y 40% de dióxido de carbono, con aportes menores de Nitrógeno, Hidrógeno, y gas sulfhídrico; su poder calorífico es de 4400 Kcal/m^3 [Guzmán 2008].

El proceso de fermentación se compone de tres fases principales [Guevara 1996; Ramón et al. 2006]: una primera fase, de hidrólisis, donde las bacterias fermentativas o acidogénicas hidrolizan los polímeros y los convierten a través de la fermentación en ácidos orgánicos solubles; una segunda fase, de acidificación, donde las bacterias acetogénicas causan una metabolización de los complicados ácidos orgánicos en acetatos (CH_3COOH), dihidrógenos (H_2) y carbodióxidos (CO_2); y una tercera fase, de metanización, donde las proteínas, hidratos de carbono y grasa, los aminoácidos, alcoholes y ácidos grasos que se formaron en las fases anteriores, se convierten en metano, bióxido de carbono y amoníaco. En la última fase el material de fermentación se vuelve más líquido.

Diversos factores influyen en el funcionamiento del biodigestor, los cuales son descritos a continuación [Guevara 1996; Hilbert 2003]:

- **Temperatura y tiempo de retención:** el rango de temperatura y el periodo de retención dentro del biodigestor, clasifican la fermentación de la siguiente manera [Alcayaga et al. 1999]:

- Fermentación psicrófila, para un rango de temperatura entre 10 y 20°C y más de 100 días de retención.
 - Fermentación mesófila, para un rango de temperatura entre 20 y 35°C y aproximadamente 30 a 40 días de retención.
 - Fermentación termófila, para un rango de temperatura entre 50 y 60°C y más de 8 días de retención. Este tipo de fermentación no es apropiada para plantas sencillas.
- **Relación C/N:** Los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y también contienen nitrógeno (N), entonces se establece la relación entre ellos (C/N), la cual influye sobre la producción de gas [Alcayaga et al. 1999]. Una relación de 20:1 hasta 30:1 es aceptable [Alcayaga et al. 1999], aunque el valor ideal es de 16 [Corace et al. 2006]; mezclas de materiales de fermentación con alto contenido de nitrógeno (como por ejemplo, el estiércol de gallina) con material de fermentación con alto contenido de carbono (como el tamo de arroz) generan una elevada producción de gas [Alcayaga et al. 1999]. La tabla 1, muestra las relaciones C/N para varios productos residuales [Guevara 1996; Corace et al. 2006]:

Tabla 1. Relaciones C/N de varios productos residuales [Guevara 1996; Corace et al. 2006].

Sustancia	Relación C/N
Orina	0.80
Estiércol equino	25
Estiércol vacuno	18
Alfalfa	16-20
Algas marinas	19
Aserrín	511
Basura	25
Cáscaras de papa	25
Paja seca de trigo	87
Paja seca de arroz	67
Tallo del maíz	53
Hojas secas	41
Estiércol de aves	32
Pasto	27
Estiércol ovino	29
Estiércol de cerdos	13
Excretas frescas humanas	2.90

Para conseguir un buen rendimiento de gas en forma constante durante la fermentación, se deben combinar proporciones adecuadas de materiales con bajo y alto rendimientos y diferentes velocidades de generación; la relación C/N de la combinación puede ser calculada como [Guevara 1996]:

$$K = \frac{\sum C_i X_i}{\sum N_i X_i} \quad (1)$$

Donde, K es la relación C/N de la combinación de materias escogidas para la carga, N es el porcentaje de nitrógeno de la materia i, C es el porcentaje de Carbono de la materia i, y X es el peso de la materia i.

- **Niveles de amoniaco:** Este parámetro es importante cuando se utilizan determinados materiales que contienen un alto porcentaje, como es el caso de los estiércoles de aves [Álvarez et al., sf]. Se recomienda que los niveles dentro de los digestores se mantengan por debajo de los 2000 mg/l, para lo cual se aumentan las diluciones de entrada del material [Álvarez et al., sf].
- **pH:** Está en función de la concentración de CO₂ en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima [GTZ-CVC-OEKOTOP 1987]. Las bacterias responsables del mecanismo de producción de biogás son altamente sensibles a cambios en el pH, oscilando entre 6 y 8 (es deseable un valor entre 7 y 7.2) [GTZ-CVC-OEKOTOP 1987]. El pH del lodo de fermentación indica si el proceso de fermentación transcurre sin problemas, y su medición indica el comportamiento de la carga de fermentación dentro del digestor, para la producción de biogás, como es mostrado en la tabla 2 [GTZ-CVC-OEKOTOP 1987].

Tabla 2. Comportamiento de la carga de fermentación dentro del biodigestor, de acuerdo con el valor del pH [GTZ-CVC-OEKOTOP 1987].

pH	Comportamiento
7 – 7.2	Óptimo
6.2	Retarda la acidificación
7.6	Retarda la amonización

- **Contenido de agua de la mezcla:** Las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente cuando el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, y la cantidad de biogás producido será pequeña [Álvarez et al., sf]. Cuando la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada [Álvarez et al., sf]. El uso primordialmente de excreta humana y orines, estiércol, y desechos de agricultura, como alimento para el digestor, deberá conllevar a una razón de biomasa a agua entre 1:1 y 1:2; y por cada 100 Kg de heces y orina, se requerirán entre 100 y 200 litros de agua [Álvarez et al., sf]. Cuando el material de alimento consta principalmente de residuos vegetales, se requiere más agua, en una razón de 1:3 o 1:4 [Álvarez et al., sf]. La actividad de mezclar, debe realizarse en forma adecuada y uniforme en el tanque del digestor para promover una digestión efectiva, especialmente si se utiliza biomasa cruda con alto contenido leñoso [Álvarez et al., sf].

- **Materiales orgánicos:** Las actividades pecuarias y agrícolas, producen materiales orgánicos que pueden ser tratados mediante el proceso anaeróbico [Acevedo 2006], como se muestra en la tabla 3 [Botero & Preston 1986; Vargas 1992; Ramón et al. 2006]. Otros materiales orgánicos de origen animal también pueden emplearse como sustrato para la obtención de biogás y bioabono [Álvarez et al., sf; Torres & Follari, sf], cuyas características se muestran en la tabla 4 [Vargas 1992]. Los residuos vegetales [Álvarez et al., sf], Tabla 5, como paja, pasto y desechos de verdura, pueden fermentarse anaeróbicamente debiendo previamente triturarse para evitar la formación de capa flotante y dar un tratamiento especial en plantas donde se hace una sola carga hasta que el material se descompona [Vargas 1992; Ramón et al. 2006].

Tabla 3. Características de los estiércoles [Botero & Preston 1986; Vargas 1992].

Datos básicos	Ganado	
	Porcino	Vacuno
Cantidad de estiércol fresco/24 horas en porcentaje de peso vivo (PV)	3%	6%
Porcentaje de sólidos volátiles (SV) en estiércol fresco	20%	16%
Cantidad de estiércol por 500 Kg de PV	15 Kg	30 Kg
Cantidad de sólidos volátiles por 500 Kg de PV	3 Kg	4.8 Kg
Producción de Biogás por 100 Kg de PV	0.25 m ³	0.21 m ³
Producción de Biogás por Kg de SV	0.42 m ³	0.22 m ³

Tabla 4. Características de otros materiales orgánicos de origen animal, utilizados para carga en biodigestores [Álvarez et al., sf; Torres & Follari, sf; Vargas 1992].

Origen	Cantidad diaria		% material de fermentación		Litros de biogás por un kg de sólidos orgánicos
	Estiércol en % del peso vivo	Orina en % del peso vivo	% Sólidos totales	% Sólidos orgánicos	
Caprinos y ovinos	3	1.5	30	20	200
Equinos	5	4.0	25	15	250
Avícola	4.5	4.5	25	17	400

2.1. LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

El tratamiento anaerobio es un proceso microbiológico en ausencia de oxígeno, en el que la materia orgánica se transforma por acción de microorganismos en biogás y bioabono [Yank et al., sf]; en él se implica la realización de una serie de reacciones bioquímicas donde participan microorganismos, de los cuales una parte son oxidados completamente por el carbono formando anhídrido carbónico, mientras otra es reducida en alto grado para formar

metano [Guevara 1996]. El proceso anaeróbico ocurre en cuatro etapas [Vargas 1992; Guevara 1996; Hilbert 2003], hidrólisis, acidogénesis, acetanogénesis, y metanogénesis, las cuales son descritas a continuación [Ramón et al. 2006]:

Tabla 5. Residuos vegetales y posible producción de biogás [Álvarez et al., sf].

Material fresco	% sólidos totales	% sólidos orgánicos	Litros de biogás por un kg de sólidos orgánicos
Paja de arroz	89	93	220
Paja de trigo	82	94	250
Paja de maíz	80	91	410
Hierba fresca	24	89	410
Jacinto de agua	7	75	325
Bagazo	65	78	160
Desecho de verdura	12	86	350

- **Hidrólisis:** En esta etapa, los substratos complejos (celulosa, proteína, lípidos) son hidrolizados en compuestos solubles (azúcares, aminoácidos y grasas) por la acción de enzimas extracelulares de las bacterias.
- **Acidogénesis:** En esta etapa, los compuestos solubles son fermentados a ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico), alcoholes hidrogeno y CO₂. Esta etapa se conoce también como fermentativa. Es decir, es un periodo de producción intensiva de ácidos, que se inicia con los alimentos y compuestos de más fácil descomposición, como las grasas, donde hay una alta producción de dióxido de carbono (CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S), ácidos orgánicos y bicarbonatos; su pH se encuentra en la zona ácida, con valores entre 5.1 y 6.8 [Guevara 1996].
- **Acetanogénesis:** Esta etapa ocurre cuando las bacterias acetogénicas oxidan el ácido propiónico y el butírico hasta acético e hidrógeno, que son los verdaderos substratos metanogénicos. Es decir, es un periodo donde se producen ataques a los ácidos orgánicos y compuestos nitrosos, en pequeñas cantidades hay producción de dióxido de carbono (CO₂), nitrógeno e hidrógeno, bicarbonatos y de compuestos amoniacales; se caracteriza por presentar mal olor debido a la presencia de ácido sulfhídrico (H₂S), flotación de gran parte de sus sólidos, y un pH aún en la zona ácida con valores entre 6.6 y 6.8 [Guevara 1996].
- **Metanogénesis:** En esta etapa, los últimos compuestos son tomados dentro de las células bacteriales metanogénicas convirtiéndolos en metano y excretándolo fuera de la célula. Este es un periodo de digestión intensiva, de carácter de fermentación alcalina, en el cual hay una digestión de las materias resistentes, de las proteínas, de los aminoácidos, y de la celulosa; se caracteriza por la producción de sales de ácidos orgánicos y volúmenes de gas, en una mezcla donde hay un alto porcentaje de metano, y el resto corresponde a dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno [Guevara

1996]. Como características del material digerido, están el olor a alquitrán, hay pequeñas cantidades de sólidos flotantes, y el pH se ubica en la zona alcalina, con valores entre 6.9 y 7.4 [Guevara 1996].

Las bacterias metanogénicas sólo pueden usar un número limitado de de sustratos para la formación de metano, éstos son CO_2 , H_2 , acetato, metanol, metilamina, y monóxido de carbono; las reacciones de conversión más usuales en la producción de energía que involucran estos compuestos son [Márquez 2005]:



La figura 1, resume las distintas características de cada una de las diferentes etapas mencionadas, en la cual se han agrupado en dos grandes procesos, y se muestran los principales compuestos químicos que en ellos intervienen [Hilbert 2003].

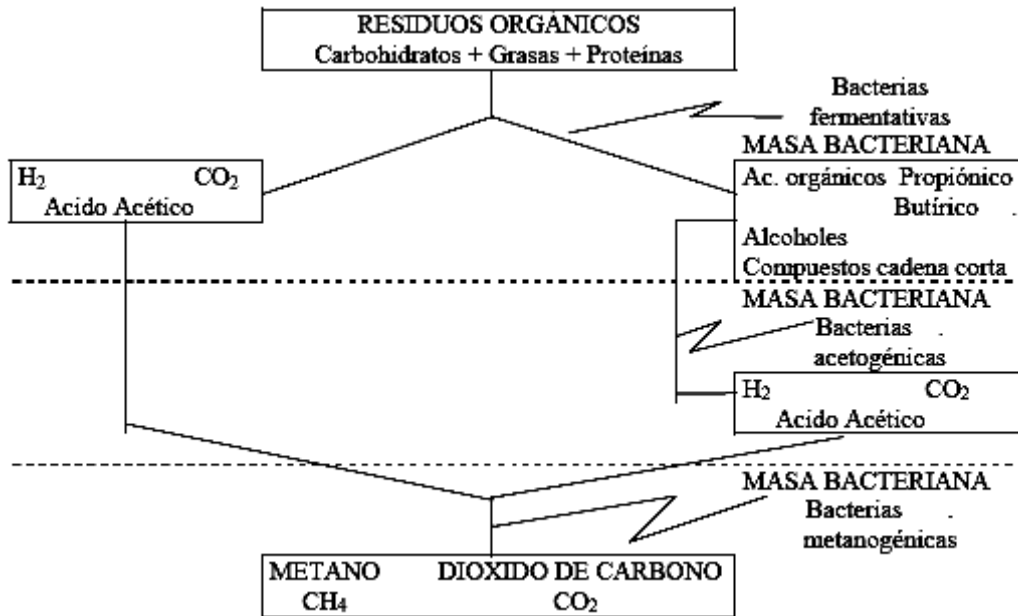


Figura 1. Síntesis de las etapas presentes en la digestión anaeróbica [Hilbert 2003].

2.1.1. CONDICIONES DEL PROCESO ANAEROBIO

En párrafos anteriores fueron descritos los factores influyentes en el funcionamiento de un biodigestor. En el proceso de tratamiento anaerobio de la materia orgánica, se requiere de las siguientes condiciones [Yank et al., sf; Vargas 1999; Guevara 1996; Ramón et al. 2006]:

- **pH:** Este parámetro determina la inhibición o toxicidad de las bacterias metanogénicas, ocurriendo esta patología cuando es inferior a 6.0 [Vargas 2006]. Un adecuado funcionamiento se presentará con un pH en el biodigestor entre 6.5 y 7.5 [Vargas 2006].
- **Temperatura:** Se habían definido tres ambientes anaeróbicos, en función de la temperatura. Un adecuado funcionamiento del biodigestor para cada ambiente, recomienda los siguientes rangos de temperatura: 0 – 20 °C, para el ambiente psicofílico; 20 – 45 °C, para el ambiente mesofílico; y 45 – 97 °C, para el ambiente termofílico [Alcayaga et al. 1999]. Las bacterias que crecen en cada uno de estos ambientes son organismos diferentes [Vargas 2006]. Torres & Follari s.f., y Guevara 1996, sugieren controlar la temperatura, para aumentar la eficiencia, usando serpentines de agua caliente dentro del digestor, con el objetivo de aumentar la temperatura del efluente.
- **Tiempo de retención:** El tiempo de retención es definido como el periodo de tiempo que permanece la materia orgánica dentro del sistema para alcanzar la degradación. El tiempo de retención está directamente relacionado con la temperatura ambiente y en condiciones optimas del proceso, con una temperatura de 30 °C, el tiempo de retención (Tr) debería ser de 20 días; sin embargo, algunos autores han sugerido para cada ambiente los respectivos tiempos de retención, que comúnmente se presentan en biodigestores, como se muestra en la tabla 6 [Olaya 2006], debido a la variación de la temperatura, la cual es difícil de controlar. Esta variación de temperatura afecta el tiempo de retención, el cual varía de acuerdo con el factor de corrección que puede ser determinado con la figura 2 [Vargas 1992].

Tabla 6. Tiempo de retención [Olaya 2006]

Ambiente	Tiempo de retención [días]
Psicofílico	> 40
Mesofílico	10 – 40
Termofílico	< 10

- **Relación C/N:** La relación C/N influye sobre la producción de biogás, siendo la relación adecuada entre 20:1 y 30:1 [Alcayaga et al. 1999].
- **Amoniaco:** Para un correcto funcionamiento del biodigestor, los niveles dentro del sistema deben mantenerse por debajo de los 2000 mg/l [Álvarez et al., sf].

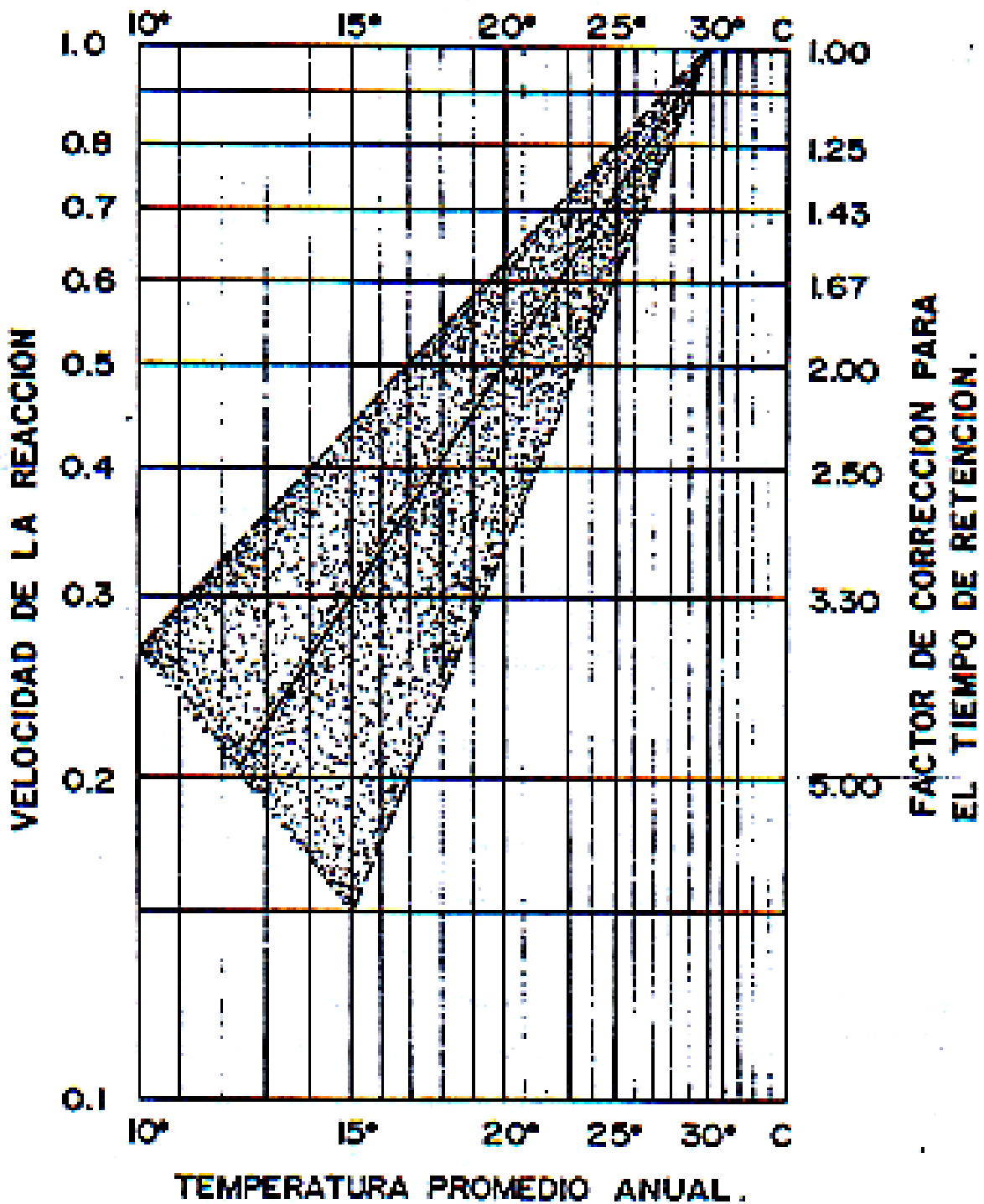


Figura 2. Influencia de la temperatura sobre el tiempo de retención [Vargas 1999].

2.2. BIODIGESTORES

Los biodigestores conocidos también como plantas (productoras o de producción) de biogás, son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo para lograr su descomposición produciendo biogás y bioabono [Yank et al., sf; Pedraza et al. 2002; Ramón et al. 2006], como es mostrado esquemáticamente en la figura 3 [Olaya 2006].

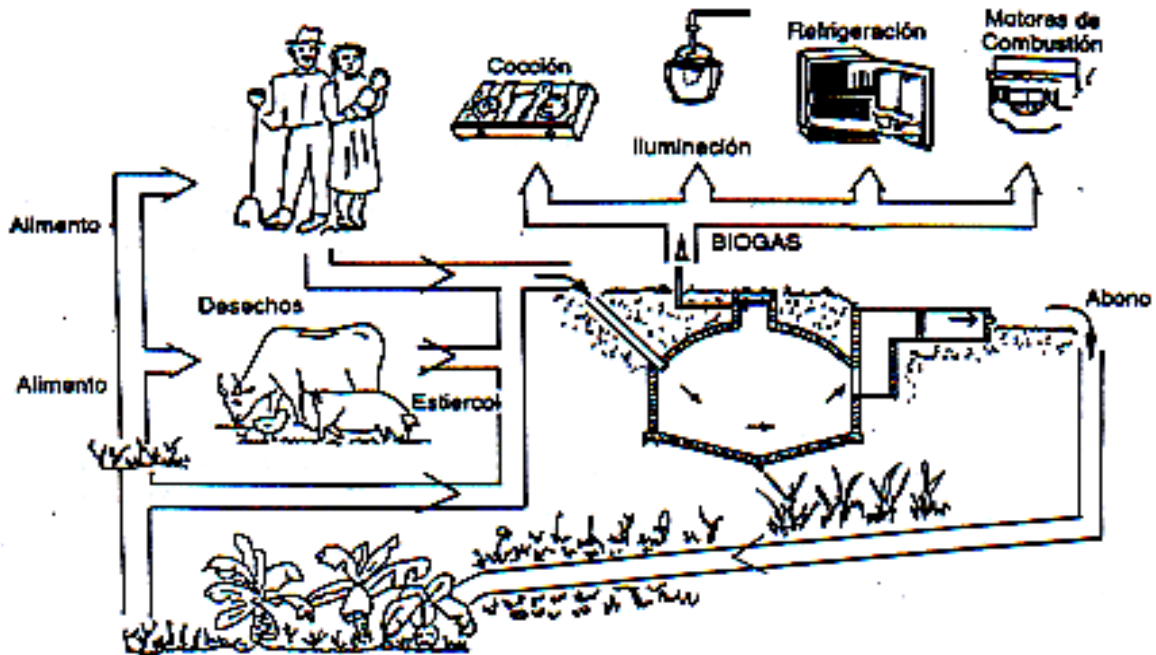


Figura 3. Reciclaje de desechos pecuarios y usos del biogás y bioabono [Olaya 2006].

Los biodigestores o plantas de biogás sencillos se clasifican en tres tipos principales, descritos a continuación [Hilbert 2003; Ramón et al. 2006]:

- **La planta con cúpula o campana flotante:** La planta de campana flotante, mostrada esquemáticamente en la figura 4 [Robles-Gil 2001; Olaya 2006], se compone de un digestor construido en mampostería o estructura de concreto y un depósito de gas móvil en forma de campana, la cual puede flotar directamente en la masa de fermentación o en un anillo de agua, dependiendo de la producción de biogás. La campana debe tener una guía que permita el movimiento vertical, cuya altura dependerá del volumen de gas almacenado [Vargas 1992]. Es conocido también como biodigestor Indio, y puede ser utilizado cuando se necesita de un abastecimiento continuo de biogás y fertilizante, caracterizándose por funcionar como depósito del gas producido, es decir, es el único tipo de biodigestores que tienen un depósito de biogás interior [Olaya 2006].

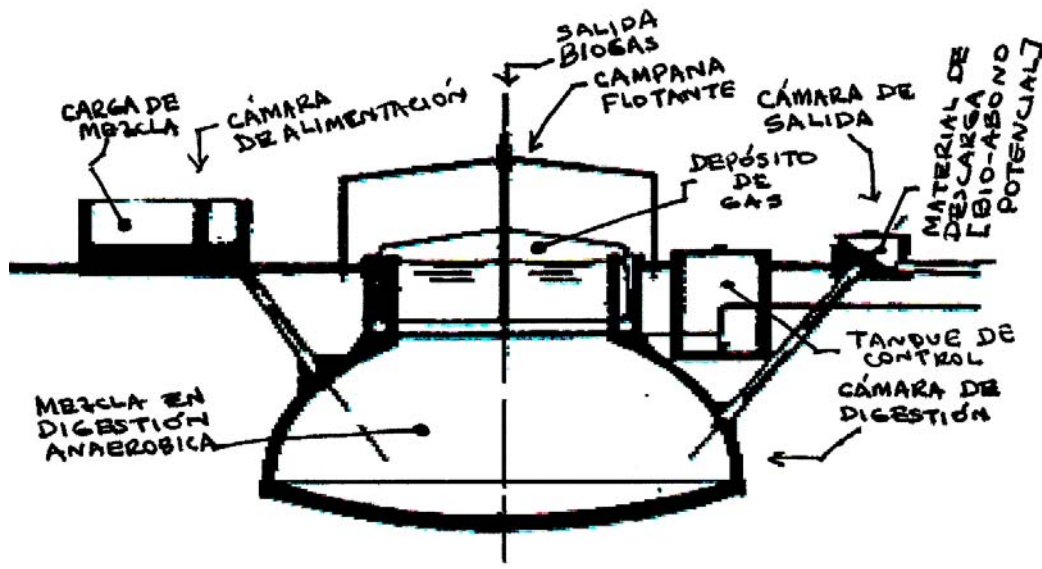


Figura 4. Esquema de una planta de campana flotante (tipo hindú) [Robles-Gil 2001; Olaya 2006].

Sus ventajas son [Hilbert 2003]: la mampostería tiene una larga vida útil, en caso de usar estructuras de concreto, deberá protegerse este material a la corrosión producida por la materia orgánicas y el gas; la presión de gas es constante; y es de fácil manejo. Entre las desventajas están el alto costo en la construcción de la campana; en la mayoría de los casos, la campana es metálica y estará sujeta a corrosión, cuya protección a esta acción incrementa el costo y requiere un mantenimiento periódico de la campana, incrementando los costos de operación [Hilbert 2003].

- **La planta con cúpula o campana fija:** Mostrada esquemáticamente en la figura 5 [Robles-Gil 2001; Olaya 2006], se compone de un digestor construido en mampostería y un domo fijo e inmóvil cerrado donde se almacena el biogás. Durante la producción de biogás, la masa de fermentación es desplazada hacia el tanque de compensación y cuando se extrae el gas, la masa líquida vuelve hacia el biodigestor. A través de constantes oscilaciones de la masa de fermentación en la parte superior de la cúpula se evita la formación de capa flotante [Vargas 1992]. Es conocido también como biodigestor Chino, y debido a que el gas debe ser liberado continuamente para reducir la presión interna, se utilizan en instalaciones donde el consumo sea continuo o para almacenar el biogás en un depósito aparte [Olaya 2006].

Entre sus ventajas se tiene una larga vida útil de aproximadamente 20 años; no posee partes móviles y/o metálicas que se puedan oxidar, aunque la construcción en concreto deberá ser durable; y su construcción es subterránea, que lo protege contra bajas temperaturas [Hilbert 2003]. Entre sus desventajas se encuentran que la presión de gas no es constante; la presión puede ser muy alta, por ello la cúpula

tiene que ser cuidadosamente sellada e impermeabilizada para evitar porosidades, grietas y escapes de gas; y presenta costos de construcción más bajos que el anterior biodigestor [Hilbert 2003].

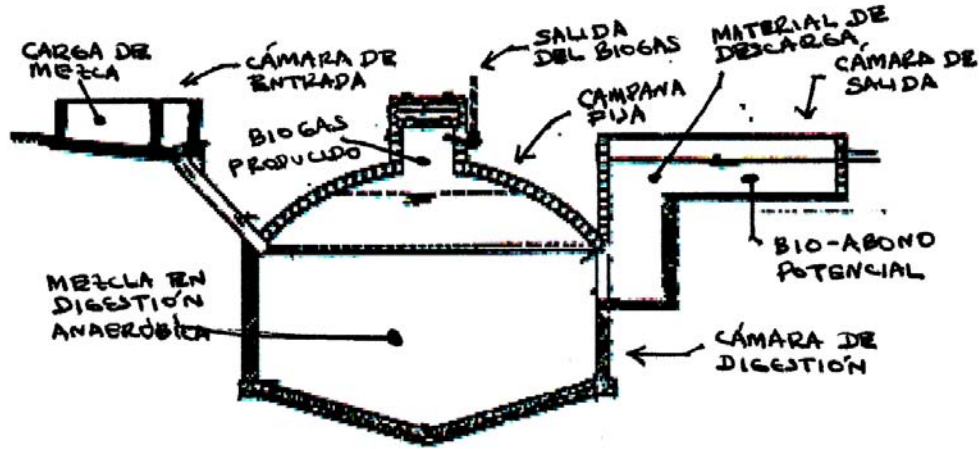


Figura 5: Esquema de una planta de cúpula fija [Robles-Gil 2001; Olaya 2006].

- **La planta balón o biodigestor tubular:** La planta de balón se compone de un tubular en material plástico (polietileno, PVC, plastilona, entres otros, y una combinación de éstos) completamente sellado, la entrada y la salida están sujetas directamente a las paredes de la planta [Botero & Preston 1986; Pedraza et al. 2002]. La figura 6 [Soria et al. 2001; Aguilar & Botero 2006; Olaya 2006], muestra un esquema de esta tipología. La parte inferior de la planta, en un 75% del volumen constituye la masa de fermentación, y en la parte superior, el 25% restante, se almacena el biogás. Este tipo de planta se recomienda para aquellos sitios donde predominan las temperaturas altas y constantes [Vargas 1992; Pedraza et al. 2002].

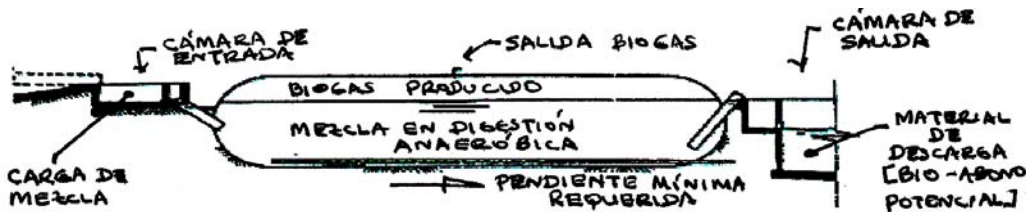


Figura 6. Esquema de una planta de balón plástico [Soria et al. 2001; Aguilar & Botero 2006; Olaya 2006].

Entre sus ventajas, están [Botero & Preston 1986; Pedraza et al. 2002; Aguilar & Botero 2006]: sus materiales de construcción son de fácil transporte; su instalación y adecuación del sitio son sencillas; es apropiado en sitios con nivel freático alto, por su construcción horizontal; y entre los tipos de biodigestores, es el menor costo de construcción y operación; como se muestra en la figura 7, pueden ser instalados por la comunidad beneficiada, sin que ésta tenga conocimientos sobre construcción. Son desventajas, la baja presión de gas; una vida útil corta, entre 3 y 8 años,

dependiendo del material que se seleccione; debe protegerse contra los rayos solares; y el material plástico está sujeto a daños, siendo necesario en lo posible encerrarse el área adyacente al biodigestor [Botero & Preston 1986; Pedraza et al. 2002; Aguilar & Botero 2006].



Figura 7. Secuencia fotográfica de la construcción de un biodigestor de balón plástico por parte de la misma comunidad beneficiada [Beckman et al. 2007].

2.3. PRODUCTOS OBTENIDOS EN LOS BIODIGESTORES: EL BIOGÁS Y EL BIOABONO

El biogás se puede definir como una mezcla de gases combustibles y su composición depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción, como se presenta en la tabla 7 [Botero & Preston 1986]. El biogás como cualquier otro combustible gaseoso, puede ser usado para fines domésticos e industriales [Lutz, sf]. Diversos dispositivos son utilizados para aprovechar el biogás [Lutz, sf] como estufas, lámparas, calentadores radiantes y como combustible para motores diesel o a gasolina, como se muestra esquemáticamente en la figura 8 [Vargas 1992; BUN-CA 2002].

El efluente tratado que sale de las plantas es un gran fertilizante orgánico, puesto que la mayoría de sus nutrientes principales como nitrógeno, fósforo y potasio se conservan, y es conocido como bioabono [Gómez & Viniegra 1979; Guevara 1996; Ramón et al. 2006]; su composición por lo general incluye un 8.5% de materia orgánica, 2.6% de fósforo, y 1% de

potasio, con un pH de 7.5 [Soria et al. 2001]. El uso adecuado de los nutrientes reciclados proporciona mejoramiento en la calidad del suelo y en las siembras representando un beneficio para el agricultor [McGarry & Stainforth 1978; Guevara 1996]; se ha comprobado que un metro cúbico de bioabono producido y aplicado diariamente, puede fertilizar más de dos hectáreas de suelo [Soria et al. 2001]. El bioabono o efluente líquido puede ser aplicado en forma normal mediante la utilización de recipientes, por gravedad o por bombeo [Vargas 1992; Guevara 1996].

Tabla 7. Composición química del biogás [Botero & Preston 1986].

Componente		Composición aproximada [%]
Metano	CH ₄	60 - 70
Gas Carbónico	CO ₂	30 - 40
Hidrógeno	H ₂	1.0
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Ácido sulfúrico	H ₂ S	0.1

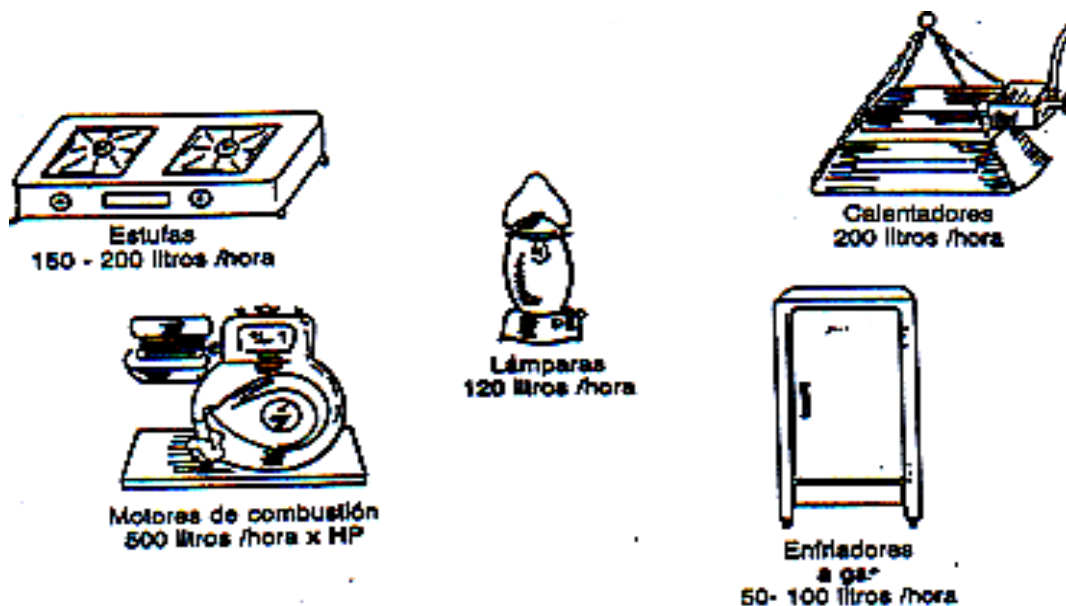


Figura 8. Esquemas de dispositivos para el aprovechamiento del biogás [Vargas 1996; BUN-CA 2002].

3. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DE CAMPANA FIJA – EJEMPLO ILUSTRATIVO

En la literatura se encuentran diversas metodologías para la realización de diseños de biodigestores [Álvarez et al. sf; Botero & Preston 1986; Ramón et al. 2006]. En este caso, el procedimiento metodológico empleado para realizar el diseño de un biodigestor de campana fija (selección del sitio de construcción, cantidad de gas a producir, y

determinación de las dimensiones de la planta) es sugerido a partir de las siguientes etapas [Sogari et al. 2000; Olaya 2006]:

- Consecución del alojamiento pecuario, la porqueriza (en nuestro lenguaje común, marranera), con base en la cual se diseñará el biodigestor. Las siguientes especificaciones deben determinarse [Sogari et al. 2000; Acevedo 2006; Olaya 2006]:
 - Área interna.
 - Número de cerdos y su clasificación (lechones, cebo, marranas y machos o berracos).
 - Ubicación.
 - Condiciones climáticas [Robles-Gil 2001], entre ellas la temperatura promedio.
- El diseño propio del Biodigestor, requiere de los siguientes pasos [Sogari et al. 2000; Olaya 2006]:
 - Posible carga orgánica (biomasa).
 - Cantidad de mezcla de agua (Ma).
 - Determinación del tiempo de retención (Tr).
 - Determinación de las dimensiones del biodigestor.
 - Dimensionamiento del tanque de compensación (Vc) y almacenamiento del gas (Vg).

Para la realización de un ejemplo ilustrativo, se seleccionó hipotéticamente uno de los alojamientos pecuarios disponibles en la Granja de Zootecnia, de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Sus características de acuerdo con las especificaciones mencionadas en párrafo anterior, son [Olaya 2006]:

- **Área Interna:** 166.24 m²
- **Número de cerdos:** 146 cerdos, clasificados como cebo (88 cabezas), marranas de cría (28 cabezas), y berracos (40 cabezas). Las crías o lechones, aunque están presentes en el alojamiento, no son tenidos en cuenta.
- **Ubicación:** Granja de Zootecnia de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, en la zona plana del Municipio de Palmira.
- **Temperatura promedio:** 25 °C.

Para la realización del diseño, se procede entonces con los siguientes cálculos [Olaya 2006]: Para calcular la producción de biogás es necesario conocer el porcentaje de sólidos totales (%ST) y el porcentaje de sólidos volátiles del desecho (%SV); donde, los sólidos totales se definen como el peso seco de la materia prima, o porción que permanece cuando el material es secado a una temperatura de 105 °C, mientras que los sólidos volátiles se definen como la porción de los sólidos totales que son volatilizados a 550 °C [Olaya 2006].

Estas definiciones sugieren entonces el cálculo del volumen a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Volumen de gas } m^3 \text{ CH}_4}{\text{Kg de desecho}} = \frac{\%ST}{100} \times \frac{\%SV}{100} \times \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{Kg}} \times \%CH_4 \quad (7)$$

Siendo necesario conocer el porcentaje de sólidos totales y volátiles, así como el volumen de gas en m³ por Kg, en cada tipo de desecho, y el porcentaje de metano (%CH₄) en el biogás. Algunas fuentes bibliográficas pueden suministrar estos valores, que a continuación son mostrados en las tablas 8 y 9 [Olaya 2006].

Tabla 8. Valores del porcentajes de sólidos totales y sólidos volátiles [Olaya 2006].

Material (residuos secos)	% Humedad (H)	% Sólidos totales (%ST)	% Nitrógeno (N)	% Carbono (C)	% Sólidos volátiles (%SV)	C/N
Gallinaza	65.0	35.0	6.3	94.5	65.0	15.0
Bovinaza	86.0	14.0	1.7	30.8	80.0	18.0
Porquinaza	87.0	13.0	3.8	76.0	85.0	20.0
Basura de mercado	1.0	99.0	3.0	54.7	77.0	18.0
Papel periódico	7.0	93.0	0.1	5.0	97.1	813.0
Desechos agrícolas	7.2	37.0	1.2	90.0	63.0	75.0
Humanaza	73.0	27.0	6.0	50.0	92.0	8.0
Orina	94.0	6.0	18.0	14.0	75.0	0.8

Tabla 9. Biogás producido en función de los sólidos volátiles [Olaya 2006].

Material	Proporción (%)	M ³ de biogás / Kg de materia	CH ₄ (%)
Gallinaza	100	0.3111	59.8
Bovinaza	100	0.0871	65.2
Porquinaza	100	0.3234	65.0
Basura de cocina	100	0.2110	61.9
Residuos de papel	100	0.2178	67.1
Desechos agrícolas	100	0.2999	60.0

La mezcla para alimentar un biodigestor debe tener entre el 7 y 9% de sólidos, aunque generalmente se trabaja con el promedio, es decir el 8%; para el cálculo en la obtención de una mezcla con un 8% de sólidos es necesario conocer el volumen, la densidad y el contenido de humedad de la materia prima, de tal forma que el peso de la materia prima a utilizar será [Olaya 2006]:

$$Wr = Vr \times Dr \quad (8)$$

Donde, Wr es el peso de la materia prima, Vr es el volumen de la materia prima, y Dr es la densidad de la materia prima, estimada pesando un volumen conocido de la materia prima y dividiéndola por el peso de este volumen. Entonces, el volumen de la mezcla con el 8% de sólidos V_{8%}, puede ser calculado como [Olaya 2006]:

$$V_{8\%} = 0.192Wr(1 - H) \quad (9)$$

Donde, H es el contenido de humedad (en fracción). Olaya 2006 ha sugerido un método teórico para la estimación de la biomasa diaria, con la cual se realizaría el dimensionamiento del biodigestor, que es explicado a continuación.

- **Estimación de la posible carga orgánica o biomasa:** Está representada en la producción diaria de estiércol, y es presentada en la tabla 10.

Tabla 10: Estimación de la posible carga orgánica o biomasa [M_B] (representada en la producción diaria de estiércol) [Olaya 2006].

Semoviente	Cantidad Q	Edad	Peso vivo promedio, [Kg] PV	PV total para cada clasificación Q x PV	Estimado (aproximadamente el 2% PV) [Kg/día] $M_B = 0.02 \times Q \times PV$
Cerdos de ceba	88	95 – 115 días	70	6160	123.2
Marranas de cría	28	2 años	120	3360	67.2
Berracos	40	35 – 95 días	50	200	4.0
Total estiércol diario, M_e [kg/día]					194.4 Aprox. 194.0

- **Estimación de la cantidad de mezcla de agua (M_a):** La cantidad de mezcla de agua es calculada a partir del sólido total (st). El total de estiércol es estimado como un 16% del total de estiércol diario (ecuación 10), y la mezcla de agua se estima con un 8% del sólido total. El sólido total está definido como la suma del total del estiércol diario y la cantidad de mezcla de agua. Estos cálculos son mostrados a continuación:

$$Total\ estiércol = 0.16(Total\ estiércol\ diario) \quad (10)$$

$$Total\ estiércol = 0.16 \times 194.4 = 31.10 [Kg] \quad (11)$$

$$\frac{Total\ estiércol}{(Total\ estiércol\ diario + M_a)} = \frac{8}{100} \quad (12)$$

$$\frac{31.104}{(194 + M_a)} = 0.08 \quad (13)$$

$$M_a = 194.8 \approx 195.0 [Kg / día] \quad (14)$$

- **Estimación de la biomasa diaria:** La biomasa diaria es calculada como el total de estiércol diario y mezcla de agua:

$$\text{Biomasa diaria} = \text{Total estiércol diario} + \text{Cantidad de mezcla de agua} \quad (15)$$

$$\text{Biomasa diaria} = 194.0 + 195.0 = 389.0 [\text{Kg} / \text{día}] = 0.39 [\text{m}^3 / \text{día}] \quad (16)$$

- Dimensionamiento inicial del biodigestor, a partir del volumen de diseño para almacenamiento de la biomasa durante el tiempo de retención:** Es necesario definir un tiempo de retención (T_r) para la estimación del volumen de diseño (V_d). El tiempo de retorno es calculado a partir del tiempo de retención ideal afectado por un factor de corrección (ecuación 19), acorde a la temperatura promedio del sitio de ubicación del alojamiento pecuario, el cual es proporcionado en la figura 2, y cuya lectura es mostrada en la figura 9. Se toma como tiempo ideal de retorno 20 días. Entonces el volumen necesario corresponde al volumen capaz de almacenar la biomasa diaria concentrada durante el tiempo de retención (ecuación 21):

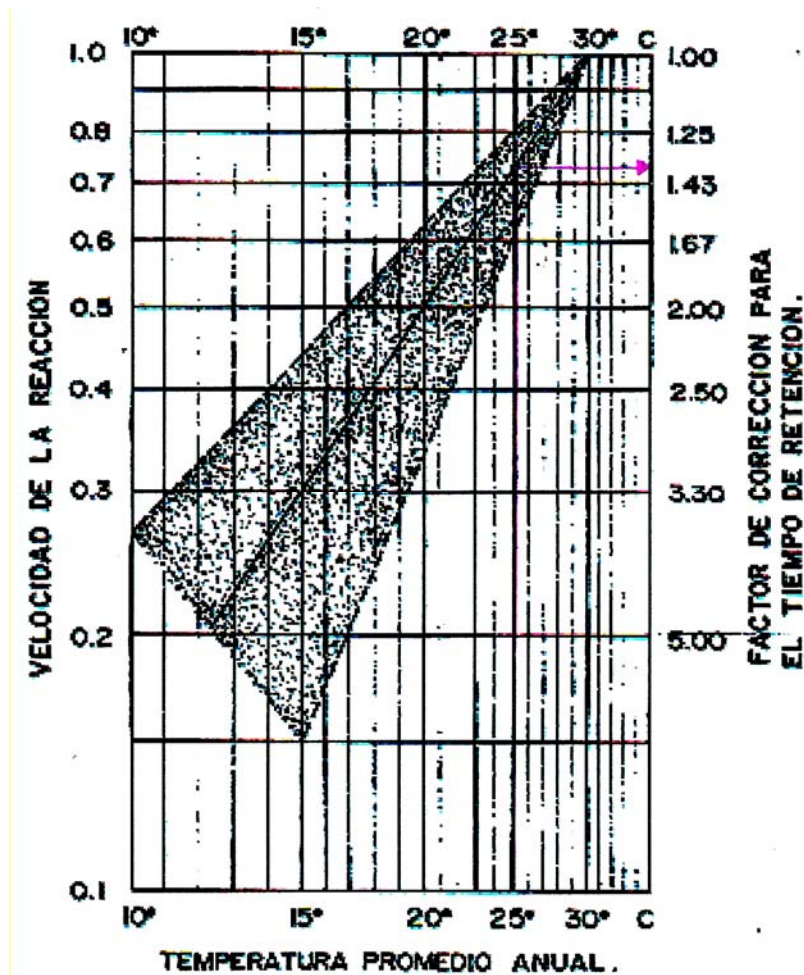


Figura 9. Lectura del factor de corrección para el tiempo de retención.

$$\text{Tiempo de retención ideal} = 20 \text{ días} \quad (17)$$

$$\text{Factor de corrección} = 1.40 [\text{figura 9}] \quad (18)$$

$$\text{Tr} = 20 \times \text{Factor de corrección} \quad (19)$$

$$\text{Tr} = 20 \times 1.40 = 28 \text{ días} \quad (20)$$

$$\text{Volumen necesario} = \text{Biomasa diaria} \times \text{Tr} \quad (21)$$

$$\text{Volumen necesario} = 0.39 \times 28 = 10.92 \text{ m}^3 \quad (22)$$

$$\text{Volumen de diseño} = \text{Vd} = 11.0 \text{ m}^3 \quad (23)$$

- **Dimensionamiento del biodigestor:** El dimensionamiento del biodigestor comprende el cálculo del volumen de compensación (V_c), el volumen de la cúpula o campana (V_e) y el volumen de almacenamiento de gas (V_g). En la figura 10 [Olaya 2006], se muestran las variables que serán estimadas en los presentes cálculos:

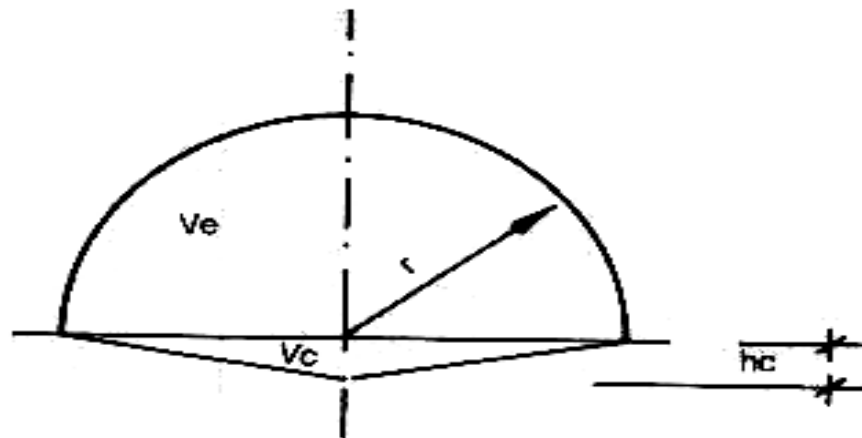


Figura 10. Variables involucradas en el dimensionamiento del biodigestor [Olaya 2006].

En la figura 10, r corresponde al radio de la cúpula, y h_c corresponde a la altura del volumen complementario. Se ha establecido una relación del volumen de la campana al volumen complementario de 10 a 1, así como un volumen total del biodigestor de un 4% adicional del volumen de diseño, al considerarse por razones de construcción (al construirse con mampostería o ladrillos) el espesor del repello que lo cubriría internamente (también se recomendaría repellar o aislar la cara externa de las paredes del biodigestor, del contacto con el suelo, para evitar

corrosión, humedades y deterioro de la estructura). Lo anteriormente descrito, puede formularse como:

$$\frac{V_e}{V_c} = \frac{10}{1} \quad (24)$$

$$V_e + V_c = 1.04V_d \quad (25)$$

De las ecuaciones (24) y (25), se tiene que:

$$V_c + 10V_c = 11V_c = 1.04V_d \quad (26)$$

$$11V_c = 1.04 \times 11 = 11.44 m^3 \quad (27)$$

$$V_c = 11.44 m^3 / 11 = 1.04 m^3 \quad (28)$$

$$V_e = 11.44 - 1.04 = 10.4 m^3 \quad (29)$$

El valor de r puede calcularse con la ecuación (30), mientras el valor de hc puede ser calculado de dos maneras, usando las ecuaciones (32) y (34) [la ecuación (34) es deducida del volumen del cono $V_c = \frac{1}{3} \pi r^2 hc$]. Para el caso de hc, se puede observar la proximidad de los valores.

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \times V_e} \quad (30)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3}{2\pi} \times 10.4} = 1.70 m \quad (31)$$

$$hc = \frac{r}{5} \quad (32)$$

$$hc = \frac{1.70}{5} = 0.34 m \quad (33)$$

$$hc = \frac{3V_c}{\pi r^2} \quad (34)$$

$$hc = \frac{3 \times 1.04}{\pi \times 1.70^2} = 0.344 \text{ m} \quad (35)$$

Una vez definidos los valores de r y hc , en este caso $r = 1.70 \text{ m}$, y $hc = 0.35 \text{ m}$, se procede al chequeo del volumen de diseño, obtenido en la ecuación (25) [obsérvese la equivalencia con la ecuación (40)]. Se puede notar unos valores muy cercanos en los resultados del chequeo.

$$Ve = \frac{2}{3} \pi r^3 \quad (36)$$

$$Ve = \frac{2}{3} \pi \times 1.70^3 = 10.29 \text{ m}^3 \quad (37)$$

$$Vc = \frac{1}{3} \pi hc r^2 \quad (38)$$

$$Vc = \frac{1}{3} \pi \times 0.35 \times 1.70^2 = 1.06 \text{ m}^3 \quad (39)$$

$$1.04Vd = 10.29 + 1.06 = 11.35 \text{ m}^3 \quad (40)$$

$$Vd = 10.91 \text{ m}^3 \quad (41)$$

Se procede al cálculo del volumen de gas (Vg). Se plantea entonces la siguiente ecuación, de acuerdo con la figura 11 (el valor de Vg está en m^3 , los valores de h , a y b están en metros) [Vargas 1992]:

$$Vg = \frac{\pi h}{6} [3a^2 + 3b^2 + h^2] \quad (42)$$

Donde,

$$h = \frac{2r}{5} - \text{borde libre} \quad (43)$$

$$\text{borde libre} = 0.25 \text{ m} \quad (44)$$

$$a = \frac{4r}{5} \quad (45)$$

$$b = \frac{r}{2} \quad (46)$$

Reemplazándose los valores se obtiene entonces, esquematizado en la figura 11 [Olaya 2006]:

$$h = \frac{2 \times 1.70}{5} - 0.25 = 0.43 \text{ m} \quad (47)$$

$$a = \frac{4 \times 1.70}{5} = 1.36 \text{ m} \quad (48)$$

$$b = \frac{1.70}{2} = 0.85 \text{ m} \quad (49)$$

$$V_g = \frac{\pi \times 0.43}{6} [3 \times 1.36^2 + 3 \times 0.85^2 + 0.43^2] = 1.78 \text{ m}^3 \quad (50)$$

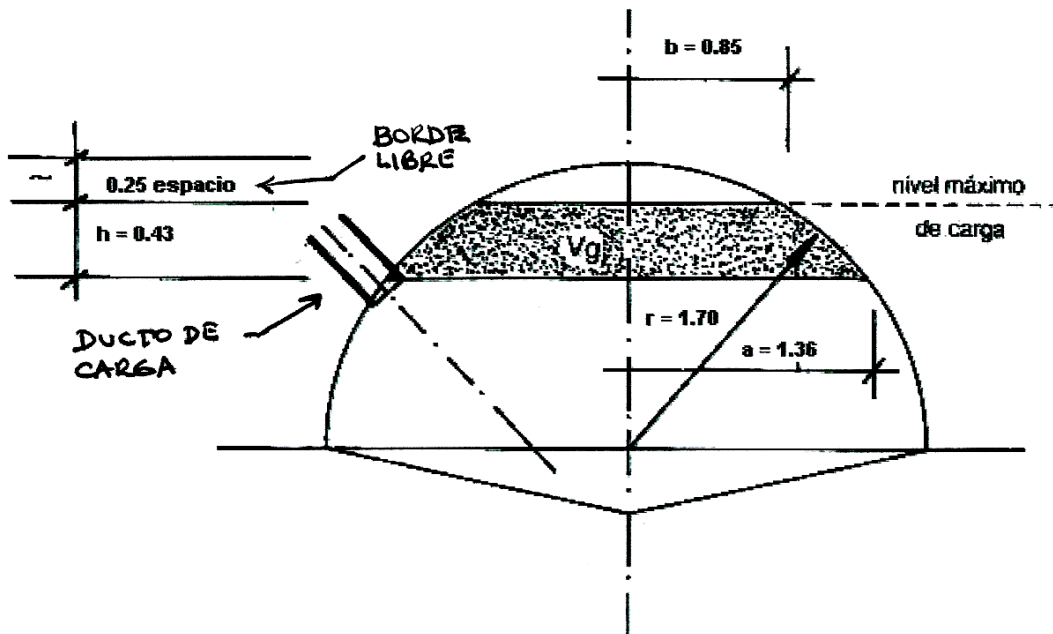


Figura 11 Volumen de almacenamiento de gas (área sombreada) [Olaya 2006].

El volumen de gas a almacenar, requiere entonces la adición de un tanque de compensación que proporcione al biodigestor el volumen necesario para almacenar la biomasa a fermentar. El volumen del tanque, entonces corresponderá al volumen de gas, es decir 1.78 m^3 , y se construye en medio del volumen generado por la campana y el volumen adicional; su forma geométrica corresponde a un cilindro, como se muestra en la figura 12 [Olaya 2006]. Se deja como ejercicio al lector, la determinación de estas últimas dimensiones y la elaboración del esquema completo del biodigestor acotado con sus dimensiones, así como la elaboración de esquemas de planta y cortes, también acotados. A manera de guía, se presenta en la figura 13 [Olaya 2006], el esquema completo del biodigestor en corte transversal, con algunas medidas sugeridas. Nótese el volumen del tanque de compensación entre los volúmenes de la cúpula y de piso.

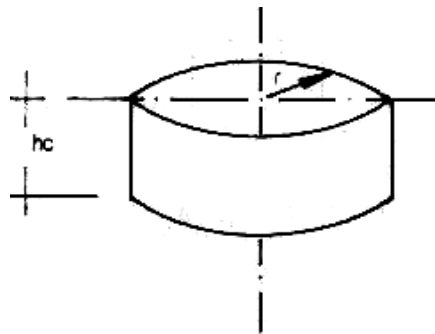


Figura 12: Tanque de compensación [Olaya 2006].

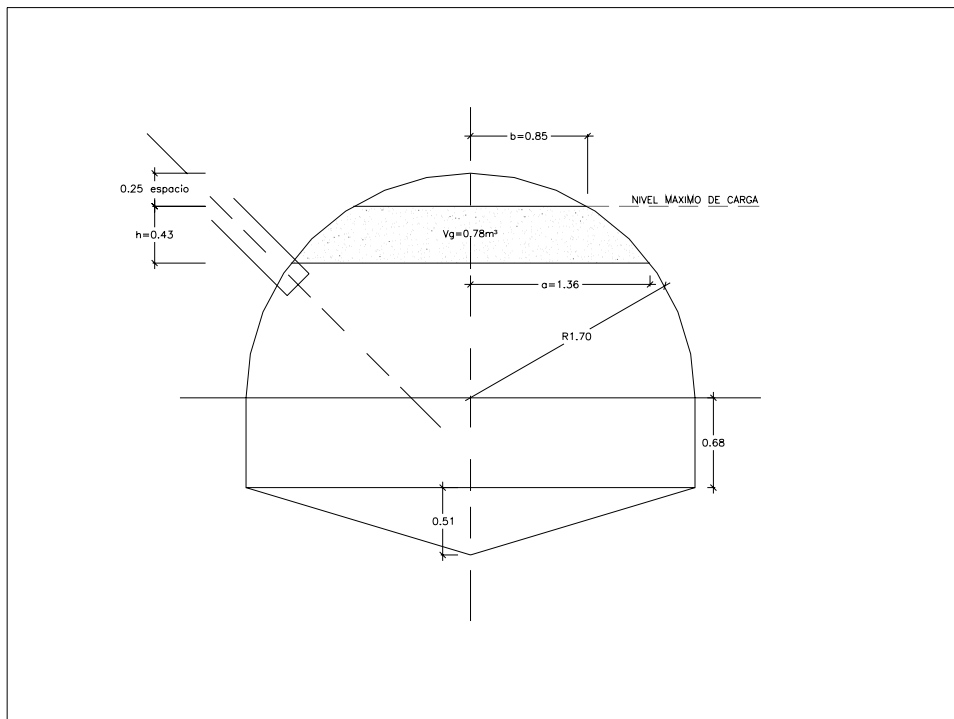


Figura 13. Corte transversal del esquema completo del biodigestor, del ejemplo diseñado [Olaya 2006].

4. CONSIDERACIONES FINALES SOBRE EL ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL BIODIGESTOR

Un primer paso en el arranque y operación del biodigestor es procurar que el ambiente es estrictamente anaeróbico, en razón a que las bacterias metanogénicas son muy sensibles al oxígeno, revisándose entonces que el biodigestor esté completamente sellado; cuando se tienen biodigestores que han estado en uso por más de un año, se debe realizar un chequeo y mantenimiento de fugas [Guevara 1996]. El arranque del biodigestor se realiza con el material de la carga disponible, estiércol porcino y/o vacuno, se recomienda inocular el estiércol fresco y agua en proporciones de 1:1 suspendiendo la carga por algunos días para permitir que la población bacteriana metanogénica comience a crecer y el proceso se estabilice [Vargas 1992]. El material se reúne con antelación al arranque por espacio de 20 o 30 días, y en aquellos casos donde se utilizan excretas de aves y residuos vegetales poco degradables se deben tratar previamente con sales; de igual manera, se debe revisar que la materia de carga no posea inhibidores (en concentración de inhibición) en su mezcla, como por ejemplo las mostradas en la tabla 11 [Guevara 1996]. La inoculación en el arranque se logra mediante el uso e inclusión de una cantidad de material, en porcentaje, de otro digestor, el cual ya está rico en bacterias que se encuentran en plena actividad; la tabla 12 muestra el porcentaje a incluir, de acuerdo con la edad del material [Hilbert 2003].

Tabla 11. Concentración inhibidora de inhibidores comunes identificados [Guevara 1996].

Inhibidor	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200-500 mg/l
CN	25 mg/l
Detergente	20-40 mg/l
Na	3500-5500 mg/l
K	2500-4500 mg/l
Ca	2500-4500 mg/l

Tabla 12. Edad y proporción en porcentaje que se agrega de material inoculador, en la etapa de arranque de un biodigestor [Hilbert 2003].

Edad	Porcentaje
1	33
2	25
3	20
4	15
5	10
6	5
7	0

Para lograr un adecuado funcionamiento de los biodigestores, se deben utilizar mezclas de estiércol fresco y agua en proporciones máximas hasta de 1:3 respectivamente y efectuar la carga diariamente para mantener una producción continua de biogás y bioabono; si se introducen volúmenes de mezcla mayores a los diseños se presentara arrastre de las bacterias que degradan la materia orgánica por la reducción en el tiempo de retención lo cual puede ocasionar problemas de acidificación en el proceso, malos olores y disminución en la producción de biogás [Vargas 1992].

Se debe hacer una correcta selección de los materiales a utilizar como materia prima de uso en el biodigestor, para evitar un mal funcionamiento de éste, en particular con el estiércol de las aves que tienen un alto contenido de amoníaco [Olaya 2006]. Se debe tener en cuenta las proporciones de carbono-nitrógeno, dado que estas deben permanecer de 20:1 respectivamente. De igual manera, el pH es un factor importante para crear un hábitat adecuado para las bacterias que se encargan de descomponer la biomasa, el cual debe permanecer entre 6.5 y 7.5 [Olaya 2006].

5. COSTOS

De acuerdo con Hilbert 2003, los costos asociados en el aprovechamiento de la tecnología del biogás, están relacionados con la operación, públicos, de la materia prima, del empleo del efluente, y de la utilización del biogás, como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Edad y proporción en porcentaje que se agrega de material inoculador, en la etapa de arranque [Hilbert 2003].

Tipo de costo	Concepto del costo
Asociados a la operación	Diseño e instalación Materiales Mantenimiento Mano de obra
Públicos	Unidades demostrativas Instalaciones de bajo riesgo comparativo y medidas de fomento Asistencia técnica
De la materia prima	Mano de obra Equipo para transporte Materia prima, si se compra
Del empleo del efluente	Mano de obra Equipo para transporte Almacenamiento Transporte hasta el lugar del uso
De utilización del biogás	Almacenamiento Distribución Adaptación de equipos Purificación

BIBLIOGRAFÍA

- ACEVEDO, P.;** (2006). *Biodigestor de doble propósito – producción e investigación – para residuos de granja porcícola*. Revista ION, 19 (1), 1-6, Diciembre.
- AGUILAR, F.X.; BOTERO, R.;** (2006). *Los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo*. Tierra Tropical, 2 (1), 15-25.
- ALCAYAGA, S.; GLARÍA, J.; GUERRERO, L.;** (1999). *Regulaciones de temperatura y potencial de hidrógeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandida*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Marzo. 11p. Disponible en Internet: <http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/ALCAYAGA1c.pdf> [Consultada Enero 2009]
- ÁLVAREZ, J.M.; CANETA, L.; MOYANO, C.;** (sf). *Biomasa y biogás*. Trabajo de Curso (Máquinas Térmicas II). Universidad Nacional del Nordeste. 15p. Disponible en Internet: <http://ing.unne.edu.ar/pub/biomasa.pdf> [Consultada Enero 2009]
- ARGUELLO DE FERNÁNDEZ, V.;** (1984). [Traductor]. *Especies para leña: arbustos y árboles para la producción de energía*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza – CATIE. Proyecto Leña y Fuentes Alternas de Energía. Turrialba, Costa Rica, 344p.
- BECKMAN, J.; CAMPERO, O.; FLORIDO, E.; ORTIZ, I.;** (2007). *Viviendas autoenergéticas para las aldeas rurales de Bolivia*. Coloquio Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Granada, Diciembre 18.
- BOTERO B., R.; PRESTON, T.R.;** (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización*. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda – Universidad EARTH. San José, Costa Rica, 20p.
- BUNC-CA;** (2002). *Manuales sobre energía renovable: Biomasa*. Biomass Users Network (BUN-CA), San José, Costa Rica, Septiembre, 42p.
- CORACE, J.J.; AEBERHARD, M.R.; MARTINA, P.A.; VENTÍN, A.M.; GARCÍA S., E.;** (2006). *Comparación del tiempo de reacción en el proceso de biodigestión según el tamaño de las partículas de aserrín utilizado como materia orgánica*. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas 2006, Universidad Nacional del Nordeste, Resumen T-034, 4p.
- FAO;** (2008). *El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades*. Roma, 2008, 162p.
- GÓMEZ, J.; VINIEGRA, G.;** (1979). *Uso de estiércol bovino digerido anaeróticamente como fertilizante para vegetales*. Producción Animal Tropical, 4: 25-29.
- GTZ-CVC-OEKOTOP;** (1987). *Difusión de la tecnología del biogás en Colombia*. Documentación del Proyecto. Cali.
- GUEVARA V., A.;** (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Producción de gas y saneamiento de efluentes*. Documento OPS/CEPIS/96. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – Organización Panamericana de la Salud. Lima, 80p.

- GUZMÁN S., J.C.;** (2008). *Apuntes sobre consumo energético de biomasa*. Diplomado en Energía SNAP, Proyecto No. 003/2008, PROLEÑA Soluciones Energéticas Eficientes, La Paz, Bolivia, febrero, 19p.
- HILBERT, J.A.;** (2003). *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA. Buenos Aires, 57p.
- LUTZ, P.;** (sf). *Producción de biogás a través de fermentación seca de biomasa: La solución para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos urbanos e industriales*. Documento Técnico. BEKON Energy Technologies GmbH & Co. KG., Landshut, Alemania, 9p.
- MÁRQUEZ K., M.F.;** (2005). *Estudio del tratamiento de lodos provenientes de pisciculturas mediante un sistema de digestión anaerobio*. Trabajo de Título (Licenciado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Ambiental). Universidad Católica de Temuco, Temuco.
- MCGARRY, M., STAINFORTH, J.;** (1978). *Compost, fertilizer and biogas production from human and farm wastes in the People's Republic China*. IDRC. Ottawa, Canada.
- OLAYA, Y.;** (2006). *Diseño de un biodigestor de cúpula fija*. Trabajo de Grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira.
- PEDRAZA, G.; CHARÁ, J.; CONDE, N.; GIRALDO, S.; GIRALDO, L.;** (2002). *Evaluación de los biodigestores en geomembrana (PVC) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino*. Fundación Centro de Investigaciones en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria – CIPAV. Cali. Disponible en Internet: <http://www.cipav.org.co/Irrd/Irrd14/1/Pedr141.htm> [Consultada Agosto 2003]
- POSSO, F.;** (2002). *Energía y ambiente: Pasado, presente y futuro. Parte Dos: Sistema energético basado en energías alternativas*. Geoenseñanza, Vol. 7, (1-2), pp54-73.
- RAMÓN, J.A.; ROMERO, L.F.; SIMANCA, J.L.;** (2006). *Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo*. Revista Ambiental: Aire, Agua y Suelo. Vol. 1, 15-23.
- ROBLES-GIL, S.;** (2001). *Información climatológica para la aplicación de la energía de la biomasa*. Comisión de Climatología, Organización Meteorológica Mundial. La Paz, México, Agosto, 75p.
- SOGARI, N.; REUSS, M.; BUSSO, A.;** (2000). *Diseño de un biodigestor para obtener metano utilizando excremento de vacas y cerdos en una escuela agrotécnica*. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad Nacional del Nordeste. Corrientes, Argentina, 4p.
- SORIA F., M.D.J.; FERRERA-CERRATO, R.; ETCHEVERS B., J.; ALCÁNTAR G., G.; SANTOS, J.T.; BORGES G., L.; PEREYDA P., G.;** (2001). *Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo*. Terra, Vol. 19, No. 4, pp353-362.
- TORRES D., M.; FOLLARI, J.;** (sf). *Un biodigestor de boñigas de cabra calefaccionado con colectores planos*. Laboratorio de Energía Solar. San Luis, Argentina. 4p. Disponible en Internet: <http://capra.iespana.es/capra/biogas/biogas.pdf> [Consultada Enero 2009]
- VARGAS L., L.;** (1992). *Los biodigestores, alternativa de tratamiento para residuos pecuarios*. Tesis (Ingeniero Sanitario). Universidad del Valle, Santiago de Cali.

VARGAS P., M.A.; (2006). *Introducción a las energías alternativas con experimentos sencillos*. La Paz, 8p.

VELASCO Z., C.; (2008). *La experiencia colombiana en la reorganización de productores*. ASOPORCITULTORES – FNP. Conferencia: Querétaro, México, Septiembre 18. Disponible en Internet: <http://www.cmp.org/eventos/enc7Mem/ConsueloV.pdf> [Consultada Febrero 2009]

YANK, L.; MARTINA, P.; CORACE, J.; AEBERHARD, A.; (sf). *Construcción de un biodigestor pequeño para su uso en investigación y docencia. Primeros ensayos*. Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia, Argentina. Disponible en Internet: <http://arandu.org.ar/pub/digestororiginal1.pdf> [Consultada Enero 2009]