

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Estimación del potencial de producción de energía eléctrica a partir de la extracción del biogás de los efluentes en granjas porcinas

René Alberto Silva Jimenez

Guatemala
2009

Estimación del potencial de producción de energía eléctrica a partir de la extracción del biogás de los efluentes en granjas porcinas

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Estimación del potencial de producción de energía eléctrica a partir de la extracción del biogás de los efluentes en granjas porcinas

Trabajo de investigación presentado por
René Alberto Silva Jimenez
para optar al grado académico de
Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala
2009

Vo. Bo.:



Jaime Rosales
Ingeniero Químico
Colegiado no. 320

Tribunal examinador:



Jaime Rosales
Ingeniero Químico
Colegiado no. 320



Gamaliel Zambrano
Ingeniero Químico
Colegiado no. 686



Oscar Maldonado
Ingeniero Químico
Colegiado no. 90

Fecha de aprobación: Guatemala, lunes 07, de diciembre de 2009

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES.....	3
A. Sector porcino en Guatemala.....	3
B. Biogás	6
C. Digestión anaeróbica.....	6
D. Tipos de extracción de biogás.....	8
E. Variables a consideración para extracción de biogás	11
F. Metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático	12
G. Metodología de agencia consultora internacional	15
III. Justificación.....	16
IV. Objetivos	17
H. General.....	17
I. Específicos.....	17
V. Metodología	18
VI. Cronograma.....	19
VII. Resultados	20
A. Cuantificación de combustible extraído según digester anaeróbico.....	20
B. Diseño de digester continuo de laguna cubierta:	20
C. Costos.....	24
D. Comparación económica para uso de biogás en conversión de energía	25
VIII. Discusión	26
IX. Conclusiones	30
X. Recomendaciones.....	31
XI. Bibliografía.....	32
XII. Apéndice.....	33
A. Diagramas de bloques de procesos	34
B. Datos originales	34
C. Cálculo de muestra.....	36
D. Datos calculados	44
E. Glosario.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Distribución de granjas porcinas por departamento.....	3
Tabla 2 Población Porcina por departamento	4
Tabla 3 Población Porcina por departamento	5
Tabla 4 Consumo de energía eléctrica por tecnificación de granja	5
Tabla 5 Composición del biogás.....	6
Tabla 6 Tipos de digestión anaeróbica y sus características:.....	7
Tabla 7 Valores predeterminados de tasas de excreción de sólidos volátiles de porcinos, kg/cabeza-día.....	14
Tabla 8 Factores predeterminados de emisión de metano para diferentes sistemas de manejo de estiércol.....	14
Tabla 9 Valores predeterminados de potencial de producción de metano para m ³ CH ₄ /kg VS.	14
Tabla 10 Caracterización de descarga por etapa de desarrollo en crianza de cerdos	15
Tabla 11 Volumen de combustible capturado	20
Tabla 12 Especificaciones para reactor anaerobio tipo laguna cubierta	22
Tabla 13 Especificaciones para reactor anaerobio de bolsa tipo salchicha.....	22
Tabla 14 Especificaciones para criadoras en uso de calefacción de lechones	22
Tabla 15 Especificaciones para generadores eléctricos a partir de biogás.....	22
Tabla 16 Especificaciones de digester laguna cubierta con las diferentes metodologías	23
Tabla 17 Datos de costo de instalación y montaje	24
Tabla 18 Inversión inicial dependiendo el uso de biogás y tecnología	25
Tabla 19 Inversión y tiempo de recuperación para uno de combustible para generación de energía térmica.	25
Tabla 20 Inventario de la población de granja piloto	34
Tabla 21 Caracterización de etapas de desarrollo para granja	35
Tabla 22 Factores de conversión	35
Tabla 23 Especificaciones para generación de energía termica.....	35
Tabla 24 Producción de excreta y sólidos volátiles en granja por etapa de desarrollo	44
Tabla 25 Datos calculados, metodología IPCC	44
Tabla 26 Datos calculados, metodología agencia consultora	44
Tabla 27 Detalle de captura de metano por etapa del desarrollo de crianza	45
Tabla 28 Detalle de captura de biogás por etapa del desarrollo de crianza	45
Tabla 29 Volúmenes de captura de metano y biocombustible en digester semicontinuo de bolsa tipo salchicha 45	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Digestor de tambor flotante	9
Ilustración 2 Digestor de domo fijo	10
Ilustración 3 Digestor tipo Deenbandhu:	11
Ilustración 4 Digestor de bolsa:	11
Ilustración 5 Diagrama de flujo de proceso	20
Ilustración 6 Balance de masa del sistema mediante metodología de IPCC	21
Ilustración 7 Balance de masa del sistema mediante metodología de Agencia Consultora.....	21
Ilustración 8 Dimensiones de digestor laguna cubierta	23
Ilustración 9 Dimensiones de digestor de bolsa tipo salchicha	24
Ilustración 10 Flujo de proceso	34

RESUMEN

A partir de las metodologías propuestas por la IPCC basada en estimación de producción de metano a partir de sólidos volátiles y metodologías basadas en la estimación de producción desde la demanda química de oxígeno, se estudió la posibilidad de construcción de un digestor anaeróbico continuo de laguna cubierta en comparación con un semicontinuo de bolsa tipo salchicha en una granja de cerdos tamaño mediano ubicada en el municipio de Cuilapa del departamento de Santa Rosa para la estimación de la producción de combustible gaseoso a partir de las excretas del ganado de la granja. La granja cuenta con una población total promedio de 1632 cabezas de cerdo al año divididas en las diferentes etapas de crianza del ganado, un consumo promedio de 31.81 m³ agua al día. Se obtuvo un total de 154.27 m³ de biogás al día para un digestor de laguna cubierta equivalentes a 13 digestores de bolsa tipo salchicha trabajado en las mismas condiciones, capaces de generar 240 kWh al día. La elección del digestor anaeróbico adecuado dependerá del uso propuesto del biogás. Se recomienda un digestor de bolsa tipo salchicha cuando el biogás es destinado para la obtención de energía térmica dentro de una granja mediante su combustión en equipos de calefacción, cocción etc. debido a su bajo costo y producción. Para la obtención de energía eléctrica se recomienda la instalación de un digestor de laguna cubierta para la producción de biogás ya que los flujos de extracción son los suficientes para satisfacer la demanda de un generador en el tiempo.

ABSTRACT

Based on the methodologies proposed by the IPCC that estimate the methane production from volatile solids, and the methodologies based on the estimated production from the chemical oxygen demand, this thesis studied the possibility of constructing a continuous covered lagoon anaerobic digester compared to a stock of “sausage” anaerobic digesters in a medium pig farm size located in the municipality of Cuilapa department of Santa Rosa; to estimate the production of fuel gas from the manure of livestock on the farm. The farm has a total population average of 1632 of pigs per year divided into the different stages of raising cattle. The water average consumption is 31.81 m³ of water per day. The results express a total of 154.27 m³ of biogas per day for a covered lagoon digester equivalent to 13 sausage bag digesters worked under the same conditions; the methane production can generate 240 kWh per day. The choice of the appropriate anaerobic digester depends on the intended use of biogas. The thesis recommend a sausage bag digester when the biogas is intended for the thermal energy production, this could be in a farm by using the combustion for heating, cooking etc. due to its low production cost. To obtain electrical energy is recommended to install a covered lagoon digester for the biogas production, this is due to the amount of methane captured and the extraction flow are sufficient to provide the demand of fuel for the generator plant in time.

I. INTRODUCCIÓN

La actual crisis económica y el aumento en el precio de los combustibles fósiles a nivel mundial así como el deterioro en el medio ambiente, han incrementado la búsqueda de alternativas que permitan sustituir o reducir la dependencia que de estos se tiene en producción y hacer de las actividades productivas procesos amigables con el ambiente mejorando su sostenibilidad.

Específicamente en Guatemala, existen diferentes sectores productivos que han venido presentando un gran dinamismo en los últimos años y que se han visto afectados por dichos factores. Tal es el caso del sector porcino, actividad que históricamente ha sido muy criticada ambientalmente por el inadecuado manejo que se les brinda a los desechos generados y que debido a sus altos costos de producción, necesita de alternativas que le permitan una producción eficiente sin dejar a un lado el carácter ambiental.

Por esta razón, este trabajo, surgió como una alternativa de solución a la problemática que presenta actualmente el manejo de los desechos generados en una granja de cerdos y a la reducción de los costos de producción de la actividad. En este tipo de actividad, los desechos producidos en la mayoría de los casos no reciben ningún tratamiento y se convierten en focos de contaminación, siendo la cerdaza el principal residuo de la actividad. Sin embargo, la cerdaza cuenta con una gran cantidad de nutrientes que pueden reutilizarse en otras actividades productivas.

Por lo tanto, con este trabajo se presenta una alternativa de producción para el sector porcino al buscar despertar el interés de los productores de cerdos, tanto a nivel nacional como regional, en aprovechar la cerdaza, puesto que ésta contiene un alto potencial de generación de biogás que en la actualidad la mayoría de productores está desperdiciando. De esta manera no solo se pretende proponer una alternativa para el manejo de los desechos sino también se busca ayudar económicamente al productor presentándole opciones para la sustitución de servicios tales como combustible y energía eléctrica, al mismo tiempo que se reducen los impactos ambientales negativos que conlleva la actividad porcina, ya que una digestión anaeróbica controlada tiene la capacidad de disminuir el DBO de un afluente hasta en un 90% y se evita la liberación de una masa de CO₂ equivalente a la atmósfera.

El objetivo de este trabajo es la estimación de producción de combustible gaseoso a partir de la digestión anaeróbica en reactores tanto continuos como semicontinuos mediante el análisis de su diseño, costos y su potencial de producción de biogás. Se plantearon las tecnologías de reactores de laguna cubierta y de bolsa tipo salchicha mediante las estimaciones propuestas por las directrices del panel intergubernamental del cambio climático (IPCC)

para la elaboración de inventarios nacionales de emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Para esto se realizará un levantamiento de información estadística de la población nacional de ganado porcino en crianza tecnificada y en sus áreas de producción. Es importante mencionar, que con este trabajo no pretende la elaboración de un sistema aplicable para cualquier granja de cerdos, por tanto únicamente se hará referencia a las especificaciones de la granja de estudio. Se tomará como caso de estudio una granja tamaño mediana, con un promedio de 1650 cabezas de cerdo, ubicada en el municipio de Cuilapa del Departamento de Santa Rosa, Guatemala donde la temperatura promedio anual es del 28 ° C. la alimentación se asume como la común para una granja semitecnificada a base de alimentos concentrados altos en proteínas.

Las metodologías propuestas por las directrices del IPCC para elaboración de los inventarios nacionales de GEIs están en función de la población de cerdos en las áreas de producción de una granja porcina, así como las temperaturas promedio de la zona donde estas se encuentran, el tipo de alimento de los animales, entre otras.

II. ANTECEDENTES

A. Sector porcino en Guatemala

El sector porcino en Guatemala consta de una larga cadena productiva que va desde la elaboración de alimentos concentrados hasta el faenado, pasando por la gestación de las hembras reproductoras, maternidad, cría, engorde y el sacrificio, así como la producción de productos derivados del cerdo como los embutidos, despieces, curtiembre, etc.

Los registros oficiales guatemaltecos ubican al sector con un aporte del 1.7% del PIB y con un crecimiento promedio de 10% anual, con disminuciones particularmente marcadas por las crisis estacionales de carácter global o regional. Guatemala posee granjas de carácter artesanal, granjas tecnificadas y semitecnificadas que debido al tipo de gestión proporcionado al engorde de cerdos lo ubican como un sector de alto riesgo para impactos ambientales negativos que pueden afectar directamente los recursos hídricos, edáficos y atmosféricos, así como el bienestar social de las comunidades aledañas a las diferentes granjas productoras.

Guatemala cuenta con una cantidad mayor a 1, 500,00 cerdos a nivel nacional. Esta población se encuentra distribuida en granjas pequeñas y medianas con un promedio de 200 vientres por granja. Según el censo agropecuario del 2008 la mayoría de granjas porcinas se encuentra en el departamento de Quetzaltenango, seguido por el departamento de San Marcos, Quiche, Huehuetenango. El país cuenta con una capacidad instalada de 28,000 vientres tecnificados para la cría aproximada de 475000 lechones al año, dejando un promedio de 17 lechones nacidos por vientre al año.

Tabla 1 Distribución de granjas porcinas por departamento

Departamento	Porcentaje de fincas
Quetzaltenango	14 %
San Marcos	13 %
Quiche	12 %
Huehuetenango	11 %
Resto de la República	51 %

(INE 2008)

Tabla 2 Población porcina por departamento

Departamento	Fincas		Animales	
	Fincas	%	Número	%
Toda la República	435,263	100.00	1,581,130	100.00
Alta Verapaz	38,377	8.82	94,585	5.98
Baja Verapaz	23,33	5.36	71,626	4.53
Chimaltenango	12,725	2.92	36,867	2.33
Chiquimula	13,14	3.02	83,017	5.25
El Progreso	3,37	0.77	19,236	1.22
Escuintla	5,373	1.23	79,095	5.00
Guatemala	4,973	1.14	147,906	9.35
Huehuetenango	47,87	11.00	127,592	8.07
Izabal	9,799	2.25	138,006	8.73
Jalapa	13,266	3.05	46,86	2.96
Jutiapa	9,503	2.18	50,703	3.21
Petén	8,226	1.89	46,77	2.96
Quetzaltenango	59,323	13.63	168,151	10.63
Quiché	52,695	12.11	128,071	8.10
Retalhuleu	5,577	1.28	27,412	1.73
Sacatepéquez	2,757	0.63	13,715	0.87
San Marcos	57,589	13.23	124,177	7.85
Santa Rosa	7,58	1.74	32,424	2.05
Sololá	9,878	2.27	21,736	1.37
Suchitepéquez	4,41	1.01	16,889	1.07
Totonicapán	37,678	8.66	70,549	4.46
Zacapa	7,827	1.80	35,743	2.26

(INE 2008)

Según la asociación de porcuicultores de Guatemala existen un total de 28,000 vientres tecnificados con un promedio de 17 lechones destetados al año, lo que propone una producción total de 473,280 lechones al año con un promedio final de 90 lb/cerdo. Esto ubica a Guatemala como el mayor productor de cerdo de la región centroamericana y el Caribe. La población porcina en C.A. se estima en 3.2 millones de animales, siendo el 78% tipo criollo mantenido en sistemas de producción rústicos, a costos bajos, rendimientos bajos y comercializan el animal en pie, a bajos precios, principalmente a intermediarios a una edad de sacrificio entre los 12 y 18 meses.

La disponibilidad de recursos y energía en una granja típica (con todas las etapas del desarrollo) sin considerar los eslabones vinculados (formulación de alimentos, sacrificio y elaboración de productos alimenticios) tiene una demanda de energía en las siguientes actividades dependiendo del nivel de tecnificación, factores climáticos y ubicación:

Tabla 3 Población porcina por departamento

Proceso	Por ciento de energía utilizada
Bombeo de agua	Del 5 – 35 %
Calefacción	Del 10 – 75 %
Ventilación	Del 1 – 15 %
Iluminación	Del 2 – 4 %
Dosificación de alimentos	Del 1 – 25 %
Tratamiento de residuos	Del 2 – 9 %

Fuente: artículos del CGP+L

El consumo total de energía eléctrica puede variar de la siguiente manera:

Tabla 4 Consumo de energía eléctrica por tecnificación de granja

Tipo de granja	Consumo eléctrico
Granja semitecnificada	De 15 – 23 kWh/mes vientre
Granja tecnificada	De 18 – 37 kWh/mes vientre
Producción de traspatio	0 kWh/mes vientre

Fuente: artículos del CGP+L

La demanda energética depende del nivel de tecnificación y ubicación, pues arriba de 750.00 metros sobre el nivel del mar, donde se encuentra alrededor del 35% de granjas en Guatemala, se requiere de calefacción para las etapas de maternidad y destete.

Debido al alto consumo energético dentro de la porcicultura es necesario buscar alternativas para reducir su consumo, es por esto que se pretende la generación de energía eléctrica a partir de biogás o bien la sustitución de lámparas criadoras con resistencia eléctrica por criadoras que funcionen con quemadores de biogás para la calefacción.

B. Biogás

El biogás se define como el producto de la actividad metanogénica de una bacteria bajo condiciones anaeróbicas en materia biodegradable, comúnmente conocido como biodegradación de materia orgánica.

Tabla 5 Composición del biogás

Sustancia	Símbolo	Porcentaje
metano	CH ₄	50-70%
Dióxido de Carbono	CO ₂	30-40%
Hidrogeno	H ₂	5-10%
Nitrógeno	N ₂	1-2%
Agua	H ₂ O	0,1-1%
Acido Sulfhídrico	H ₂ S	Trazas

(FAO/TCP/NEP 1996)

Es un gas que dentro de sus características físicas se puede describir su similitud con el GLP, es incoloro e inodoro. Puede utilizarse como combustible gaseoso con una eficiencia de combustión promedio del 60% en estufas de biogás convencionales. El biogás es comúnmente llamado metano, esto debido a que es el compuesto químico que se presenta en mayor proporción, por tanto es el metano quien propone la mayoría de sus características físicas y químicas. Posee una densidad de 0.67 kg/m³, un menor peso en comparación al aire y posee una temperatura de ignición de 650-750C (Diesel 350°C; Gasolina y Propano 500°C) su capacidad calorífica es de 20MJ/m³ la cual es relativamente baja en comparación del 36 MJ/m³ del GLP y la temperatura de llama del biogás alcanza unos 870°C (FAO/TCP/NEP 1996).

C. Digestión anaeróbica

Una digestión anaeróbica es aquella que se produce cuando organismos en ausencia de oxígeno degradan parte o la totalidad de la materia orgánica disponible. Los microorganismos utilizados para este tipo de proceso son las bacterias anaeróbicas, las cuales se dividen básicamente por sus características citológicas donde encontramos cuatro grupos generales:

A. Rod-Shaped Bacteria

1. metanobacterium no esporulante
2. metanobasillus esporulante

B.Spherical Bacteria

1. Metanosarcina, Sarcinae
2. Metanococcus no conformado por grupos Sarcineales

Estas bacterias actúan degradando la materia orgánica produciendo metano u otros gases dentro de su propio ciclo de vida en condiciones anaeróbicas. Puede ser producción en lagunas de oxidación de profundidad media, reactores de digestión anaeróbica, o bien en cualquier acumulación de agua con alto contenido de materia orgánica. No es necesaria la adición de este tipo de bacterias para la digestión anaeróbica porque este tipo de bacterias se encuentran en excretas de animales y en residuos agrícolas (FAO/TCP/NEP 1996).

Existen sustancias que son tóxicas para las bacterias presentes en el proceso, lo cual puede ocasionar una reducción considerable de la producción de biogás. Existen sustancias catalizadoras como las sales alcalinas aunque dependiendo de su concentración en la mezcla también pueden actuar como inhibidoras. Las sustancias inhibidoras son las sales solubles de algunos metales como el cobre, Zinc y Níquel que pueden encontrarse en medicamentos empleados en la salud de los animales (PA Consulting 2009).

La digestión anaeróbica puede llegar a significar la reducción del DBO hasta uno 80 – 95% del DBO inicial, esto mediante un equilibrio ecológico donde se presente un pH de 6.8-7.6 y una relación carbono-nitrógeno de 20-30:1. Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a digestión anaeróbica, y la cantidad de biogás producido dependerá de la composición de la materia orgánica utilizada.

Tabla 6 Tipos de digestión anaeróbica y sus características:

Tipo de digestión	Intervalo de temperatura	Características de digestión
Psicrofílica	10 - 20 C	A esta temperatura la carga debe permanecer en el digestor más de 100 días
Mesofílica	30 - 40 C	La carga tiene un tiempo de residencia de 15 a 30 días. Este tipo de proceso tiende a ser el más confiable y tolerante que el proceso termofílico
Termofílica	> 55 C	La carga permanece en el digestor de 12 a 14 días

(PA Consulting 2009)

D. Tipos de extracción de biogás

La extracción de biogás se produce mediante la acumulación de materia orgánica en condiciones anaeróbicas, por tanto un mecanismo para la extracción de biogás puede significar un reactor complejo o bien la simplicidad de un sistema de acumulación de manera aleatoria de agua con alto contenido de materia orgánica sin la intervención humana (“encharcamiento”).

Comúnmente pueden verse lagunas de oxidación y lagunas facultativas con actividad metanogénica por medio de aparición de burbujeo en la superficie de estas. Se incluyen las lagunas facultativas debido a que la absorción de aire en el interior de la laguna es prácticamente nula lo que propone un sistema anaeróbico en la parte inferior de la laguna ($>0.1\text{m}$). La pérdida del biogás al ambiente por este tipo de extracción de biogás es del 100%. Con frecuencia es utilizado un reactor de digestión anaeróbica que facilita la recolección del biogás para su uso como combustible (PA Consulting 2009).

Los reactores de digestión (biodigestores) pueden ser contruidos de diferentes materiales dependiendo de las condiciones del lugar de instalación, así como la disponibilidad económica para la implementación de este tipo de tecnología. Los materiales van desde membranas de polipropileno o polietileno de alta densidad, hasta digestores donde se incluye obra civil para su construcción (p. Ej., concreto, hierro, block).

En el mercado nacional se puede encontrar membranas de polietileno de mediana densidad con un costo aproximado de Q. 1500.00-2000.00 o instalaciones de obra civil que asciende a un total mínimo de Q. 100,000.00 (APOGUA 2008).

Un biodigestor, reactor de digestión anaeróbica o bio-reactor es una estructura física que propone las condiciones ideales de ausencia de oxígeno, fácil carga y descarga de materia orgánica para extracción y la posibilidad de manipulación de biogás.

Los digestores se agrupan en cuatro grupos principales: los digestores por lote o batch, los de régimen semicontinuo y régimen continuo. A continuación una descripción de cada uno de ellos:

- **Digestores por lote o batch:**

Se cargan de una vez en forma total o por intervalos durante varios días y la descarga se efectúa cuando han dejado de producir el biogás. Normalmente consiste en tanques orgánicos herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

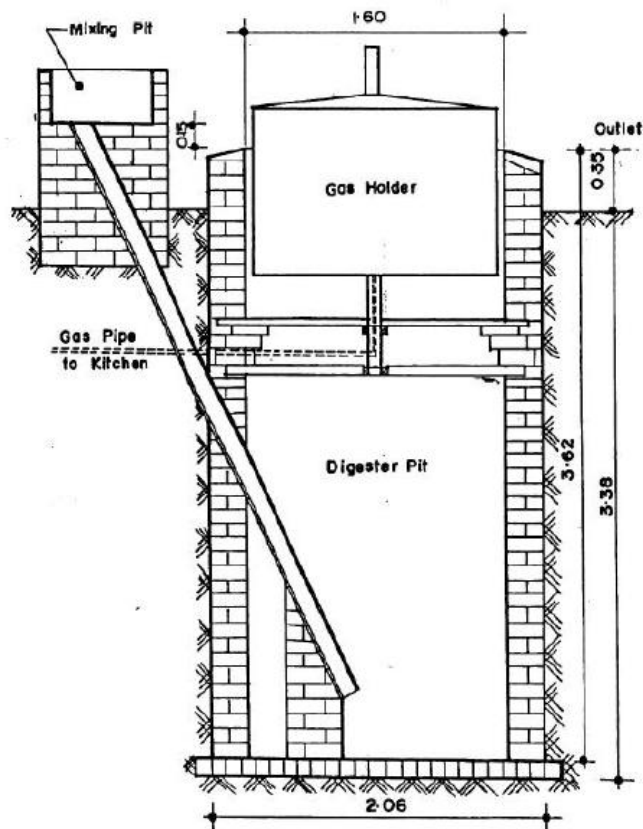
- Régimen Semicontinuo

Como su nombre lo indica, este tipo de digestores poseen características de los digestores por lotes y de régimen continuo. Este tipo de digestor es el más usado en el medio rural cuando se trata de sistemas pequeños para usos domésticos. Los diseños más populares son el chino y el hindú.

Tipos de digestores de régimen semicontinuo:

Digestor de tambor flotante: Digestor de tecnología Hindú utilizada a mediados de los años 50, comúnmente conocidos como Gobar Gas Plant. Su nombre se debe al dispositivo colocado en la parte superior para la acumulación de biogás o tambor. Esta construido con materiales de obra civil (p. ej., concreto, hierro, ladrillo), el tambor es de acero lo que incrementa el costo de construcción así como el costo de mantenimiento por corrosión.

Ilustración 1 Digestor de tambor flotante

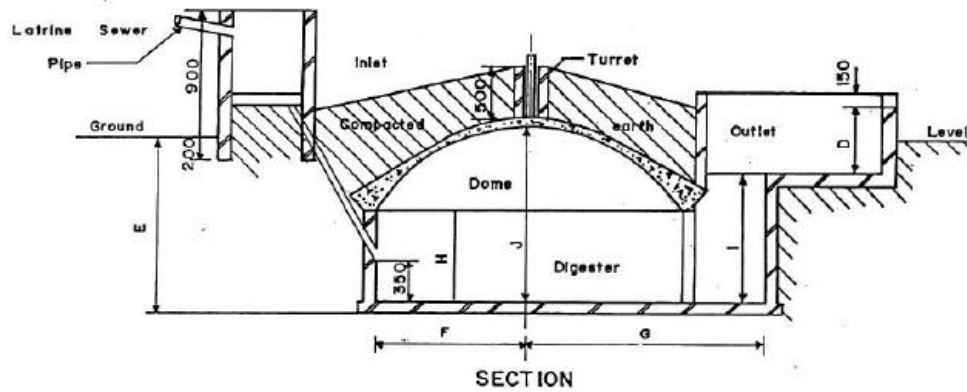


(FAO/TCP/NEP 1996)

Digestor de domo fijo: Digestor de tecnología china como planta de extracción de biogás (también llamado digestor sin tambor), desarrollado a mediados de los años 30. Consiste en la construcción de una bóveda de ladrillo bajo la tierra (cámara de fermentación) con un domo en la superficie para el almacenamiento de biogás. En este

modelo la cámara de fermentación y la cámara de contención de gas están combinadas en una sola parte. No utiliza contenedores de gas de acero lo que evita la corrosión del mismo, incrementando la vida útil de 20 a 50 años.

Ilustración 2 Digestor de domo fijo



(FAO/TCP/NEP 1996)

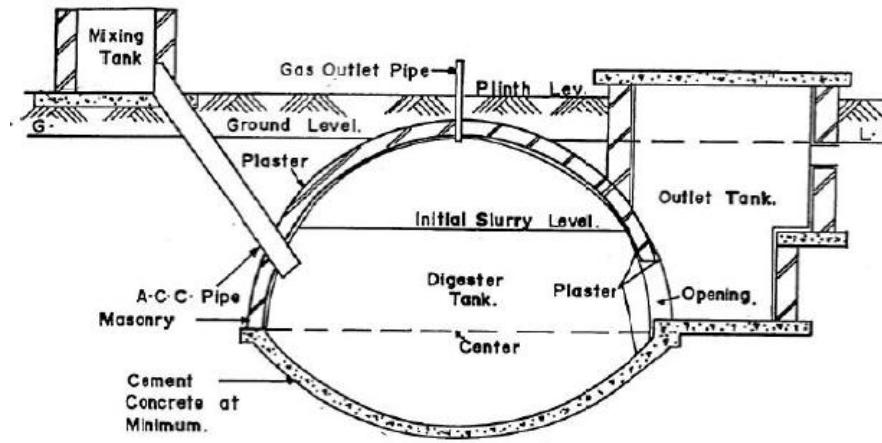
Biodigestor tipo Deenbandhu: Digestor de tecnología Hindú que básicamente incluye las características de los dos tipos anteriores.

Biodigestor de bolsa: Tecnología Taiwanesa de principios de 1960 que consiste en un cilindro largo hecho de una membrana polimérica (originalmente PVC), fue desarrollado para resolver problemas experimentados con los digestores de ladrillo. Este tipo de digestor es el actualmente más usado, aunque tiene la desventaja que no poseen la capacidad de digerir un gran volumen de materia orgánica.

- Digestores de régimen continuo

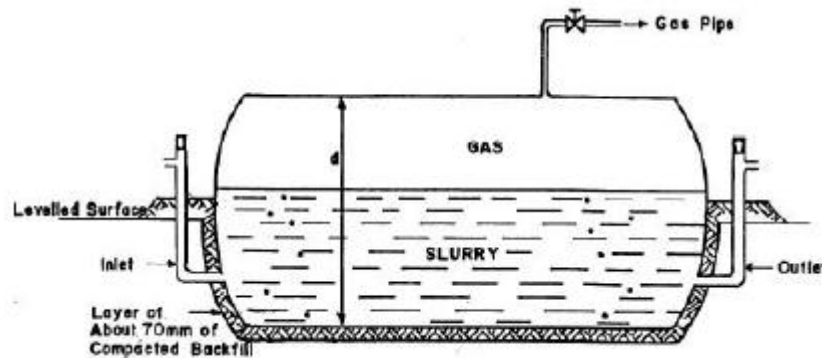
Son sistemas de gran tamaño que emplean por lo general calefacción y agitación, se utilizan para procesos industriales donde se pretende la digestión de la totalidad de aguas residuales del proceso. Por tanto se obtiene una gran cantidad de biogás. Por lo general suelen cubrir total o parcialmente las lagunas de oxidación de la industria o bien el canal de efluentes de la misma. Pueden ser de bolsa, laguna cubierta o laguna parcial (PA Consulting 2009).

Ilustración 3 Digestor tipo Deenbandhu:



(FAO/TCP/NEP 1996)

Ilustración 4 Digestor de bolsa:



(FAO/TCP/NEP 1996)

E. Variables a consideración para extracción de biogás

Para poder estimar la cantidad de metano producido a partir de materia orgánica es necesario tomar en cuenta variables que determinaran el tiempo de residencia, eficiencia de conversión y complejidad del diseño.

Las variables a tomar en cuenta son:

- La temperatura promedio del lugar donde se plantea la instalación de un digestor, a mayor temperatura se mejora la eficiencia de la digestión.
- Los sólidos totales y volátiles contenidos en la materia orgánica a tratar. Normalmente se tiene un total de 70-90% de sólidos volátiles.

- La demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₂₀). Son parámetros que miden la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida.
- El pH que equivale a la acidez en mayor o menor grado del digestor. El incremento del pH dentro del digestor indica un exceso de amoníaco en el proceso y el decremento del pH, un aumento en el contenido de ácidos grasos volátiles (ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico) lo cual degradará las características físicas del biogás. El pH óptimo para la digestión oscila entre 6.8 y 7.6 para mantener el equilibrio ecológico requerido.
- El flujo de alimentación, esta variable es la más importante para el diseño del digestor ya que las dimensiones del digestor están directamente relacionadas con ella. (PA Consulting 2009).

F. Metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático

Al detectar el problema del cambio climático mundial, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988. Se trata de un grupo abierto a todos los Miembros de las Naciones Unidas y de la OMM (IPCC WEB).

La función del IPCC consiste en analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo (IPCC WEB).

El IPCC elabora, asimismo, Informes Especiales y Documentos Técnicos sobre temas en los que se consideran necesarios la información y el asesoramiento científicos e independientes, y respalda la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) mediante su labor sobre las metodologías relativas a los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (IPCC WEB).

En el año 2006 el IPCC planteó las directrices para la elaboración de inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero donde se brindan metodologías acordadas internacionalmente para que utilicen los países miembros, con el objeto de estimar las emisiones de gases de efecto invernadero y su publicación. Dentro de estas directrices se formularon metodologías para las emisiones resultantes de la gestión del ganado y el manejo del estiércol donde se puede encontrar orientación sobre los métodos para estimar las emisiones de metano a partir de la fermentación entérica en el ganado y emisiones de metano y óxido nítrico de la gestión del estiércol.

Los principales factores que inciden en las emisiones de CH₄ son la cantidad de estiércol que se produce y la porción que se descompone anaeróbicamente. La primera depende de la tasa de producción de desechos por animal y de la cantidad de animales, mientras que la segunda depende de cómo se gestiona el estiércol. Cuando el estiércol se almacena o se procesa como líquido (p. ej., en lagunas, estanques, tanques o pozos), se descompone anaeróbicamente y puede producir una cantidad significativa de CH₄. La temperatura y el tiempo de retención de la unidad de almacenamiento son dos factores que inciden significativamente en la cantidad de metano producido. Cuando el estiércol se maneja como sólido (p. ej., en parvas o pilas) o cuando se lo deposita en pasturas y prados para su degradación, se presentan condiciones ideales para una descomposición aeróbica lo que resulta en una menor producción de CH₄ (IPCC 2006)

La estimación de las emisiones de metano del sector pecuario en la gestión de estiércol según la IPCC esta en función de los sólidos totales descartados, la población del hato de ganado y propiedades físicas del metano en las condiciones ambientales de la granja.

$$CH_4 = (Vs \cdot n \cdot 365) \cdot (Bo \cdot 0.67 \frac{kgCH_4}{m^3CH_4} \cdot f) \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde el CH₄ es una estimación del total de emisiones de metano producido del manejo de estiércol en producción de cerdos (aplicable para cualquier tipo de ganado); Vs es la media diaria de sólidos volátiles producidos por excretas en ganado (kg / animal día); n es el número total promedio de animales en el hato de ganado; Bo capacidad de conversión máxima de producción de metano (m³ CH₄ / kg Vs); f es el factor de conversión de metano para el manejo de excreta a una temperatura específica.

El término de la izquierda de la ecuación corresponde a los sólidos totales descargados por la granja correspondiente al número de animales en un periodo específico, en este caso, un año. El segundo término, corresponde al factor de conversión que corrige el primero tomando en cuenta la temperatura, densidad del metano y la capacidad de recolección de excreta por parte de la granja.

Como se muestra, la Ecuación 1, se requiere un estimado de la tasa de excreción promedio de sólidos volátiles por día para la categoría de ganado bajo consideración. Los valores predeterminados porcinos están listados en el tabla 2.5.

Tabla 7 Valores predeterminados de tasas de excreción de sólidos volátiles de porcinos, kg/cabeza-día.

Región	Porcinos de cría	Porcinos de carne
Norte América	0.50	0.27
Europa Occidental	0.46	0.30
Europa Oriental	0.50	0.30
Oceanía	0.50	0.28
América Latina	0.30	0.30
Oriente Medio	0.30	0.30
Asia	0.30	0.30

(IPCC 2006)

De igual manera, los datos para el factor de conversión de metano para el manejo de excreta a una temperatura específica (f) están dados a continuación:

Tabla 8 Factores predeterminados de emisión de metano para diferentes sistemas de manejo de estiércol.

Temperatura	Lagunas	Tanques y lagos Almacenamiento	Pozo >1 mes	Pozo <1 mes
Frío	66-73	17-25	3	17-25
Templado	74-79	27-65	3	27-65
Cálido	79-80	71-80	30	71-80

(IPCC 2006)

Finalmente, el uso de la Ecuación 1 requiere la especificación del potencial de producción de metano (B_0)

Tabla 9 Valores predeterminados de potencial de producción de metano para m^3 CH₄/kg VS.

Región	Porcinos de cría	Porcinos de carne
Norte América	0.48	0.48
Europa Occidental	0.45	0.45
Europa Oriental	0.45	0.45
Oceanía	0.45	0.45
América Latina	0.29	0.29
Oriente Medio	0.29	0.29
Asia	0.29	0.29

(IPCC 2006)

G. Metodología de agencia consultora internacional

Existen agencias consultoras para la captura de biogás que basan sus estimaciones en pequeñas variantes de la metodología propuesta por el IPCC. Su punto de partida se centra en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) presente en las descargas de agua de las granjas. Se han realizado caracterizaciones de DQO para cada una de las etapas del desarrollo de la crianza de cerdos en unidades de kg DQO/animal día para la estimación de la captura de metano en la granja. En la tabla 1.6 pueden apreciarse los valores de para cada etapa. La ecuación 2 presenta la metodología seguida para estimar la captura de metano a partir del DQO contenido en los efluentes de las granjas.

Tabla 10 Caracterización de descarga por etapa de desarrollo en crianza de cerdos

<u>Etapa del desarrollo</u>	<u>DQO kg/día cabeza</u>
Cerdas lactante	1.100
Cerdas en gestación	0.470
reemplazos	1.100
Destete	0.122
Engorda	0.392
Sementales	0.270

(IPCC 2006)

$$V_{CH_4} = DQO_{tot} \cdot 0.349 \frac{m^3 CH_4}{kg DQO} = [(H) \cdot (DQO_{etapa}) \cdot (\%DQO_{destruido}) \cdot (\%Estiercol_{fresco})] \cdot 0.349 \frac{m^3 CH_4}{kg DQO}$$

(Ecuación 2)

Donde H es la población de animales para la etapa de cálculo, El DQO es el factor promedio de la caracterización de la etapa (tabla 1.3). El %DQO es la relación de la cantidad de DQO que es convertida en metano, generalmente se encuentra entre el 60-80%. El % de estiércol es la fracción de la cantidad de estiércol recogido del total de estiércol producido. La constante es la relación del volumen producido por masa de DQO.

Esta metodología es aplicable cuando es necesario obtener datos más específicos de la captura de metano en una granja, con la dificultad que es necesario realizar una caracterización de DQO para la granja ya que este valor dependerá de la dieta proporcionada al animal. Los valores presentados en la tabla 1.3 son datos obtenidos por una agencia consultora que trabaja con granjas de cerdos tecnificadas en Latinoamérica por lo que los valores son parecidos para el territorio guatemalteco en granjas con el mismo nivel de tecnificación.

III. Justificación

Para una producción amigable al ambiente que no resulte desfavorable económicamente a una empresa, es necesario de un proceso regido bajo una estrategia ambiental preventiva e integrada al proceso que no se enfoque en metodologías de control, tratamiento o disposición final de desechos que únicamente demandan recursos, sino más bien, en el punto generador de los mismos.

Basándose en lo anterior, al procurar la prevención de la contaminación y tomando en cuenta la reutilización de los recursos o bien el reciclaje en el lugar, es necesario de la reutilización de toda, o en su mayoría, de la energía almacenada en cualquiera de las salidas o desecho de la planta.

Se han realizado estudios sobre la capacidad de la materia orgánica, generalmente sobre desechos orgánicos, para su uso como biomasa combustible o bien como masa con alto potencial de producción de biogás. Por tanto la reutilización de este recurso para la extracción de biogás puede disminuir significativamente el costo de producción mediante el decremento de uso de combustibles (p. Ej., Propano) o bien mediante la generación de energía eléctrica a partir de este biocombustible.

Este trabajo pretende el análisis del potencial de generación de biogás en el sector productor de cerdos en Guatemala para determinar la posibilidad de la generación de energía eléctrica para reducción de costos de producción a partir de la estimación de emisiones de metano con la metodología del panel intergubernamental del cambio climático (IPCC) para la elaboración de inventarios de emisiones de gases efecto invernadero.

IV. Objetivos

A. General

1. Estimar la producción de combustible gaseoso a partir de la digestión anaeróbica tanto en reactores continuos como semicontinuos.

B. Específicos

1. Diseño de sistemas de reacción de biogás en granja de cerdos
2. Analizar la tecnología actualmente utilizada en Guatemala y su potencial de generación de biogás.
3. Comparar tecnologías de digestión continua y semicontinua utilizando biogás como fuente de energía térmica y eléctrica.

V. Metodología

Para la realización de este trabajo se tiene contempladas dos etapas las cuales constan del levantamiento de información estadística en granjas productoras representativas y agremiadas en el sector porcino a nivel nacional, y la selección de una granja específica para la realización de proyecciones y cálculos para la implementación de metodologías IPCC para poder establecer la capacidad de generación de energía eléctrica a partir de la cerdaza producida.

Para el desarrollo de la primera etapa se llevaron a cabo diferentes visitas de campo a granjas representativas del sector porcino en Guatemala, así como el contacto con la Asociación de Porcicultores de Guatemala (APOGUA) para recaudar información estadística sobre sus agremiados. A partir de la calidad y cantidad de información recopilada se recurrió al estudio de únicamente las granjas dispuestas a la participación para la elaboración del presente trabajo y a los valores teóricos propuestos por la metodología del IPCC.

Los cálculos y la implementación de la metodología propuesta se llevaron a cabo con la información recopilada para su posterior análisis de resultados. Con los resultados obtenidos se realizaron cálculos para poder cumplir con los objetivos propuestos para este trabajo. Los factores de conversión de las unidades de volumen hacia energía producida serán a partir de especificaciones de proveedores de equipos de generación de energía.

VI. Cronograma

Actividad/Semana del año	Julio					Agosto					Septiembre					Octubre				Noviembre			
	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
1.- Establecimiento de límites del estudio																							
2.- Recopilación de información estadística																							
3.- Análisis de información																							
4.- Realización de cálculos																							
5.- Redacción de informe																							
6.- Entrega y revisión de informe																							

VII. Resultados

A. Cuantificación de combustible extraído según digestor anaeróbico

Volumen de biogás obtenido a partir de un digestor basado en sólidos volátiles, Demanda Química de Oxígeno y una combinación de ambas con metodologías del IPCC, Agencia Consultora

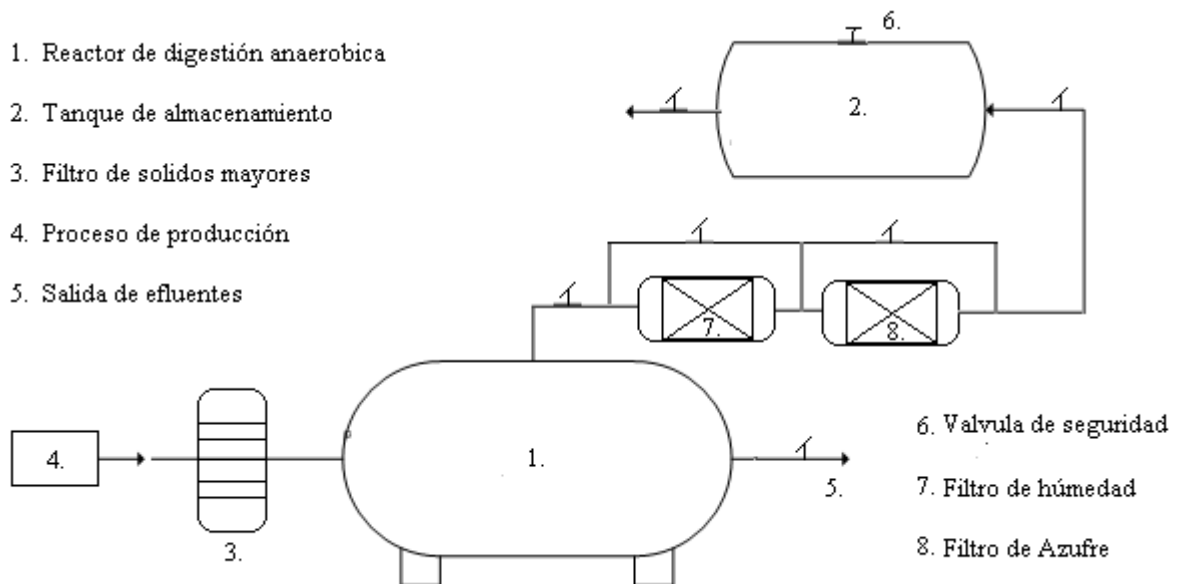
Tabla 11 Volumen de combustible capturado

Digestor	Calculado por	Volumen (m ³ biogás /día)	25% pérdidas
Laguna cubierta	IPCC	191.31	143.48
Laguna cubierta	Agencia consultora	154.27	115.70
Bolsa tipo salchicha	-	16.39	12.29

B. Diseño de digestor continuo de laguna cubierta:

1. Diagrama de flujo de proceso

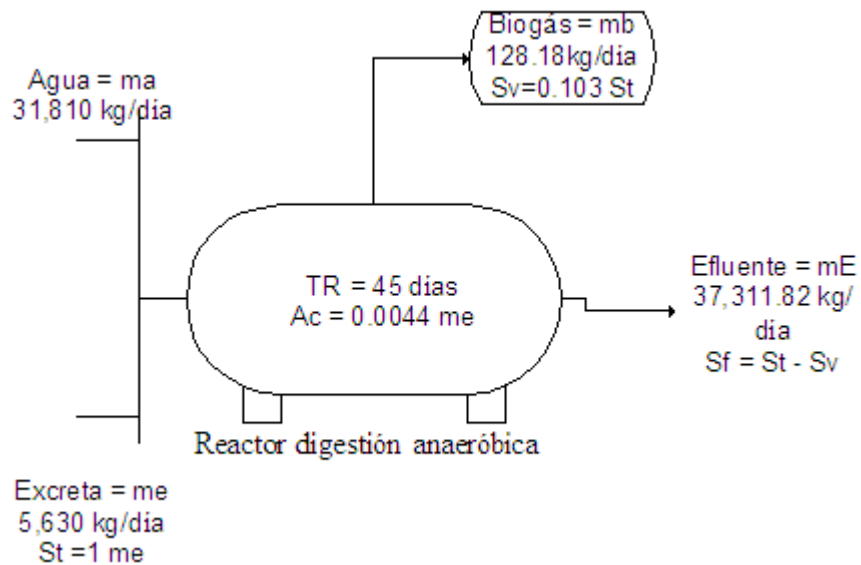
Ilustración 5 Diagrama de flujo de proceso



2. Diagramas de balance de masa

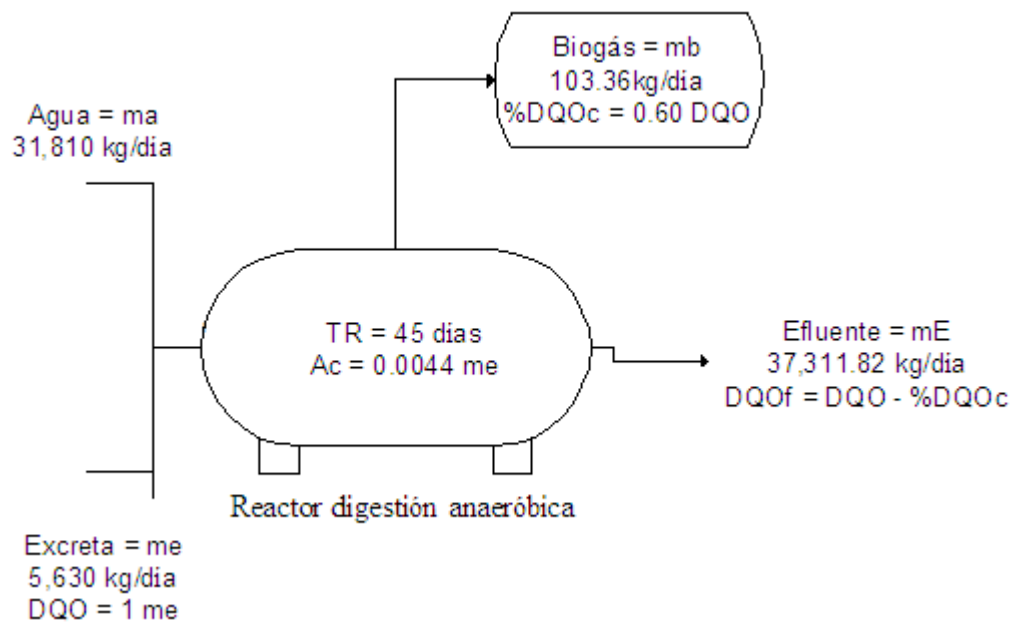
2.1 Obtenido a través de metodología del IPCC

Ilustración 6 Balance de masa del sistema mediante metodología de IPCC



2.2 Obtenido a través de metodología de agencia consultora

Ilustración 7 Balance de masa del sistema mediante metodología de %DQO



2.3 Diseño de equipo

Tabla 12 Especificaciones para reactor anaerobio tipo laguna cubierta

	IPCC	Agencia consultora	
Largo	35.00	34.00	m
Ancho	12.00	11.00	m
Profundidad	4.00	4.00	m
Volumen	1,680.00	1496.00	m ³
Capacidad de producción	191.31	154.27	m ³ biogas / día
Tipo de membrana	Ethylene Propylene Diene Monomer EPDM		
Tiempo de retención	45	45	día

Tabla 13 Especificaciones para reactor anaerobio de bolsa tipo salchicha

Largo	22	m
Diámetro	1.9	m
Volumen	65	m ³
Capacidad de producción	12.29	m ³ biogás / día
Material de membrana	HDPE	
Espesor de membrana	0.050	Pulg (1.27x10 ⁻³ m)
Tiempo de retención	10 a 12	día

Tabla 14 Especificaciones para criadoras en uso de calefacción de lechones

Consumo biogás	0.090	m ³ /día
Potencia equivalente	0.175	kWh
Marca	Alosan	
Proveedor	Comercializadora salvadoreña	
Precio en Guatemala	98.00	US\$

Tabla 15 Especificaciones para generadores eléctricos a partir de biogás

Consumo de biogás	6.40	m ³ /h
Potencia nominal	10	kW
Marca	Gruttner	
Proveedor	Aqualimpia	
Precio en Guatemala	9000	US\$

2.4 Diagrama de equipo

2.4.1 Planos para diseño de digestor continuo laguna cubierta

Nota: Las dimensiones de los gráficos, largo, ancho y profundidad pueden apreciarse en la Tabla 16

Ilustración 8 Dimensiones de digestor laguna cubierta

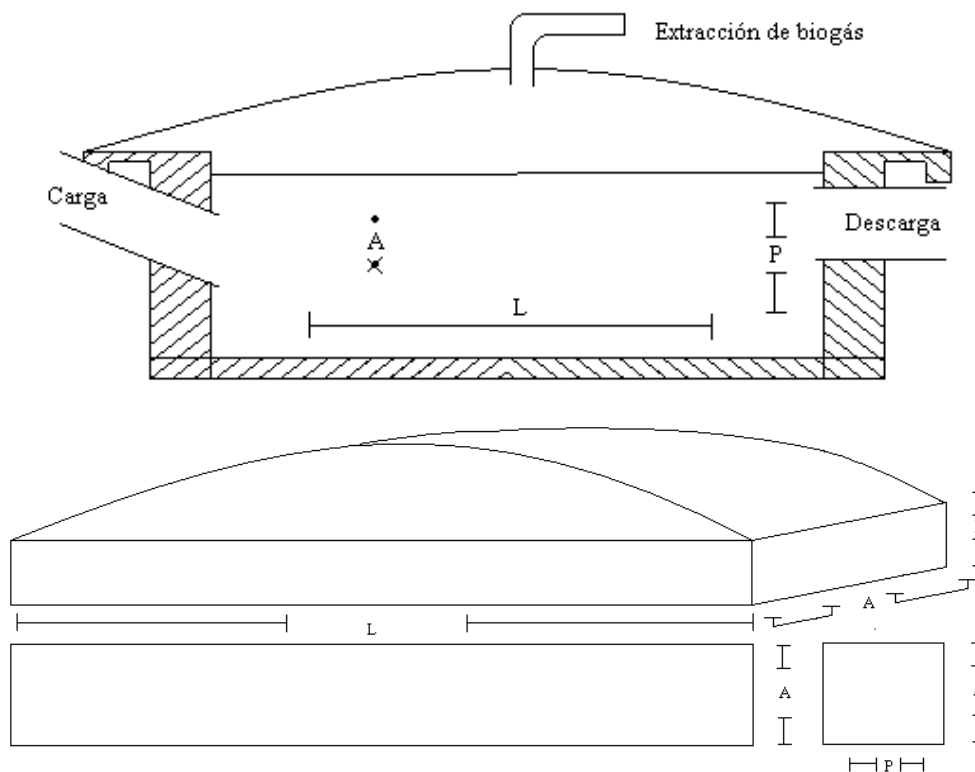
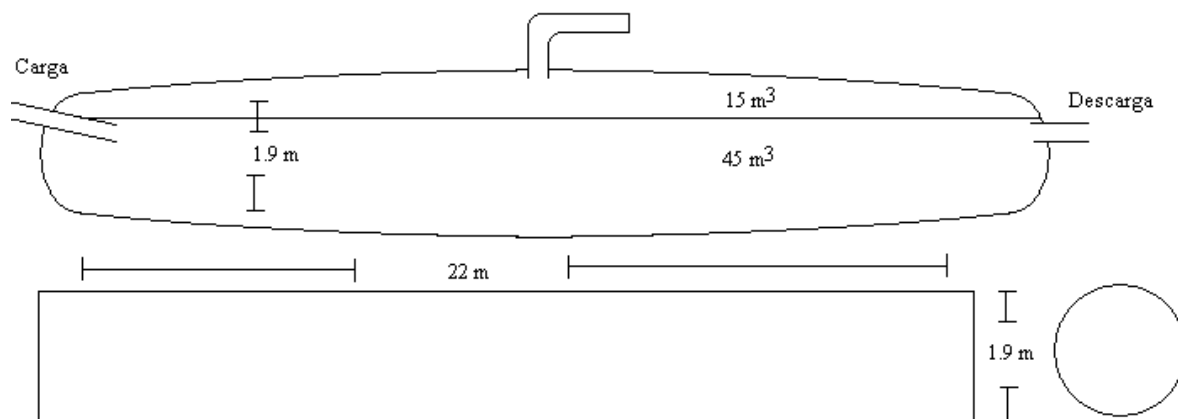


Tabla 16 Especificaciones de digestor laguna cubierta con las diferentes metodologías

Dimensión	Simb.	Retención Hidráulica	Sólidos Volátiles
Largo	L	12.0 m	11.0 m
Ancho	A	35.0 m	34.0 m
Profundidad	P	4.0 m	4.0 m

2.4.2 Planos para diseño de digester semicontinuo de bolsa tipo salchicha

Ilustración 9 Dimensiones de digester de bolsa tipo salchicha**C. Costos**

Para cuantificar los costos de instalación del digester se determinó el volumen de tierra a movilizar utilizando el coeficiente de expansión al 40% debido a las características del suelo. El costo de la membrana de EPDM es de \$10.00 /m² calculando un área total del 175% del área superficial de la laguna. La bolsa del digester tipo salchicha es de HDPE. Para el mantenimiento se trabajó un valor presente de anualidades de Q 7,500.00 por concepto de drenaje de sólidos sedimentables en digestores laguna cubierta, estimando un 5% de la inversión inicial por concepto de reparaciones a los años 5 y 10. Los digestores de bolsa tipo salchicha son obsoletos luego de 5 años.

Tabla 17 Datos de costo de instalación y montaje

Digester		Laguna	Membrana	Instalación	Mantenimiento	Total
Laguna cubierta	T.R.	Q. 82,320.00	Q. 61,005.00	Q. 24,402.00	Q437.50/mes	Q. 167,727.00
Laguna cubierta	S.V.	Q. 73,304.00	Q. 61,005.00	Q. 24,402.00	Q437.50/mes	Q. 158,711.00
Bolsa tipo salchicha	-	Q. 2,050.00	Q. 1,700.00	Q. 6,250.00	Q437.50/mes	Q. 10,000.00

T.R. Tiempo retención

S.V. Sólidos volátiles

Tabla 18 Inversión inicial dependiendo el uso de biogás y tecnología

	Criadoras		Generadores	
	Bolsa	Laguna	Bolsa	Laguna
Inversión Q.	17,681.40	255,129.55	210,900.10	239,611.10
	1 Digestor	1 Digestor	13 Digestores	1 Digestor
Precio incluye	9 Criadoras	107 Criadoras	1 Generador	1 Generador

D. Comparación económica para uso de biogás en conversión de energía térmica/eléctrica

Para la comparación económica se trabajó con ahorros obtenidos en la sustitución de kWh/día de energía eléctrica por energía de combustión de biogás tomando en cuenta Q. 1.20/kWh. Se compararon tiempos de retorno variando $\pm 20\%$ los precios de instalación y ahorros obtenidos. Se estima un consumo de 0.09 m³/h por criadora y la relación 0.556 m³ biogás/kWh

Tabla 19 Inversión y tiempo de recuperación para uno de combustible para generación de energía térmica.

		Criadoras		Generadores	
		Bolsa	Laguna	Bolsa	Laguna
Inversión	Q.	17,681.40	255,129.55	210,900.10	239,611.10
ahorro económico	Q./mes	860.32	107,98.88	8,640.00	8,494.99
Impacto ambiental	Ton CO2 E/mes	5.19	65.12	66.21	65.10
TR	mes	20.55	23.63	24.14	28.21
TR optimista	mes	13.70	15,75	16.09	18.80
TR pesimista	mes	30.83	35.44	36.20	41.60

VIII. Discusión

A partir de las metodologías propuestas por la IPCC y las variantes realizadas por agencias consultoras internacionales se estudió la posibilidad de construcción de un digestor anaeróbico continuo de laguna cubierta en comparación con un semicontinuo de bolsa tipo salchicha en una granja de cerdos tamaño mediano ubicada en el municipio de Cuilapa del departamento de Santa Rosa para la estimación de la producción de combustible gaseoso a partir de las excretas del ganado de la granja. La granja cuenta con una población total promedio de 1632 cabezas de cerdo al año divididas en las diferentes etapas de crianza del ganado, un consumo promedio de 31.81 m³ agua al día y la generación de 5.63 m³ de excretas diarias. La temperatura promedio anual de la región donde se localiza la granja de 28C disminuyendo hasta 20C en la época más fría del año.

Para el dimensionamiento del digestor se utilizó la metodología basada en los promedios de sólidos volátiles (Sv) contenidos en los efluentes diarios de la granja. Como parte de las variables de la metodología se asumió un 80% de eficiencia en la recolección de estiércol en los patios de engorde y se determinó un total de 468.42 kg (Sv)/día para la granja. A través de la relación de 0.32 kg (Sv)/m³ se determinó un volumen aproximado de 1496 m³ para garantizar la volatilización de la mayoría de materia orgánica capaz de producir biogás. Para cumplir con las especificaciones de la agencia consultora, es necesario la construcción de una laguna de 11 m de ancho, 34 m de largo y 4 m de profundidad ya que de esta manera se proponen las mejores condiciones para la digestión anaeróbica.

Estas especificaciones son respaldadas al estimar el tiempo de retención hidráulica necesario para garantizar un alto porcentaje de conversión de materia orgánica en biogás según la temperatura promedio de la zona donde se plantea la instalación del digestor. El tiempo estimado de retención hidráulica a temperatura promedio anual de 28C según las directrices del IPCC es de 45 días. Para poder almacenar la descarga de agua diaria a esta laguna, es necesario de 1680m³ que propone dimensiones de 12 m de largo, 35 de largo y 4 de profundidad corroborando las dimensiones anteriormente propuestas mediante el cálculo de los sólidos volátiles. Los cálculos realizados para esta tesis se basaron en el volumen propuesto por el tiempo de retención hidráulica ya que al poder almacenar un mayor volumen garantiza un mayor tiempo de estadía de las excretas dentro de la laguna mejorando la conversión de la materia orgánica en biogás.

El costo para la realización de una laguna con las anteriores dimensiones es aproximadamente Q73,500.00 según cotización realizada por una empresa que se dedica a la remoción de suelo, OD consultores S.A., donde se estima un precio de Q 35.00 por m³ de tierra movida y una relación de expansión de suelo, debido a sus características físicas, del 40%. El costo total incluye el concepto de realización de laguna y extracción de tierra de la propiedad excluyendo precios de ge membrana necesaria para la captura de biogás y el equipo técnico de instalación. Este costo es alto

comparado con la disponibilidad económica del sector y su voluntad de inversión en un nuevo sistema, deja la opción de captura de biogás a partir de digestores de laguna cubierta en una posición de inviabilidad, más que económica organizacional dentro de una granja de crianza de cerdos común dentro de la industria guatemalteca. La inversión inicial para un digestor de laguna cubierta es de aproximadamente Q.167, 727.00 incluyendo costos de instalación y membrana EPDM con un precio base de US\$10.00/m² asumiendo una cobertura de la membrana de 175% del área superficial de la laguna. De igual manera se realizaron todos los cálculos de producción de biogás para digestores de laguna cubierta en comparación de los digestores semicontinuos de bolsa tipo salchicha.

Para los digestores de laguna cubierta se estimó una producción total de biogás en la granja a partir de las metodologías del IPCC (ecuación 1) de 126.26 m³ metano/día equivalente a 191.31 m³ de biogás/día. Este dato se refuerza con la metodología proporcionada por agencia consultora internacional (ecuación 2) que propone una extracción de 101.82 m³ metano/día equivalentes a 154.27 m³ biogás/día, 19% menos que los datos obtenidos por la metodología del IPCC. Esta variación está relacionada a la asunción de pérdidas en el manejo del 20% de excreta al día. Debido a que ambas metodologías son teóricas y pueden verse afectadas por factores climáticos aumentando o disminuyendo el volumen de producción, es recomendable tomar en cuenta, para la realización de cualquier estimación, la menor cantidad de biogás producida para garantizar un flujo continuo en el aprovechamiento de este, evitando así el corte de suministro de biogás al proceso.

Los volúmenes propuestos de producción de biogás son únicamente la estimación del potencial de producción de la granja a partir de un digestor continuo de laguna cubierta. Debido al alto costo de montaje de una laguna de las dimensiones propuestas se planteó la utilización de digestores semicontinuos de bolsa tipo salchicha para la extracción de un porcentaje de biogás del potencial total de la granja. El costo promedio de un digestor semicontinuo de bolsa tipo salchicha es aproximadamente de Q.10, 000.00 que incluye el costo de infraestructura, costos varios de instalación, incluyendo Q 1,700.00 del costo de la bolsa de HDPE de 50 m de largo.

Este tipo de tecnología es ideal en situaciones de escasez de terreno, se presenta como mejor opción económica y es la tecnología mayormente utilizada en Guatemala para la producción de biogás. Se realizó el contacto con la empresa BIOTECTURA Agropecuaria la cual es responsable de la instalación de más de cincuenta proyectos de captura de metano en granjas porcinas, avícolas, lecheras y demás empresas agroindustriales en todo el territorio nacional y extranjero. BIOTECTURA Agropecuaria utiliza tecnologías semicontinuas de flujo pistón en biodigestores de bolsa tipo salchicha con las especificaciones propuestas en la Ilustración 8.

La bolsa es de polímetro HDPE de aproximadamente 50 mpulg de espesor, se presenta como principal proveedor industrias oleofinas, a nivel nacional, que es una empresa dedicada a la producción de películas de diferentes polímetros. Las presentaciones de las películas de HDPE son de 50 m de largo, lo que debido a seguridad y a garantizar un mayor tiempo de vida al digestor se instala a doble capa dejando un largo total de 22 m sacrificando 3 m para la correcta instalación. Posee un volumen total de 60 – 65 m³ de almacenamiento para biogás o bien para la

distribución 75/25 del volumen en la extracción a partir de 75% de excretas un 25% del volumen total de la bolsa. El tiempo de retención hidráulica para este tipo de digestor es de aproximadamente diez días dependiendo la carga realizada por el propietario. Es necesario mencionar que la producción de biogás dependerá de las condiciones climáticas presentes en la localización de la granja. Ya que a temperaturas frías la capacidad de producción de biogás disminuye, aumentando en altas temperaturas.

Se obtuvo un valor promedio de 0.08 kg Sv /kg de excreta para la granja y un DQO de 0.37 kg/día aportado por cada animal. Debido a que el digestor tiene la capacidad de 45m³ destinado para la excreta de cerdo, la carga estimada para un tiempo aproximado de diez días de retención hidráulica es de 181.41 kg de excreta /día sumado a 330 gal de agua extraída de la laguna de oxidación al día. A partir de estos datos de carga se estima una producción diaria de 10.82 m³ de metano equivalentes a 16.39 m³ de biogás al día. Para esta estimación fue necesario utilizar ambas metodologías por separado para estimar la conversión de la fase líquida y la fase sólida de los desechos en biogás útil la producción de energía. En la visita de campo a un digestor instalado se pudo estimar que la producción diaria de biogás esta aproximadamente en un rango de 15-20 m³ para un digestor con las mismas dimensiones que los digestores anteriormente especificados, Ilustración 8.

Dependiendo de la demanda de combustible de la granja es necesaria la instalación de varios digestores. El volumen de biogás capturado en un digestor es suficiente para mantener 9 criadoras de 0.175 kWh durante 16 h en el día equivalentes a 754 kWh/mes (Q905.00/mes) en ahorro de consumo energético asumiendo pérdidas del 25% de biogás en su transporte. Este resultado propone un impacto positivo al ambiente ya que se quema el metano que posee 21 veces mayor impacto que el CO₂ a la atmósfera. La quema del metano de un digestor evita emitir el equivalente a 5.6 ton CO₂/mes. La sustitución de estas criadoras son a partir de criadoras eléctricas por tanto es necesario incluir dentro de los resultados ambientales el impacto generado para la producción de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles.

Un digestor de laguna cubierta tiene la capacidad de alimentar 107 criadoras con las mismas especificaciones mencionadas. Los ahorros equivalentes obtenidos son de Q.10,798.88/mes evitando la liberación de 65.15 ton de CO₂ eq/mes. Es necesario tomar en cuenta que técnicamente no es viable la existencia de 107 criadoras de biogás en una granja mediana de cerdos. Por lo que se hace mención a la realización de un estudio preliminar para el uso y la demanda de biogás dentro de la granja para uso como combustible en la generación de calor para los diferentes procesos.

Otra de las alternativas para el uso de biogás es la generación de energía eléctrica. Para esto es necesario realizar el análisis anteriormente descrito así como un análisis energético para determinar la demanda instalada de la granja. Dependiendo de la capacidad técnica y la disponibilidad económica existe la posibilidad de generación eléctrica para abastecer la demanda de la granja y la posibilidad de comercializar la energía desarrollada a los alrededores. Como base de cálculo se estableció 12.29 m³ de biogás al día capturado en un digestor semicontinuo de bolsa tipo salchicha asumiendo pérdidas del 25% por transporte. Un generador de 10 kW mantiene una demanda de 6.54 m³ de biogás/h.

Se propone una generación constante al día lo que demanda una instalación de 13 digestores de bolsa tipo salchicha valorados en Q.130, 000.00. El precio de este generador es de Q. 80,900.10 lo que incrementa a Q.210, 900.10. la inversión para este tipo de proyectos. La energía generada se asume servirá para las luminarias de la granja y el uso de los diferentes motores dentro del proceso, se determinaron ahorros de Q. 8,640.00/mes por concepto de facturación eléctrica ya que se cubre con la demanda de energía de la granja. El tiempo de recuperación será de 24.14 meses con extremos de 16.09 meses para un escenario positivo y 36.20 para un escenario pesimista. Su impacto ambiental se verá en la reducción de emisión de 156.86 m³ de biogás equivalentes a 66.21 ton CO₂/mes.

Un digestor de laguna cubierta en cambio produce un total de 154.27 m³ de biogás día con lo cual se abastece un alto porcentaje de la demanda diaria de biogás por un generador de 10 kW. La inversión total para el sistema digestor-generador es de Q. 239,211.04 proporcionando ahorros de Q. 8,484.99/mes. Este ahorro es menor que el proporcionado por la batería de digestores de bolsa debido a que el volumen de biogás es ligeramente menor al especificado por el generador. El tiempo de retorno para este sistema es de 28.21 meses teniendo como límites una variación de $\pm 20\%$ en los costos de instalación y ahorros mensuales. Su impacto ambiental es de la reducción de 65.10 ton CO₂ Eq/mes liberadas al ambiente por conversión de metano a CO₂ excluyendo las emisiones por generación eléctrica de combustible fósil.

Existen otras alternativas para la generación de energía eléctrica a partir de biogás. Un ejemplo de ellas son las modificaciones realizadas a un motor diesel acoplado a un generador eléctrico. Para esto es necesario la realización de ajustes en el motor diesel para el que biogás ingrese al interior del filtro de aire del motor, de tal manera que el motor al aspirar el aire que requiere para la combustión aspira una mezcla biogás aire. Este mecanismo por tanto disminuye el consumo de diesel para la generación de energía con lo que se presentan ahorros para la generación eléctrica.

IX. Conclusiones

Dependiendo de la tecnología utilizada, la granja estudiada tiene el potencial de producción de 154.27 m³ de biogás al día a partir de digestores de laguna cubierta, dejando así la posibilidad de uso del combustible para la generación de energía térmica y eléctrica. Un digestor de bolsa tipo salchicha puede producir aproximadamente 12.29 m³ biogás / día lo que requiere de instalación de una batería de 13 digestores para lograr generar el volumen necesario de biogás para alimentación de generadores.

Se determinó que las granjas porcinas en Guatemala cuentan con el potencial necesario para la generación de energía eléctrica a partir de la generación de biogás mediante la utilización de digestores. Una granja mediana, la propuesta como caso de estudio, está en la facultad de producir 240 kWh/día suficientes para el uso de la luminaria y algunos motores dentro de la granja.

Para la generación de energía térmica y su uso dentro de los procesos productivos de la crianza de cerdo se presento como mejor opción el digestor de bolsa tipo salchicha en comparación al de laguna cubierta ya que presenta un menor costo de inversión incluso instalando más de un digestor de bolsa. Esto debido a que dentro del proceso de producción de porcicultura los requerimientos del combustible se adaptan de mejor manera a los volúmenes de producción de digestores tipo salchicha que a los de laguna cubierta.

Dependiendo de la disponibilidad económica del inversionista y con base en el análisis de costos llevados a cabo se estableció que es conveniente la implementación de un biodigestor de laguna cubierta en comparación con una batería de digestores de bolsa tipo salchicha para la generación de energía eléctrica debido a que la laguna cubierta tiene más tiempo de vida que uno de bolsa y su área de construcción en comparación con la batería es menor. Las condiciones de operación son más sencillas para un digestor de laguna cubierta.

X. Recomendaciones

Se sugiere que es conveniente la implementación de un biodigestor tipo salchicha con las especificaciones trabajadas en Guatemala en la granja de estudio para uso de biogás como combustible para energía térmica dado que le ayudará a disminuir sus costos de producción y a disminuir su impacto ambiental negativo.

Si el fin primordial de la granja es la generación de energía eléctrica a partir de excretas de cerdos se recomienda la instalación de un digestor continuo de laguna cubierta para poder satisfacer la demanda requerida por un generador eléctrico a base de biogás.

Se recomienda estructurar adecuadamente el sistema de recolección de aguas de lavado y de excretas para facilitar el proceso de recolección y transporte de los desechos hasta el área de los biodigestor.

Las granjas porcinas deberían de incluir dentro de sus sistemas productivos el manejo adecuado de las excretas generadas. Dicho manejo debería de incluirse desde el momento en que se planea la inversión en este tipo de actividad y no debería de representar un gasto adicional sino más bien una alternativa que a la larga, les permitirá reducir costos además de disminuir el impacto negativo de la actividad sobre el medio ambiente.

XI. Bibliografía

1. Asociación de Porcicultores de Guatemala (APOGUA). *Guía práctica para la construcción de un biodigestor*. Guatemala, 2008
2. Centro Guatemalteco de Producción más Limpia *FODA Porcino*. Con el apoyo de programa ELE para CAFTA-DR/USAID
3. Food and Agriculture Organization for the United Nation (FAO/TCP/NEP) *Support Development of National Biogas Programme*. Nepal, Septiembre 1996
4. Instituto Nacional de Estadística INE. *Censo Agropecuario 2008*. Guatemala 2008
5. IPCC. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI*. Volumen 4 capítulo 10 Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol. 2006
6. IPCC web – Panel Intergubernamental de Cambio Climático
www.ipcc.int/
7. PA Consulting Grup. *Manejo de los residuos en el contexto de la reducción de emisiones de metano*. Informes preliminares. San Salvador, Mayo 2009.

XII. Apéndice

A. Diagramas de bloques de procesos

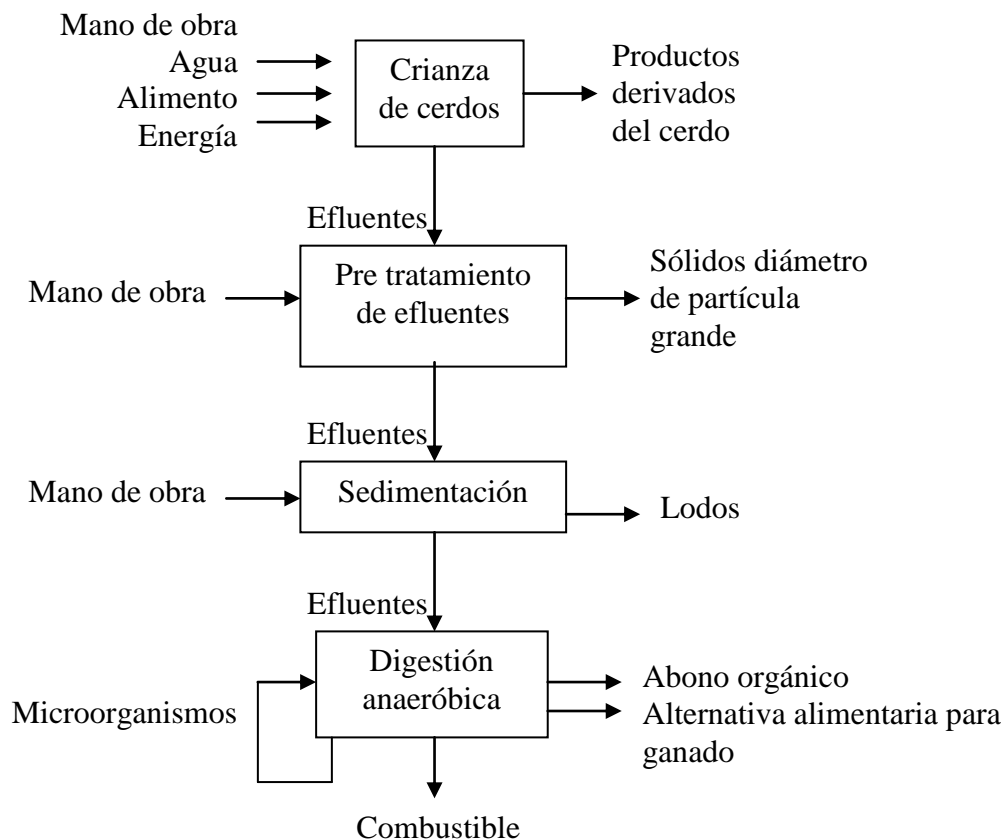


Ilustración 10 Flujo de proceso

B. Datos originales

Tabla 20 Inventario de la población de granja piloto

Etapas de producción del animal	H (unidades)	peso promedio cerdos (kg)
Cerdas lactante	40	192.0
Cerdas en gestación	168	200.0
reemplazos	34	125.0
Destete	360	12.5
Engorda	1028	70.0
Sementales	2	225.0

Tabla 21 Caracterización de etapas de desarrollo para granja

Etapas de producción del animal	Cantidad excreta (kg/día animal)	Sv por etapa (kg_{sv}/día C)	DQO por etapa (kg/día C)
Cerdas lactante	12.0	1.00	1.10
Cerdas en gestación	5.0	0.45	0.47
reemplazos	12.0	1.00	1.10
Destete	1.3	0.11	0.12
Engorda	4.7	0.38	0.39
Sementales	3.8	0.34	0.27

Tabla 22 Factores de conversión

	Factor
MCF	75.0 %
Recuperación estiércol fresco	80.0 %
Bo	0.29 m ³ CH ₄ /kg Vs
densidad	0.67 kg/ m ³
Relación DOQ destruido	60.0 %
Relación CH ₄ /biogás	66.0 %
Producción de biogás	0.349 m ³ CH ₄ /kg Vs

Tabla 23 Especificaciones para generación de energía térmica

Volumen biogás	12.29 m ³ /día
Consumo de criadora	0.09 m ³ /día
Tiempo de operación	16 h/día
Número de criadoras	9 u

C. Cálculo de muestra

- 1. Producción de estiércol en granja:** Utilizado para la cuantificación total de excretas diarias producidas en la granja. A partir de este dato, si se desconoce la cantidad de agua utilizada, puede determinarse de forma indirecta para la granja el consumo de agua al día.

$$Ex = \sum_{i=\text{destete}}^{\text{Gestación}} \left[H_i \cdot \bar{x}_{\text{estiercol}H_i} \right] \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde H = población de etapa en la granja.

$\bar{x}_{\text{estiercol}H_i}$ = Promedio de excreción por animal en cada etapa.

Ejemplo:

Censo de animales	Población	kg/día
Cerdas lactante	40	12
Cerdas en gestación	168	5
reemplazos	34	12
Destete	360	1,3
Engorda	1028	4,7
Sementales	2	3,8
	EX=	7035.02

De ecuación 3 tenemos

$$Ex = (40 \cdot 12) + (168 \cdot 5) + (34 \cdot 12) + (360 \cdot 1.3) + (1028 \cdot 4.7) + (2 \cdot 3.8)$$

$$Ex = 7035.02 \text{ kg/día}$$

- 2. Volumen de excretas recolectadas al día:** Este dato es necesario para estimar la cantidad de excretas potencialmente útiles para la producción de biogás tomando en cuenta el grado de tecnificación del proceso.

$$V_{ex} = Ex \left| \frac{1.0L}{1.0kg} \right| \left| \frac{1m^3}{1000L} \right| \cdot \% \text{recuperación} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde % recuperación = Estimado de la relación del excremento recuperado y el total de excremento producido

Ejemplo:

$$V_{ex} = 7035.02 \frac{kg}{día} \left| \frac{1.0L}{1.0kg} \right| \left| \frac{1m^3}{1000L} \right| \cdot 80\% = 5.63 \frac{m^3}{día}$$

- 3. Estimación de volumen de laguna por método de retención hidráulica:** Esta estimación es realizada mediante el total de excretas obtenidos diariamente y el tiempo estimado para un alto porcentaje de conversión de materia orgánica a biogás.

$$V_{laguna} = T_R \bullet V_{efluente} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde T_R = tiempo de retención hidráulica en función de la temperatura ambiente propuesto en metodología del IPCC.

$V_{efluente}$ = volumen promedio de descargas de agua en la granja

Ejemplo:

$$V_{laguna} = (45 \text{ día}) \left(37.43 \frac{m^3}{\text{día}} \right) = 1680 m^3$$

- 4. Dimensionamiento de laguna:** Según agencia consultora internacional, existe una relación específica para la realización de lagunas de digestión anaeróbica. A continuación se presentan las relaciones:

$$Ancho = \sqrt[3]{V_{laguna}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$Largo = 3 \bullet Ancho \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$Profundidad = \frac{V_{laguna}}{Ancho \bullet Largo} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Ejemplo:

A partir de volumen de laguna propuesto por metodología de retención hidráulica:

$$Ancho = \sqrt[3]{1680 m^3} = 12 m$$

$$Largo = 3 \bullet 12 m = 36 m$$

$$Profundidad = \frac{1680 m^3}{(12 \bullet 36) m^2} = 4 m$$

5. Producción de sólidos volátiles en granja al día: Al igual que la determinación de excretas diarias producidas, los sólidos volátiles son la sumatoria de la producción promedio de sólidos volátiles por animal, para la población de la granja.

$$Sv = \sum_{i=destete}^{Gestación} \left[H_i \cdot \bar{x}_{SvH_i} \right] \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde H = población de etapa en la granja.

\bar{x}_{SvH_i} = Promedio de excreción por animal en cada etapa

Ejemplo:

Censo de animales	Población	kg/día
Cerdas lactante	40	1
Cerdas en gestación	168	0,45
reemplazos	34	1
Destete	360	0,11
Engorda	1028	0,38
Sementales	2	0,34
	Sv =	580.52

De ecuación 9 tenemos

$$Ex = (40 \cdot 1.0) + (168 \cdot 0.45) + (34 \cdot 1.0) + (360 \cdot 0.11) + (1028 \cdot 0.38) + (2 \cdot 0.34)$$

$$Ex = 580.52 \text{ kg}(Sv) / \text{día}$$

6. Estimación de volumen de laguna por método de conversión de sólidos volátiles: Para obtener este dato es necesario establecer una relación de excreta recolectada en función de la excreta producida. Se estimo un 80% de recolección de estiércol.

$$V_{laguna} = (Sv \cdot \%recuperación) \left| \frac{1.0m^3}{0.3203 \text{ kg}(Sv)} \right| \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde % recuperación = Estimado de la relación del excremento recuperado y el total de excremento producido

Ejemplo:

$$V_{laguna} = (580.52 \text{ kg}(Sv) \cdot 80\%) \left| \frac{1.0m^3}{0.3203 \text{ kg}(Sv)} \right| = 1496 m^3$$

- 7. Costo de elaboración de laguna:** Para estimar el costo de elaboración de una laguna, es necesario tomar en cuenta la metodología que proponga un mayor volumen para la conversión de materia orgánica a biogás. Esto para garantizar un mayor grado de conversión en el momento de ejecución del proyecto.

$$\text{Costo} = (V_{laguna} \cdot \delta) \cdot P(Q.) \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde: δ = al coeficiente de expansión del terreno

$P(Q.)$ = precio por extracción de metro cúbico de terreno (incluye transporte)

Ejemplo

$$\text{Costo} = (1680 m^3 \cdot 40\%) \cdot \left(\frac{Q.35.00}{m^3} \right)$$

- 8. Estimación de captura de metano por etapa de desarrollo en granja a partir de metodología del IPCC:**

Mediante ecuación 1 se trabajo por separado para cada etapa de desarrollo:

$$CH_4 = (Vs \cdot n) \cdot (Bo \cdot f) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Ejemplo: Obtenido a partir de datos para etapa de engorde en granja

$$CH_4 = \left[\left(0.38 \frac{kg(Sv)}{animal \cdot día} \right) (1028 animales) \right] \cdot \left(0.29 \frac{m^3 CH_4}{kg(Sv)} \right) (75\%) = 84.96 \frac{m^3 CH_4}{día}$$

- 9. Demanda química de oxígeno por etapa de desarrollo en granja:** Necesario para la cuantificación total de captura de metano a través de la metodología de agencia consultora:

$$DQO = H \cdot DQO_i \cdot \%DQO_{destruido} \cdot \%Estiercol_{fresco} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde DQO = Dato promedio para etapa

DQO destruido = %DQO transformado a biogás

%Estiércol = % del estiércol fresco recogido

Ejemplo Obtenido a partir de datos para etapa de engorde en granja

$$DQO = (1028 animales) \cdot \left| 0.392 \frac{kgDQO}{día \cdot animal} \right| \cdot (60\%) \cdot (80\%) = 193.43 \frac{kgDQO}{día}$$

10. Estimación de captura de metano por etapa de desarrollo en granja a partir de metodología de agencia consultora internacional: Es necesario establecer la relación de producción de metano de 0.349 m^3 de metano/kg DQO

$$V_{CH_4} = DQO_{etapa} \cdot \frac{0.349 \text{ m}^3 CH_4}{1 \text{ kg DQO}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Ejemplo

$$V_{CH_4} = 193.43 \frac{\text{kg DQO}}{\text{día}} \cdot \frac{0.349 \text{ m}^3 CH_4}{1 \text{ kg DQO}} = 67.51 \text{ m}^3 CH_4$$

11. Estimación de captura de metano total en granja: No importando la metodología escogida, la estimación de captura de metano para el total de la granja de forma similar

$$V_{CH_4} = \sum_{i=\text{destete}}^{\text{Maduridad}} V_{CH_4 \text{ por etapa}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Ejemplo utilizando la metodología del IPCC en la estimación de captura de metano por etapa

$$\begin{aligned} V_{CH_4} &= (V_{c1} + V_{c2} + V_r + V_d + V_e + V_s) \\ V_{CH_4} &= 8.70 \text{ m}^3 + 16.44 \text{ m}^3 + 7.40 \text{ m}^3 + 8.61 \text{ m}^3 + 84.96 \text{ m}^3 + 0.15 \text{ m}^3 \\ V_{CH_4} &= 126.26 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

12. Relación de producción de biogás a partir de captura de metano: Se estima que un 66% del biogás es metano, por tanto la relación para extracción de biogás:

$$V_{biogás} = V_{CH_4} \cdot \left| \frac{1 \text{ m}^3 CH_4}{0.66 \text{ m}^3 biogás} \right| \quad (\text{Ecuación 15})$$

Como ejemplo se presenta la conversión del total de metano extraído mediante metodología de agencia consultora internacional

$$V_{biogás} = 101.82 \text{ m}^3 CH_4 \cdot \left| \frac{1 \text{ m}^3 CH_4}{0.66 \text{ m}^3 biogás} \right| = 154.27 \text{ m}^3 biogás$$

13. Estimación del aporte de DQO promedio por animal en granja: A partir del promedio ponderado entre los valores de DQO contenidos en las excretas de cerdos por etapa y la fracción de la población de cada etapa en relación a la población total puede obtenerse la relación $DQO_{promedio}$ contenido del conjunto de las excretas de la granja. Esto es la caracterización de las excretas de la granja.

$$DQO_{prom} = \sum_{i=destete}^{maternidad} x_i \cdot DQO_i \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde X_i = La fracción de la población en la etapa del desarrollo y la población total de la granja

DQO_i = el DQO por animal en cada una de las etapas del desarrollo de la granja

Ejemplo:

Censo de animales	Unidades	% población	DQO kg/día cabeza
Cerdas lactante	40	2.5%	1.100
Cerdas en gestación	168	10.3%	0.470
reemplazos	34	2.1%	1.100
Destete	360	22.1%	0.122
Engorda	1028	63.0%	0.392
Sementales	2	0.1%	0.270
		DQO_{prom}	0.372

$$\begin{aligned} DQO_{prom} &= (0.025 * 1.1) + (0.103 * 0.47) \\ &+ (0.021 * 1.1) + (0.221 * 0.122) + (0.63 * 0.392) \\ &+ (0.001 * 0.270) \\ &= 0.372 \frac{kgDQO}{día \cdot animal} \end{aligned}$$

14. Caracterización de sólidos volátiles presentes en un kilogramo de excreta para la granja: Al igual que la caracterización de DQO el Sv está en función de la etapa de desarrollo y su relación con la población total de la granja. En este caso se utilizó la relación kg (Sv)/kg excreta obtenida mediante los factores de kg (Sv)/animal día y la tasa de excreción de animal día según etapa de desarrollo donde se encuentre.

$$Sv_{prom} = \sum_{i=destete}^{maternidad} x_i \cdot \frac{kgSv}{kgEx_i} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde X_i = La fracción de la población en la etapa del desarrollo y la población total de la granja

DQO_i = el DQO por animal en cada una de las etapas del desarrollo de la granja

Ejemplo:

$$\begin{aligned}
 Sv_{prom} &= (0.025 * 0.083) + (0.103 * 0.090) \\
 &+ (0.021 * 0.083) + (0.221 * 0.085) + (0.63 * 0.081) \\
 &+ (0.001 * 0.089) \\
 &= 0.372 \frac{kg(Sv)}{kgexcreta}
 \end{aligned}$$

15. Estimación de captura de biogás a partir de carga sólida: Mediante metodología de IPCC ecuación 1

$$Pc = carga \cdot Sv_{prom} \cdot Bo \cdot f \quad (\text{Ecuación 18})$$

Ejemplo para la carga de un digestor semicontinuo de bolsa tipo salchicha:

$$Pc = 181.41 \frac{kgexcreta}{día} \cdot 0.083 \frac{kg(Sv)}{kgexcreta} \cdot 0.29 \frac{m^3CH_4}{kg(Sv)} \cdot 75\% = 3.26 \frac{m^3CH_4}{día}$$

16. Estimación de captura de biogás a partir de carga líquida: Mediante metodología de agencia consultora ecuación 2

$$Pc_L = \frac{(carga \cdot DQO_{prom})}{V_{animal}} \cdot \%recuperación \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde V animal es el volumen de efluente promedio utilizado por animal al día.

$$Pc_L = \frac{\left| \frac{220.0 \frac{gal}{día} \cdot 0.372 \frac{kgDQO}{día \cdot animal}}{6.059 \frac{gal}{día \cdot animal}} \right| \cdot 80\% \cdot 0.349 \frac{m^3CH_4}{kgDQO}}{1} = 7.55 m^3CH_4$$

17. Ahorro económico con la cantidad de criadoras utilizables con volumen de biogás extraído de digestor semicontinuo de bolsa tipo salchicha: A partir del consumo de una criadora de 0.093 m³/h se estimo la cantidad de criadoras (16 unidades). El precio por kWh es de Q.1.20. Se asume que se reemplazaran las criadoras eléctricas con un consumo de 0.175 kWh por criadora y un tiempo de operación de 16 h.

$$Ahorro = Criadoras \cdot T_{op} \cdot C_u \cdot C_E \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde: Top = tiempo de operación de criadoras a base de biogás

Cu = consumo por unidad

Ce = costo de energía eléctrica

$$Ahorro = (9u) \cdot \left(16 \frac{h}{día}\right) \cdot (0.175 kW) \cdot \left| \frac{Q.1.20}{kWh} \right| \left| \frac{30 día}{mes} \right| = \frac{Q.860.32}{mes}$$

18. Beneficios ambientales: Al quemar el metano capturado se está evitando que este se vaya a la atmosfera el cual tiene un potencial de 21 veces el potencial de calentamiento global que posee el CO₂. No fue incluido para este cálculo las emisiones detenidas debido a la quema de combustible fósil para la producción de energía que calentaría las criadoras, por tanto:

$$tonCO_2.eq = V_{CH_4} \left| 0.67 \frac{kgCH_4}{m^3CH_4} \right| \cdot \left| \frac{1ton}{1000 kg} \right| \cdot \left| \frac{1tonCO_2}{1tonCH_4} \right| \cdot \left| \frac{30 día}{1mes} \right| \quad (\text{Ecuación 21})$$

Ejemplo:

$$tonCO_2.eq = 12.29 m^3 CH_4 \left| 0.67 \frac{kgCH_4}{m^3 CH_4} \right| \cdot \left| \frac{1ton}{1000 kg} \right| \cdot \left| \frac{1tonCO_2}{1tonCH_4} \right| \cdot \left| \frac{30 día}{1mes} \right| = 5.19 tonCO_2 / mes$$

19. Tiempo de retorno: Este tiempo de retorno fue obtenido únicamente mediante los ahorros obtenidos en la facturación eléctrica. Tomando en cuenta el precio del biodigestor instalado y las nueve criadoras que puede satisfacer:

$$T_R = \frac{I_o}{A_m} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde Io es la inversión inicial

Am es el ahorro mensual

Ejemplo Instalación de digestor, compra de nueve criadoras (costo de criadora Q.900.00 por criadora y gastos de instalación)

$$T_R = \frac{Q.17,681.40}{Q.860.32 / mes} = 20.55 mes$$

D. Datos calculados

Tabla 24 Producción de excreta y sólidos volátiles en granja por etapa de desarrollo

Censo de animales	kg excreta/día	kg (Sv)/día
Cerdas lactante	480.00	40.00
Cerdas en gestación	840.00	75.60
reemplazos	408.00	34.00
Destete	468.00	39.60
Engorda	4831.60	390.64
Sementales	7.60	0.68
Total	7035.20	580.52

Tabla 25 Datos calculados, metodología IPCC

Censo de animales	Relación con población total (%)	Sv total por etapa (kgSv/día)	Kg Sv / kg excreta
Cerdas lactante	2.45	40.00	0.08
Cerdas en gestación	10.29	75.60	0.09
reemplazos	2.08	34.00	0.08
Destete	22.06	39.60	0.08
Engorda	62.99	390.64	0.08
Sementales	0.12	0.68	0.09

Tabla 26 Datos calculados, metodología agencia consultora

Censo de animales	Relación con población total (%)	DQO total por etapa (kg/día)
Cerdas lactante	2.45	21.120
Cerdas en gestación	10.29	37.901
reemplazos	2.08	17.952
Destete	22.06	21.082
Engorda	62.99	193.428
Sementales	0.12	0.259

Tabla 27 Detalle de captura de metano por etapa del desarrollo de crianza

Censo de animales	Captura de metano m ³ /día		
	Metodología agencia	Metodología IPCC	Diferencia
Cerdas lactante	7.371	8.700	15.3%
Cerdas en gestación	13.227	16.443	19.6%
reemplazos	6.265	7.395	15.3%
Destete	7.357	8.613	14.6%
Engorda	67.507	84.964	20.5%
Sementales	0.090	0.148	38.8%
Total	101.818	126.263	19.4%

Tabla 28 Detalle de captura de biogás por etapa del desarrollo de crianza

Censo de animales	Captura de metano m ³ /día		
	Metodología agencia	Metodología IPCC	Diferencia
Cerdas lactante	11.168	13.182	15.3%
Cerdas en gestación	20.041	24.914	19.6%
reemplazos	9.493	11.205	15.3%
Destete	11.148	13.050	14.6%
Engorda	102.283	128.734	20.5%
Sementales	0.137	0.224	38.8%
Total	154.270	191.308	19.4%

Tabla 29 Volúmenes de captura de metano y biocombustible en digestor semicontinuo de bolsa tipo salchicha

	Carga	Captura metano	Captura Biogás
Líquida	181.41 kg/día	3.26 m ³ /día	4.95 m ³ /día
Sólida	330.00 gal/día	7.55 m ³ /día	11.44 m ³ /día

E. Glosario

Sólidos volátiles: Porción de la materia orgánica que se puede eliminar o volatilizarse en procesos de oxidación

Sólidos totales: Grupo de partículas que incluye a los sólidos disueltos, suspendidos y sedimentables en agua.

Demanda química de oxígeno: Es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida.

Biogás: Es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos y otros factores, en ausencia de aire.

Digestión anaeróbica: Es el proceso en el cual microorganismos descomponen material biodegradable en ausencia de oxígeno.

Efluentes: Los efluentes líquidos son residuos líquidos o residuos líquidos mezclados con sólidos.

Tratamiento Primario de Efluentes: Busca reducir la materia suspendida por medio de la precipitación o sedimentación, con o sin reactivos, o por medio de diversos tipos de oxidación química.

Tratamiento Secundario de Efluentes: Se emplea de forma masiva para eliminar la contaminación orgánica disuelta, la cual es costosa de eliminar por tratamientos físico-químicos.

Tratamiento Terciario de Efluentes: Utiliza técnicas de ambos tipos anteriores, destinadas a pulir o afinar el vertido final, mejorando alguna de sus características.