



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO EN LA
IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES EN ZONAS
RURALES DEL ESTADO DE MÉXICO A PARTIR DE
DESECHOS ORGÁNICOS**

TESIS

PRESENTA

MOISÉS ALCALDE SEGUNDO

QUE PARA OBTENER PARA EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO



MÉXICO, D.F.

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesora: Graciela Guadalupe Del Carmen Díaz
Argomedo

VOCAL: Profesor: Euberto Hugo Flores Puebla

SECRETARIO: Profesora: Alejandra Castro González

1er. SUPLENTE: Profesor: Alejandro Zanelli Trejo

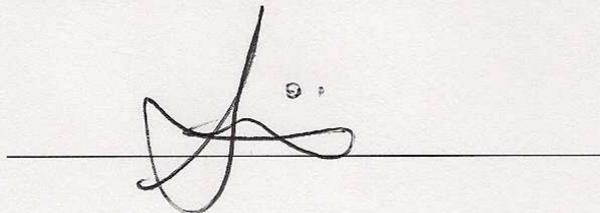
2º SUPLENTE: Profesor: Andoni Garritz Cruz

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: Facultad de Ingeniería CU-UNAM, dentro del proyecto con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.

ASESOR DEL TEMA: Dra. Alejandra Castro González

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke, positioned above a horizontal line.

SUSTENTANTE: Moisés Alcalde Segundo

A handwritten signature in black ink, featuring a large loop and a long horizontal stroke, positioned above a horizontal line.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora de tesis la Dra. Alejandra Castro y a mis asesores por su apoyo y orientación para este trabajo.

Gracias también a mis padres Ricardo y Sofía por todo el apoyo

A mi hermano Isaías, por todo su apoyo a lo largo de estos años

A mis Amigos Tacho y Sally por su siempre e infinita amistad

A mis amigos el señor Norberto y su esposa Lisa Cortes, por su ejemplo de lucha y perseverancia.

Hago un énfasis muy especial al sistema de becas PUMC-UNAM por la beca otorgada que siempre me ayudó en mis estudios, a la Maestra Evangelina Mendizábal encargada del programa; y a mi amigo y asesor Wilfrido Martínez quien siempre me apoyó y me oriento con su tutoría.

A mis amigos que siempre estuvieron conmigo

E infinitamente a la máxima casa de estudios del país la UNAM y a mis excelentes profesores.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
RESUMEN.....	VIII
GLOSARIO DE NOMENCLATURAS	X
CAPÍTULO I	1
Introducción	1
Objetivos	3
Hipótesis.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2.1 Reseñas energéticas y uso de biodigestores.....	4
2.2 Biodigestores	6
2.3 Clasificación de los digestores	7
2.4 Biodigestores para uso rural	8
2.4.1 Intermitente o por lotes.....	9
2.4.2 Flujo tapón	10
2.4.3 Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente.....	11
2.4.4 Filtros anaerobios	12
2.4.5 Digestores chinos o los llamados hindú.....	14
2.5 Otros tipos de digestores comunes	15
2.5.1 Fosas sépticas	15
2.5.2 Biodigestor de domo flotante (indio)	15
2.5.3 Biodigestor de domo fijo (chino)	16
2.5.4 Biodigestor de estructura flexible.....	16
2.5.4.1 Componentes del biodigestor de polietileno.....	18
2.5.4.2 Ventajas de los biodigestores de plástico económicos ...	20
2.5.4.3 Características y componentes del biodigestor de polietileno	21
2.6 Diseño de biodigestores rurales.....	23
2.6.1 Factores humanos	24

2.6.2 Factores biológicos	24
2.6.3 Factores físicos.....	24
2.6.4 Factores de construcción	25
2.6.5 Factores utilitarios	25
2.6.6 Tamaño.....	26
2.7 Parámetros que rigen el comportamiento del tratamiento anaerobio	27
2.7.1 Temperatura	27
2.7.2 pH	28
2.7.3 Tiempo de residencia del sustrato	29
2.7.4 Nutrientes inhibidores en la relación carbono/nitrógeno ...	31
2.7.5 Porcentaje de sólidos	32
2.7.6 Materias tóxicas	33
2.7.7 Agitación	33
2.7.8 Características químicas de los residuos	34
2.7.9 Formulaciones de carga	35
2.7.10 Potencial redox.....	36
2.7.11 Cinética del proceso	36
2.7.12 Características de las reacciones biológicas	37
2.8 Tratamiento anaerobio	37
2.9 Proceso de obtención de metano	39
2.9.1 Hidrólisis	39
2.9.2 Acidogénesis	39
2.9.3 Acetogénesis.....	40
2.9.4 Metanogénesis	40
2.10 Composición del biogás	41
2.11 Uso de biodigestores en zonas rurales.....	42
2.11.1 Ventajas del uso de biodigestores en zonas rurales	47
2.11.2 Desventajas del uso de biodigestores en zonas rurales ..	48
2.12 Situación energética mundial	49
CAPÍTULO III	51
3.1 Instalación de biodigestores en Amanalco, Estado de México .	51

3.2 Inquietudes y puntos de vista de los pobladores de Amanalco sobre la problemática energética y ambiental	52
3.3 Localización del lugar de estudio municipio de Amanalco, Estado de México	55
3.4 Características del lugar de estudio, Municipio de Amanalco, Estado de México	56
3.4.1 Características físicas del municipio de Amanalco.....	57
3.4.2 Extensión	57
3.4.3 Orografía	59
3.4.4 Hidrografía.....	60
3.4.5 Clima	60
3.4.6 Recursos naturales	61
3.5 Datos estadísticos del municipio de Amanalco	61
3.5.1 Datos estadísticos obtenidos en la población de estudio...	62
3.6 Piscifactorías en el municipio de Amanalco.....	62
3.7 Origen de los residuos orgánicos del municipio de Amanalco..	64
3.8 Producción diferentes residuos orgánicos en Amanalco	65
3.8.1 Residuos de truchas	65
3.8.2 Residuos de excretas humanas.....	66
3.8.3 Residuos de sólidos orgánicos	66
3.9 Producción de biogás de acuerdo al tipo de desecho	67
3.10 Ejemplo de cálculo de la producción de metano en una piscifactoría de las comunidades de Amanalco	68
3.11 Producción total de metano en las comunidades de Amanalco	69
3.12 Casos de estudio propuestos para el diseño e implementación de un digestor	71
3.13 Producción de materia orgánica y de metano en los casos propuestos para la implementación de un biodigestor.....	74
3.14 Aplicaciones de un metro cúbico de biogás y su capacidad calorífica respecto al gas natural y al gas L.P.....	75
3.15 Formulaciones para la producción de biogás y metano.....	77
3.16 Dimensiones de los digestores de polietileno	78
3.17 Propuesta de un biodigestor para su uso en zonas rurales ...	82
3.18 Diseño de un biodigestor de polietileno.....	84

CAPÍTULO IV	86
4.1 Evaluación económica del proyecto	86
4.2 Planteamiento general económico para la implementación de un biodigestor	88
4.3 Cálculo del planteamiento económico	90
4.4 Cálculo de los flujos de efectivo de cada año	91
4.5 Cálculo del gradiente	93
4.6 Cálculo del valor presente neto del proyecto de implementación de un biodigestor de bajo costo	94
4.7 Periodo de recuperación descontado	98
4.8 Tasa interna de rendimiento	101
4.9 Cálculo del P en el mantenimiento del biodigestor.....	105
4.10 Contribuciones del proyecto	109
CONCLUSIONES.....	112
BIBLIOGRAFÍA.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema del digestor chino	17
Figura 2.2 Biodigestor de polietileno	18
Figura 2.3 Biodigestor de plástico económico	21
Figura 2.4 Materiales para el biodigestor de polietileno.....	23
Figura 2.5 Diagrama de flujo de la degradación anaerobia	41
Figura 2.6 Energía primaria en el mundo	49
Figura 2.7 Tendencia de las fuentes empleadas para la generación de energía eléctrica.....	50
Figura 2.8 Consumo mundial de energía del año 2005 a la fecha	50
Figura 3.1 Mapa geográfico de Amanalco de Becerra, Estado México	56
Figura 3.2 Ubicación geográfica del Rincón de Guadalupe	58
Figura 3.3 Ubicación de Amanalco en el Estado de México	59
Figura 3.4 Municipios vecinos de Amanalco	59
Figura 3.5 Gráfico de las alternativas de rendimiento de 1 m ³ de biogás en medio rural	76
Figura 3.6 Diagrama del biodigestor de polietileno propuesto	83
Figura 3.7 Biodigestor propuesto	85
Figura 4.1 Diagrama de flujos de efectivo de cada año	92
Figura 4.2 Relación VPN vs Interés	97
Figura 4.3 Periodo de recuperación descontado	101
Figura 4.4 TIR del proyecto.....	103
Figura 4.5 Flujos de efectivo del mantenimiento del biodigestor ...	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de digestores respecto al TRH, TRS Y TRM.....	8
Tabla 2.2 Principales materias primas de los biodigestores rurales....	9
Tabla 2.3 Tipo de digestores de acuerdo a su tamaño y su capacidad	26
Tabla 2.4 Relación C:N de diversos desechos disponibles en el medio rural	32
Tabla 2.5 Concentraciones de catalizadores e inhibidores	34
Tabla 2.6 Formulaciones de carga para un TRH de 10 días utilizando diferentes tipo de desechos	35
Tabla 2.7 Características fisicoquímicas de los desechos bovinos	36
Tabla 2.8 Composición del biogás	43
Tabla 3.1 Nombre de los Municipios del Estado de México.....	57
Tabla 3.2 Población rural de Amanalco	61
Tabla 3.3 Población y habitantes de las comunidades visitadas.....	62
Tabla 3.4 Piscifactorías en Amanalco	63
Tabla 3.5 Desechos orgánicos de las comunidades de Amanalco.....	64
Tabla 3.6 Residuos de trucha por día en Amanalco	65
Tabla 3.7 Residuos de excretas humanas por día de cada población	66
Tabla 3.8 Residuos de sólidos orgánicos por día de cada población .	67
Tabla 3.9 Cantidad de biogás obtenido para diferentes tipos de desechos orgánicos.....	67
Tabla 3.10 Producción de biogás por granja piscícola de la zona Amanalco	69
Tabla 3.11 Producción total de metano en las comunidades de Amanalco	70
Tabla 3.12 Generación de metano para una granja con 6 borregos, 7 cerdos, 10 personas, 2,000 truchas (Caso I).....	73
Tabla 3.13 Generación de metano para una granja con 70 borregos, y 5 personas (Caso II)	73
Tabla 3.14 Generación de metano para una granja con 5 borregos, 2 cerdos y 6 personas (Caso III)	74
Tabla 3.15 Cantidad de excretas producidas por día y producción de metano por día en los tres casos	75

Tabla 3.16 Capacidad calorífica del biogás frente al gas natural y gas L.P.....	76
Tabla 3.17 Material y costo para el digestor de polietileno propuesto	80
Tabla 3.18 Volúmenes totales de los digestores de tres casos de estudio.....	81
Tabla 3.19 Dimensiones de los digestores.....	82
Tabla 3.20 Proporciones de cargas en un digestor	84
Tabla 4.1 Interpretación del valor presente neto.....	87
Tabla 4.2 Costos del tanque de gas en un periodo de cinco años	89
Tabla 4.3 Ahorro anual (flujos de efectivo) por uso de biogás.....	92
Tabla 4.4 Analizando diferentes escenarios de i la tasa de referencia correspondiente a la TMAR	97
Tabla 4.5 Periodo de recuperación descontado	100
Tabla 4.6 Cálculo de la TIR	102
Tabla 4.7 Resultados de aceptación o rechazo del proyecto de acuerdo a la TIR.....	104
Tabla 4.8 Costo del gradiente del mantenimiento del biodigestor ..	106
Tabla 4.9 Costo del mantenimiento del biodigestor	107
Tabla 4.10 Relación de flujos positivos y negativos del proyecto ...	108
Tabla 4.11 Ahorro económico total por el uso de biogás	109

RESUMEN

El presente trabajo comprende un estudio técnico y económico en la implementación de biodigestores en zonas rurales del Estado de México, específicamente en el municipio de Amanalco de Becerra, localidad que se dedica en su mayoría a la cría de truchas y a las actividades agropecuarias. Los pobladores de sus comunidades rurales tienen escasez de recursos energéticos por el difícil acceso de los proveedores de gas y también por el alto costo de este insumo. La gente al vivir en un medio natural toma de la naturaleza sus recursos pero a veces afectan directamente a los ecosistemas, ya que al emplear leña como combustible propician la tala inmoderada. Los restos de las vísceras de truchas al ser arrojadas directamente al agua, contaminan los mantos freáticos, así mismo también arrojan residuos directamente a la tierra generando proliferaciones de bacterias y enfermedades infecciosas. La gente de las comunidades rurales muchas veces dispone como combustible, las bolsas de plástico y botellas de PET (polietilén-tereftalato) para la cocción de los alimentos, desconociendo que el humo de estos residuos contiene dioxinos, que son sustancias generadoras de cáncer.

El contexto del presente trabajo de tesis plantea la utilización de los residuos generados de las granjas piscícolas y agropecuarias para proveer beneficios a los habitantes de Amanalco y al medio ambiente por medio de un biodigestor generador de biogás. La tecnología propuesta es la degradación anaerobia, utilizando biodigestores de polietileno de bajo costo que son prácticos para zonas rurales. Actualmente esta tecnología es utilizada en países en vías de desarrollo como Colombia, Costa Rica y México, entre otros.

Se estudian 3 casos de estudio y de ellos se propuso un caso promedio para toda la comunidad de Amanalco.

Se propuso la alternativa de implementación de un digestor rural, ofreciendo ventajas energéticas y ecológicas, además por su fácil aplicación y mantenimiento no requiriendo de gastos excesivos. El volumen total del biodigestor propuesto fue de 1.31 m³ para una familia de seis personas. A este biodigestor diariamente se le agregarían 105.32 L de agua y 26.33 Kg de residuos orgánicos por un periodo de 10 días para producir 1m³ de metano. Este equipo pretende disponer de una mezcla de materia orgánica como son los residuos orgánicos domésticos, restos de comida, excretas de diferentes animales y excretas de seres humanos.

Los costos mínimos de materiales para la construcción de un biodigestor de polietileno de un volumen de 1.31 m³ en la zona de estudio es de \$3,332 pesos por biodigestor. El proyecto se hizo para un periodo de inversión de 5 años con un ahorro de \$6,662 pesos por consumo del biogás.

La disminución del impacto ecológico y ambiental que da esta alternativa es notoria, ya que propicia la disminución de la contaminación del agua, de la tierra así como del aire. En cuestiones sociales genera una comodidad económica pues evita la compra de gas doméstico.

Se concluyó que es viable este tipo de tecnología porque suple directamente otros combustibles. Se genera un gas barato y limpio, usando el biogás como combustible, disminuye la emisión de metano y bióxido carbono a la atmosfera que son gases efecto invernadero y propician el sobrecalentamiento global de la tierra.

GLOSARIO DE NOMENCLATURAS

Ar: Argón

C:N: Relación de carbono nitrógeno

CFC: Comisión federal de electricidad

CFCs: Clorofluorocarbonos

CH₃COOH: Ácido acético

CH₃SH: Metil mercaptano

CH₄: Metano

CIPAV: Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola

CNA: Comisión Nacional del Agua.

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Bióxido de carbono

CONAE: Comisión Nacional para el Ahorro de Energía

DQO_{removida}: Demanda Química de Oxígeno removida

F: Valor futuro

FIRCO: Fideicomiso de Riesgo Compartido

FNE: Flujo neto de efectivo

FRP: Fibra de vidrio reforzado en plástico

G: Gradiente

GEI: Gases Efecto Invernadero

H/D: Relación altura diametro

H₂: Hidrógeno

H₂O_{vap}: Vapor de agua

H₂O: Agua

H₂S: Ácido sulfhídrico

H₂SO₄: Ácido sulfúrico

HSD: High Solids Digester

i: Tasa de interés

In situ: En el lugar

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

L.P.: Gas Licuado de Petróleo

MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio
msnm: Metros sobre el nivel del mar
mV: milivolts
n: Número de periodos
NH₃: Amoniaco
O₂: Oxígeno
OLADE: Organización Latinoamericana de Energía
P: Valor presente
PET: Tereftalato de polietileno
pH: Indicador ácido o básico de una sustancia
PROCAPI: Programa de Coordinación para el Apoyo a la Producción Indígena
PROFECO: Procuraduría Federal del Consumidor
PVC: Policloruro de Vinilo
SO₄: Ion sulfato
SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SAT: Secretaria de Administración Tributaria
SDT: Sólidos Disueltos Totales
SSF: Sólidos Suspendidos Fijos
SST: Sólidos Suspendidos Totales
SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles
ST: Sólidos Totales
STF: Sólidos Totales Fijos
STV: Sólidos Totales Volátiles
TEP: Tonelada Equivalente de Petróleo
TIR: Tasa Interna de Retorno
TMRA: Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento
TRH: Tiempo de Retención Hidráulica
TRM: Tiempo de Retención de Microorganismos
TRS: Tiempo de Retención de Sólidos y Líquidos
UV: Filtro Ultravioleta
VPN: Valor Presente Neto

CAPÍTULO I

Introducción

Hoy en día, en todo el mundo los precios de toda clase de energía están aumentando, la población entera del planeta tiene una gran preocupación por su adquisición pero la gente en las zonas rurales carece más de los recursos energéticos por tanto, son quienes más sufren las consecuencias. Las poblaciones del Estado de México no son la excepción. En el presente trabajo se pretende abordar la situación de las comunidades rurales del municipio de Amanalco de Becerra del Estado de México. Se pretende realizar un estudio técnico y económico para incentivar el uso del biogás, resolviendo en parte el bienestar ambiental, la salud familiar y la economía del hogar. En estas comunidades se compra gas para cocinar y el precio del tanque de gas doméstico es de 195 pesos para uso de un mes, en otras, el gas es un producto inaccesible.

El precio del gas es accesible para la gente de los países desarrollados y ciudades de los países subdesarrollados. Pero en las comunidades rurales se buscan otras alternativas de fuentes de energía. Una fuente de energía que han tenido hasta ahora, es la tala de árboles para cocinar con leña. Esta práctica, además no es sostenible por destruir la naturaleza y es un problema de salud. Al usar leña como combustible, se inhala el humo y gases contaminantes. Se acostumbra encender fuego con desechos plásticos, que generan dioxinos y producen cáncer en seres humanos. Es así como, el uso del biogás es una propuesta para estas comunidades para mejorar las situaciones de salud, ambiente, economía familiar y desarrollo sustentable.

Para enfrentar este problema, se propone un programa de implementación de sistema de biodigestores en las comunidades

rurales. Se pretende utilizar los desechos de animales de las granjas piscícolas, estiércol de ganado porcino y vacuno, restos de los peces, y desechos orgánicos.

El medio de sustento en la comunidad de Amanalco es la cría de truchas. Todos los desechos son depositados a cielo abierto y han sido conducidos a los mantos freáticos provocando la presencia de coliformes, contaminando el agua que abastece los tanques de truchas y de consumo humano. Al implementar el tratamiento de desecho de los animales en sistemas de biodigestores se provee la viabilidad adecuada en el manejo de esos desechos.

Los biodigestores son tanques en los que se fermenta el desecho orgánico para producir el biogás. El biogás está constituido por metano y es producido en el tanque del biodigestor por la fermentación anaerobia (sin la presencia de oxígeno) y puede ser utilizado como gas doméstico en la comunidad. Los desechos digeridos pueden utilizarse para mejorar los suelos en los propios cultivos de los habitantes.

Actualmente en la zona norte del país, a partir de la aplicación de bonos de carbono y MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio), este tipo de implementación tecnológica se está proponiendo como una alternativa energética en las zonas rurales. El uso de leña y el manejo inadecuado de los recursos naturales, nos está llevando a la destrucción del planeta, la deforestación, los altos niveles de dióxido de carbono generado por incendios forestales, la contaminación provocado por vehículos, industrias y otros factores están provocando un calentamiento global de manera acelerada.

En la actualidad han surgido diferentes opciones para sustituir la leña como fuente de combustible, la electricidad y el gas comercial con un elevado costo. Un ejemplo son las estufas solares que tienen una

serie de requerimientos en su manejo y no funcionan en días lluviosos. Una alternativa propuesta en esta investigación será la implementación de biodigestores en estas zonas.

Objetivos

Realizar la evaluación técnica y económica de la implementación de biodigestores en una comunidad rural.

Hipótesis

El uso del biogás como combustible para la comunidad de estudio, en este caso en el municipio de Amanalco de Becerra será técnica y económicamente factible para su implementación en esa zona.

CAPÍTULO II

2.1 Reseñas energéticas y uso de biodigestores

Una de las grandes preocupaciones hoy en día a escala mundial, es la búsqueda de soluciones para prevenir la contaminación ambiental provocada por las grandes cantidades de desechos que se generan en las industrias, planes agropecuarios y comunidades donde en su gran mayoría son vertidos sin tratamiento alguno a los cursos receptores de agua o al terreno.

Por otro lado la creciente escasez de energía y minerales producida por el creciente desarrollo industrial, ha provocado la urgente necesidad de obtener esos recursos mediante fuentes renovables.

Los desechos ganaderos, porcinos y bovinos, presentan un alto contenido de materia orgánica que ocasiona un gran poder contaminante al medio ambiente, pero sin embargo concentra una fuente con un alto valor energético y de recuperación de minerales mediante sistemas de tratamiento adecuados.

La fermentación anaerobia de esos desechos nos permite:

- Eliminar la contaminación, ya que con este proceso se puede reducir en un 70-80% el material orgánico contaminado.
- Obtener energía, pues por cada 1000 Kg de sólidos totales del residuo porcino y bovino tratado, se puede obtener unos 250 m³ y 125 m³ de metano respectivamente, que en países como el nuestro, la relación en el proceso de obtención de metano y el consumo de energía supera los 10/1, cantidad que avala su rentabilidad.
- Utilizar el lodo digerido como abono orgánico, alimentación animal, acondicionados de suelos y vermicultura.

- Utilizar el efluente líquido del proceso como fertilizantes o para el desarrollo de plantas acuáticas, micro algas y cría de peces.
- Eliminar sobre todo las bacterias del tifus, paratífus y cólera.

De lo anteriormente expuesto, se considera elaborar un documento, para brindar conocimientos básicos de la tecnología de la digestión como una herramienta en el manejo y utilización de residuales pecuarios para prevenir la contaminación del medio ambiente y lograr un aprovechamiento económico de los desechos.

La escasez de fuentes de energía económicamente accesibles al uso doméstico y el elevado precio de los fertilizantes químicos necesarios para el sostenimiento de la tierra de cultivo, han hecho que la tecnología de producción de biogás sea aceptada como una alternativa de solución al problema del desarrollo en zonas rurales.

Para producir biogás y obtener bioabono, es necesaria la construcción de una cámara especial que se denomina biodigestor, en donde se produce la fermentación anaerobia (sin aire) de los desechos agropecuarios (estiércol de animales, hojas, rastrojos de cosechas y excreta humana).

El biogás se utiliza para el funcionamiento de cocinas y lámparas: cuando se quema da una llama azul, libera aproximadamente 4,750 Kcal/m³ y no produce hollín ni olores desagradables. Los residuos líquidos y sólidos tienen un alto poder fertilizante y están libres de bacterias nocivas.

El diseño general para una familia es de material de polietileno y es óptimo para ser utilizado en comunidades rurales. En su construcción se utilizan materiales existentes íntegramente en el mercado nacional y técnicas de fabricación que no requieren de conocimientos

especializados de albañilería, sino tan solo aplicar lo descrito en algún manual de construcción.

Un biodigestor de 10 m³ de capacidad produce biogás en cantidad que permite atender las necesidades de iluminación y cocción de alimentos para una familia de seis miembros.

El costo del biodigestor disminuye considerablemente si es construido por el propio interesado. Su vida útil es de 5 años y requiere de un mantenimiento mínimo, aunque periódico.

El empleo de biodigestores contribuye a mejorar las condiciones sanitarias del lugar, evitando enfermedades provocadas por desechos orgánicos expuestos al aire libre.

2.2 Biodigestores

Un biodigestor es un recipiente cerrado o tanque, el cual puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico. La mayoría de los digestores son de forma cilíndrica, posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (por ejemplo, estiércol animal o humano, las aguas sucias de las ciudades, residuos de matadero) y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por la acción bacteriana, abandona el biodigestor. Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan influente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor, libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás (*Castellanos, 1980*).

La implementación de un tipo de biodigestor depende del objetivo que se desea para su uso o aplicación. Ya que en casos especiales el uso de biodigestores es por cuestiones experimentales, en el cual se desarrollan métodos de usos y aplicaciones para posteriormente

implementarlos como un modelo en un determinado lugar y con una finalidad específica según sus características. Pero en la mayoría de los casos, se implementan estos métodos o tecnologías en la aplicación inmediata o directa. Es decir, en beneficio de la sociedad aprovechando las ventajas y ahorros que ofrecen para obtener el mayor y mejor aprovechamiento de los recursos naturales con que se cuenta.

En la actualidad, todos los proyectos viables siempre tienen que considerar las ventajas a nuestro favor, de tal manera, que se reduzcan costos, se ofrezcan mejoras en una tecnología, que su aplicación considere los recursos que cuenta el lugar en donde se va implementar esta tecnología, además dicha tecnología debe ser económicamente atractiva, de tal manera, que el aprovechamiento de los recursos orgánicos presenten mayores ventajas y menos costos. Para desarrollar o aplicar la tecnología, en la cual se emplean residuos orgánicos por medio de la digestión; es necesario "acoplar" las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del residuo (influyente) con las condiciones de diseño y operación del sistema (digestor). La selección del digestor apropiado para un determinado tipo de influente, es un elemento clave en la estabilidad del proceso. Por lo tanto, es de suma importancia conocer los principios de operación de los digestores más representativos.

2.3 Clasificación de los digestores

Hay muchas clasificaciones pero la que se eligió fue de autor. Para clasificar los tipos de digestores se consideran aspectos como el periodo de retención de las fracciones sólidas, líquidas y de microorganismos, TRS (tiempo de retención de sólidos y líquidos), TRH (tiempo de retención hidráulica) y TRM (tiempo de retención de microorganismos), como puede verse en la Tabla 2.1. De acuerdo al

tiempo de retención hidráulico, de sólidos y de microorganismos, se pueden distinguir tres categorías de digestores (Alonso, 1996):

- A. Son aquellos en donde los TRH, TRS y TRM son de igual magnitud.
- B. Es este tipo de digestores el TRH es menor que los TRS y TRM.
- C. Los TRS y TRH son menores que el TRM

Tabla 2.1 Clasificación de digestores respecto al TRH, TRS Y TRM
(Alonso, 1996)

Categoría	Comparación entre los TRS, TRH y TRM	Ejemplos de digestores
A	TRH = TRS = TRM	Intermitente o por lote, continuamente agitados, flujo tapón
B	TRM y TRS > TRH	Continuamente agitados con recirculación de sólidos, flujo ascendente, flujo deflector
C	TRM > TRS y TRH	Filtros anaerobios, de lecho fluidizado o expandido.

2.4 Biodigestores para uso rural

La implementación de biodigestores en zonas rurales es de gran importancia, ya que pueden proveer de combustible (biogás) y fuente de energía para alimentación eléctrica. Es por ello, que en las zonas rurales se emplean diferentes tipos de biodigestores dado a los residuos agrícolas y orgánicos con que se cuenta. Estos mismos se muestran a continuación en la Tabla 2.2 y dependen también de los parámetros TRM, TRS y TRH.

Tabla 2.2 Principales materias primas de los biodigestores rurales
(Urbáez y Carballo, 2008)

Residuos Agropecuarios	Propiedades
Cáscara y pulpa de frutas y vegetales	Sólido, alto contenido de humedad
Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café)	Polvo, HR<25%
Estiércol	Sólido, alto contenido de humedad
Residuos de cosechas: Tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido, HR>55%

HR= Humedad relativa

2.4.1 Intermitente o por lotes

Los residuos agrícolas en las comunidades rurales tienen un gran potencial energético en su proceso de descomposición. Es por ello, que un tipo de digestor que usa este tipo de desecho es el digestor intermitente o por lote. Éste es el sistema más simple, ya que la operación involucra simplemente cargar una sola vez el influente al digestor durante un tiempo entre 30 y 180 días. Durante el tiempo en que la materia orgánica está confinada en el digestor, la producción de biogás alcanza un máximo y después disminuye hasta prácticamente cesar. La digestión puede realizarse con bajos contenidos de sólidos (6 a 10%) o en concentraciones altas (>20%). Esta última es conocida como fermentación o digestión seca (Alonso, 1996).

Debido a que toda la materia orgánica es retenida durante todo el tiempo de digestión, evidentemente no hay diferencia en los tiempos de retención. Lo que presenta, un proceso no continuo que es particularmente favorable para situaciones en que la disposición de residuos orgánicos es temporal, tal es el caso de los residuos agrícolas.

Las etapas de desarrollo de este tipo de digestores con influentes de bajo contenido en sólidos están totalmente avanzadas y han sido usados exitosamente por muchos años. Por otro lado, los parámetros de la digestión seca no han sido totalmente desarrollados en este tipo de digestor. Sin embargo, es una opción muy viable, dado que sus razones de producción de biogás son competitivas con los de otros tipos de digestores más desarrollados (*Chynoweth e Isaacson, 1987; Gunnerson y Stuckey, 1986; Muñoz, 1981*).

2.4.2 Flujo tapón

Este tipo de digestores generalmente se construyen enterrados, son muy pocos profundos y alargados, y cuyas secciones transversales pueden ser circulares, cuadradas o en "V". Se operan en forma semicontinua, entrando el influente por un extremo y la remoción del efluente se realiza por el extremo opuesto. Para asegurar las condiciones de flujo tapón, el largo tiene que ser considerablemente más grande que el ancho y la profundidad. La relación ancho largo puede ser de de 5:1 o hasta de 8:1 (*Mandujano, 1981*) y son recomendables para trabajar con volúmenes mayores de 15 m³, y para residuos animales. Las condiciones ideales para el flujo-tapón implican que las porciones líquidas, sólidas y de microorganismos entren y salgan del digestor en aproximadamente a tiempos y cantidades iguales. Sin embargo, aunque podría no haber ningún mecanismo de mezclado en este tipo de digestor, algún mezclado vertical se lleva a cabo por efectos de la gravedad a todo lo largo. Dando lugar a un pasivo asentamiento de sólidos y por lo tanto, un TRS más largo que los TRH y TRM (*Chynoweth e Isaacson, 1987*).

La cubierta o domo del digestor puede ser flexible o de concreto, de acero, fibra de vidrio, u otro material que soporte las férreas

condiciones de la intemperie. Entre las ventajas y desventajas de este digestor, están:

Ventajas

- Simplicidad en su construcción y operación
- Bajos requerimientos energéticos
- Alta estabilidad
- Capaz de procesar residuos con alto contenido de sólidos
- Relativamente altos volúmenes de digestión
- Son digestores de mayores eficiencias volumétricas, es decir, mayor producción de biogás por volumen de digestión

Desventajas

- Dificultad para mantener la temperatura uniformemente
- Substrato no homogéneo
- Si no existe algún mecanismo de mezclado podría formarse una costra o nata en la superficie
- Si el influente es de altos contenidos de sólidos podría haber zonas muertas

2.4.3 Reactor de lecho de lodos de flujo ascendente

Este es particularmente adecuado para residuos solubles bajo contenido de sólidos. Por ejemplo, puede utilizarse para tratar aguas residuales municipales e industriales. Este digestor consiste en un tanque cilíndrico ($H/D=2$), que proporciona una distribución homogénea del agua residual que entra por una base cónica. El líquido fluye hacia arriba a través del lecho de bacterias

sedimentadas y de una región del digestor en la que las bacterias que flocculan se sedimentan en gránulos de aproximadamente 4 mm de diámetro. Los residuos tratados que emergen del lecho de lodos pasan a un área más estable, libre de burbujas de gas en las que se sedimentan las bacterias que se separaron de la capa, obteniéndose así, TRS y TRM más largos que el TRH (*Bu'lock y Kristhiansen, 1987; Chynoweth e Isaacson, 1987*). También se pueden utilizar deflectores para facilitar la liberación del biogás. Entre sus ventajas y desventajas podemos citar las siguientes:

Ventajas

- Construcción simple
- Altas cargas a operar
- Volúmenes de digestión muy reducidos
- Alta eficiencia volumétrica
- Sin mezclado mecánico

Desventajas

- Requiere un separador efectivo de gas y líquido
- Necesita medios eficientes, en la base cónica del digestor, para una distribución eficiente del influente
- Podría haber pérdidas de sólidos y microorganismos en el efluente

2.4.4 Filtros anaerobios

Estos digestores están constituidos, básicamente, por un tanque cilíndrico ($H/D=8-10$) en cuyo interior hay un filtro fijo, que puede ser de cualquier material seleccionado óptimamente y dispuesto en forma casual u orientada. Los materiales como el plástico y ladrillos tienen

la ventaja de que pueden modelarse para lograr grandes razones de superficie-volumen. Los microorganismos se adhieren en forma de película al medio poroso y toman nutrientes del influente. En el interior, se ha observado que las diferentes poblaciones bacterianas tienden a separarse. Por ejemplo, con flujo ascendente; las bacterias formadoras de ácido actúan en la base del digestor, mientras que las metanogénicas se han encontrado alojadas en el filtro, en los lugares más alejados del influente (*Alonso, 1996*).

Uno de los principales problemas de este tipo de digestor es el taponamiento, que puede ser mitigado con filtros de porosidad orientada junto con operaciones de flujo descendente. Sin embargo, lo anterior promueve el desalojo de microorganismos ya retenidos. En la práctica se han observado las siguientes ventajas y desventajas (*Chynoweth e Isaacson, 1987*):

Ventajas

- Bajos costos de operación
- Digestores de volúmenes reducidos
- Altas cargas de operación
- Muy flexible a grandes fluctuaciones de carga
- Largos tiempos de retención de microorganismos

Desventajas

- Se incrementa la presión a largos periodos de operación
- El filtro puede ser muy costoso, hasta 60% del costo total
- La adhesión de microorganismos al filtro durante el arranque
- Puede ser lento el arranque

2.4.5 Digestores chinos o los llamados hindú

Hay muchos tipos de plantas del biogás pero los más comunes son el domo flotante (indio) y el domo fijo (chino). La baja aceptabilidad de este tipo de biodigestores ha sido principalmente debida a los altos costos, la dificultad para su instalación y problemas en adquirir las partes de repuestos.

Los digestores mencionados anteriormente, fueron considerados por ser los más usados; unos muy populares como los llamados hindú o chino. Estos digestores son alimentados, generalmente con residuos animales, diariamente uno o dos veces al día con influentes de entre 8 y 15% de materia sólida y con tiempos de digestión entre 10 y 25 días, pertenecientes a la categoría A, $TRH=TRS=TRM$. Sin embargo, dentro de cada uno se pueden encontrar las versiones híbridas, como el tipo flujo-deflector empleando algas marinas como influente, los discos biológicos-anaerobios rotativos, etc. Otras variaciones resultan del empleo de equipo auxiliar como desgasificadores, espesadores y tecnologías de membrana para mejorar la efectividad de la aplicación, que podrían resultar costosos y de difícil construcción.

Otros conceptos y técnicas están bajo estudio, como la combinación de filtros anaerobios con lechos expandidos o fluidizados. El HSD (High Solids Digester) desarrollado en los laboratorios del departamento de energía de los EU es otro ejemplo (*Constant, 1989; Félix, 1979*). Ambos con excelentes perspectivas, ya que el filtro anaerobio produce grandes cantidades de biogás con volúmenes de digestión muy reducidos y, en cuanto al HDS, también se generan grandes cantidades de biogás (con mayor concentración de metano) con nulos requerimientos de agua. La mayoría de los residuos tienen que ser diluidos, al menos una parte de agua por una parte de residuo, en los digestores convencionales.

2.5 Otros tipos de digestores comunes

En este tipo de clasificación se da por parámetros como costos de operación, manejabilidad y disposición inmediata de la materia orgánica.

2.5.1 Fosas sépticas

Es el más antiguo y sencillo digestor que se conoce, utilizado normalmente para la disposición de aguas residuales domésticas. Se cree que de ahí deriva el uso potencial de los gases producidos por la fermentación anaerobia, para el uso doméstico.

Para la correcta operación de las fosas es requisito indispensable aislar las aguas servidas que caen en la fosa, de las que contienen jabón o detergentes. El efecto de los jabones y en especial los detergentes, inhibe la acción metabólica de las bacterias. Razón por la que las fosas se colmatan con rapidez y dejan de operar, haciendo necesario destaparlos frecuentemente para recomenzar la operación.

Cuando no es posible separar las aguas negras de las jabonosas, como en el alcantarillado urbano, es necesario hacer un tratamiento químico con polímeros a esta agua, a fin de solucionar el problema antes de iniciar la fermentación anaerobia.

2.5.2 Biodigestor de domo flotante (indio)

Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que sube y se cae en una guía central. La presión del gas disponible depende del peso del contenedor de gas por el área de la unidad y normalmente varía entre 4 a 8 cm de presión de agua. El

reactor se alimenta en régimen semicontinuo a través de una tubería de entrada.

2.5.3 Biodigestor de domo fijo (chino)

Este reactor consiste en una cámara de gas fija construida de ladrillos, piedra u hormigón. El domo y fondos son hemisféricos y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas de mortero para hacerlo firme. La tubería de la entrada es recta y con extremos nivelados. Hay un registro de inspección en el domo del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo y presiones en el domo entre 1 y 1.5 m de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante altas entre el domo hemisférico y el fondo. Se necesitan materiales de alta calidad de alto costo y recursos humanos para construir este tipo de biodigestor. Más de cinco millones de biodigestores se han construido en China y han estado funcionando correctamente pero desgraciadamente, la tecnología no ha sido tan popular fuera de China (*FAO, 1992*).

Esta instalación tiene como ventaja su elevada vida útil, ya que puede durar como promedio 20 años, siempre y cuando se realice un mantenimiento sistemático. En la Figura 2.1 se describe este sistema.

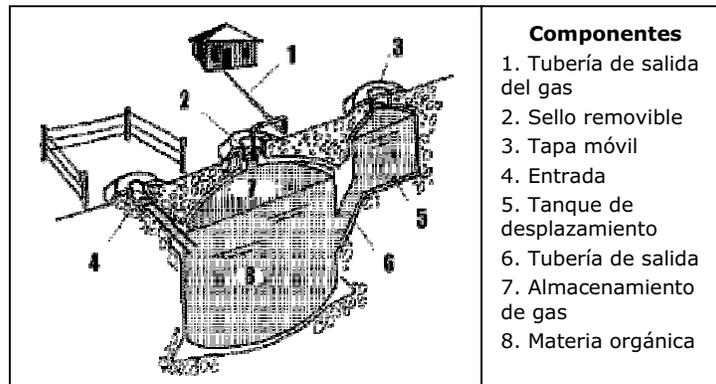
2.5.4 Biodigestor de estructura flexible

Este biodigestor es también llamado de polietileno, de bajo costo; o de estructura flexible.

La inversión alta que exige construir el biodigestor de estructura fija resulta una limitante para el bajo ingreso de los pequeños granjeros. Esto motivó a los ingenieros en la provincia de Taiwán en los años sesenta a hacer biodigestores de materiales flexibles más baratos.

Inicialmente se usaron nylon y neopreno pero se demostró que son relativamente costosos. Un desarrollo mayor en los años setenta era combinar PVC con el residuo de las refinerías de aluminio producto llamado "el barro rojo PVC" (FAO, 1992).

Figura 2.1 Esquema del digestor chino (Lugones, 2008)



Esto fue reemplazado después por polietileno menos costoso, que es ahora el material más comúnmente usado en América Latina, Asia y África. Desde 1986, el Centro para la Investigación en Sistemas Sustentables de Producción Agrícola (CIPAV), ha estado recomendando biodigestores de plástico económicos como la tecnología apropiada por hacer mejor uso de excrementos del ganado, reduciendo la presión de otros recursos naturales. Una característica muy notable es que en este digestor, el gas se acumula en la parte superior de la bolsa, parcialmente llena con biomasa en fermentación. La bolsa se va inflando lentamente con una presión de operación baja, pues no se puede exceder la presión de trabajo de la misma. En la Figura 2.2 se observa una imagen de este tipo de digestor.

Figura 2.2 Biodigestor de polietileno (*Earth, 2003*)



2.5.4.1 Componentes del biodigestor de polietileno

Por ser uno de los más importantes para el uso rural por su bajo costo y facilidad de instalación, este tipo de biodigestor se describen a continuación sus componentes y características (*Lugones, 2008*).

Tubo de admisión: Es un tubo de plástico de 20 a 30 cm de diámetro, que debe usarse para la admisión de desechos y debe sumergirse en los residuos al menos a 15 cm de profundidad, lo cual, previene el escape del metano. Es necesario utilizar un pozo para limpiar el material celulítico antes de alimentar el biodigestor, porque éste puede obstruir con facilidad el influente.

Fermentador y bolsa de almacenamiento: Éste es el principal componente del biodigestor y la bolsa de almacenamiento está en la parte superior del biodigestor. El tamaño del fermentador depende de la cantidad de desechos a fermentar, en general de 0.3 m³. Pero éste no debe ser muy grande, si la cantidad de desechos a tratar es elevada, se pueden conectar cámaras múltiples por medio del tubo plástico. Este sistema posee una mayor área superficial y es muy eficiente, su limitante es que puede resultar muy costoso. Es deseable que el biodigestor éste aislado y cuente con un dispositivo

de calentamiento y de agitación. Un mecanismo bueno sería la construcción de una pared de tierra en la parte norte del biodigestor para prevenir el enfriamiento a causa de los vientos, en el lado sur un colector solar simple para la calefacción, esto con el fin de mantener la temperatura del fermentador constante. La bolsa de almacenamiento de gas puede incorporarse al digestor o estar independiente y puede instalarse cerca de la cocina.

Tubo del efluente: El diámetro del tubo debe ser de 4 a 6 pulgadas de material de plástico. Éste se localiza por debajo del tubo de entrada en el lado opuesto del digestor, el tubo del efluente también debe ser sumergido a 15 cm de profundidad del fermentador para prevenir el escape del gas, se debe mantener el flujo constante.

Tubo de metano: Éste tubo se ubica en la parte superior de la bolsa de almacenamiento de metano. El tubo debe tener 2 pulgadas de diámetro y se usa para transportar el biogás a su lugar de uso. El tubo posee una salida que está sumergida en agua y que drena la humedad condensada.

Dispositivo de seguridad: Este se utiliza para prevenir la ruptura del fermentador debido a presiones altas de la fermentación anaerobia de los desechos. Consiste en una botella de al menos 10 cm de profundidad insertada al tubo de salida. Cuando la presión del digestor es mayor a la del agua, se libera el biogás.

Tubo de limpieza: El lodo que se sedimenta en el fondo del biodigestor debe ser removido cada dos años. Por la tubería se evacuan los lodos por bombeo, así los lodos se disponen cuando el biodigestor es muy largo, con un tubo en un extremo del biodigestor y otro tubo en la mitad del mismo.

Instalación: Lo primero que se debe hacer es preparar una fosa que debe ser un poco más grande que el biodigestor. Luego se procede a instalar el biodigestor y los tubos de admisión y de efluentes. Después de tres o cuatro días se llena la fosa con agua, se descargan los desechos de animales, el agua que rodea el digestor puede ayudarlo a expandirse completamente y disminuye la tensión que ejerce en los tubos de entrada y de salida. Dependiendo de la época del año en la que se haga la instalación el proceso de fermentación se hace más rápido en verano y más lento en invierno.

Mantenimiento: Estos biodigestores pueden tener una durabilidad de 20 años. En el caso de presentarse rupturas, de este pueden ser fácilmente reparadas del mismo material del biodigestor usando un adhesivo fuerte. La parte reparada debe permanecer seca hasta su endurecimiento por completo. Cuando se necesita el metano solo se ejerce una pequeña presión sobre la bolsa de almacenamiento, moviendo de esta forma el biogás a donde se necesita. En la Figura 2.3 se observa cómo se instala y se usa en el hogar un biodigestor de bajo costo.

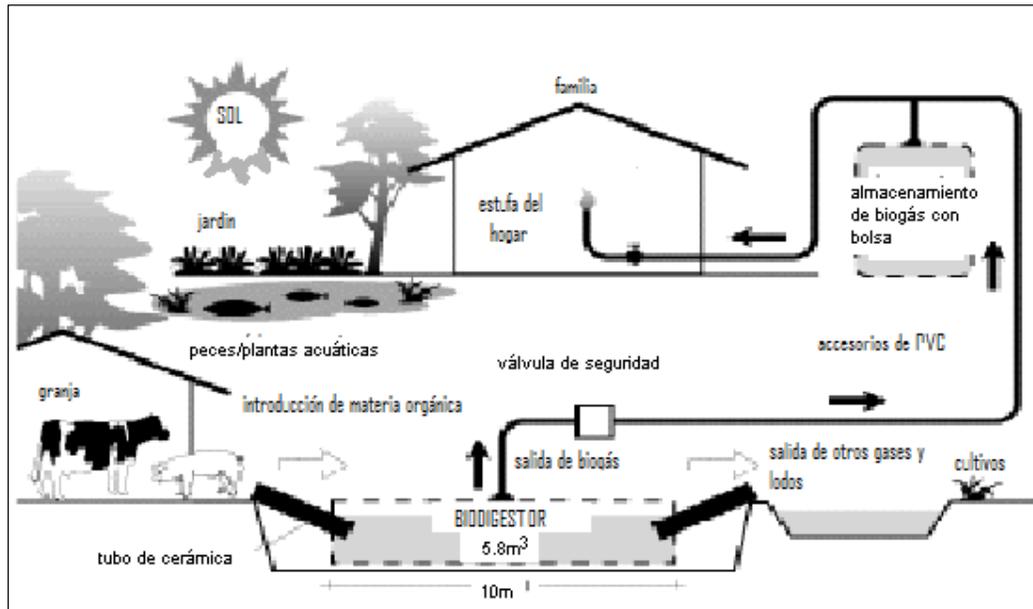
2.5.4.2 Ventajas de los biodigestores de plástico económicos

Como su nombre lo indica este tipo de digestor está construido de plásticos económicos. Además, este tipo de digestor es muy económico en su instalación y fácil de transportar por su bajo peso, en especial en aquellos sitios de difícil acceso y al ser hermético se reducen las pérdidas. El polietileno tubular es el principal componente, ya que se produce en la mayoría de los países lo que hace disponible su fácil implementación. Por las características que tiene este tipo de biodigestor provee las siguientes ventajas más importantes.

- Bajo costo en su operación

- Fácil transportación y flexibilidad de uso e instalación
- Biodigestores de plástico económicos (los más comunes en zonas rurales)

Figura 2.3 Biodigestor de plástico económico (FH, 2005)



2.5.4.3 Características y componentes del biodigestor de polietileno

Las características principales de este tipo de biodigestor son:

- Polietileno tubular transparente. El diámetro variará según la capacidad de las plantas productoras locales, normalmente en el rango de 80 a 125 cm (equivalente a una circunferencia de 2.5 a 4 m). El calibre (espesor) debe estar entre 200 a 250 micras. La longitud del tubo es determinada por el tamaño del biodigestor. El material más apropiado es el usado en los invernaderos que normalmente contienen filtro ultravioleta (UV) que ayuda a prolongar la vida del plástico cuando se expone totalmente al sol.

- Dos tubos cerámicos, 75 a 100 cm con un diámetro interior de 15 cm
- Plástico (PVC) de 12.5 mm de diámetro y la longitud depende de la distancia a la cocina
- Dos adaptadores de PVC, "macho y hembra" de 12.5 mm de diámetro
- Dos empaques de caucho (de los tubos internos de automóviles) de 7 cm de diámetro y 1 mm espesor, con un diámetro de 12.5 mm de agujero central
- Dos plásticos rígidos (perspex) lavanderas de 10 cm de diámetro y un agujero central de 12.5 mm. Aunque el perspex es mejor, ellos también pueden reemplazarse con plásticos viejos u otros artículos hechos de plástico fuerte
- 2 m de tubería de PVC de 12.5 mm de diámetro
- Cuatro neumáticos de bicicletas, motocicletas o automóviles cortados en tiras anchas de 5 cm
- Una botella de plástico transparente con capacidad 1.5 L
- Un codo de PVC de 12.5 mm de diámetro
- Tres "T" de PVC de 12.5 mm de diámetro
- Un tubo de cemento de PVC
- Depósito de almacenamiento del gas

Una mejora importante a la tecnología del biodigestor era la instalación de un depósito, hecha del mismo plástico tubular como el digestor, para guardar el gas en proximidad a la cocina. Esto ha superado el problema de proporciones bajas de flujo de gas cuando el

digestor se localiza a larga distancia de la cocina y cuando el tubo de gas que los une tiene un diámetro estrecho.

Algunos de estos materiales se muestran en la Figura 2.4 ya que al ser materiales de fácil adquisición, este tipo de sistema es accesible para su aplicación a la estufa directamente.

Figura 2.4 Materiales para el biodigestor de polietileno (*Earth, 2003*)



2.6 Diseño de biodigestores rurales

Para el diseño de un biodigestor son necesarios varios factores y de esto depende de la finalidad del mismo biodigestor. Aspectos como son en donde se va a implementar, que uso directo se le dará; evaluar las necesidades y requerimientos técnicos. Esto variará dependiendo de cada región, el aspecto económico, el clima de la zona geográfica, el capital humano, la disposición final del biogás entre otros factores.

A continuación se toman los siguientes aspectos más sobresalientes para el diseño, planeación y construcción de un biodigestor rural:

Factores humanos, biológicos, físicos, de construcción, utilitarios, y de tamaño (FH, 2005).

2.6.1 Factores humanos

A continuación se listan los aspectos referentes a los factores humanos:

- Idiosincrasia
- Necesidad, la cual puede ser sanitaria, para obtención de energía y de fertilizantes
- Recursos disponibles de tipo económicos, materiales de construcción, mano de obra, utilización del producto y área disponible
- Disponibilidad de materia prima, si se cuentan con desechos agrícolas, desechos pecuarios, desechos domésticos, desechos urbanos y desechos industriales

2.6.2 Factores biológicos

Se listan solo dos factores biológicos y entre los principales se encuentran:

- Enfermedades en las comunidades
- Plagas tanto de afectaciones humanas como pecuarias y agrícolas

2.6.3 Factores físicos

Se listan a continuación los factores físicos para ser considerados en el diseño, planeación y construcción de un biodigestor rural:

- Localización.- Si es en zona urbana, rural o semi-urbana y la geografía incluyendo aspectos como la latitud, longitud y altitud

- Climáticos.- Dentro de estos aspectos están las temperaturas máximas y mínimas, la precipitación pluvial, la humedad ambiental, la intensidad solar, los vientos su intensidad y dirección
- Vías de acceso
- Topografía.- Considerando el declive del suelo si es plano, ondulado, o quebrado
- Suelos con sus características como la textura, estructura, nivel freático y capacidad agrológica

2.6.4 Factores de construcción

Los factores de construcción son los siguientes:

- Técnicas de construcción.- De tierra compactada, cal y canto o ladrillo (barro cocido, suelo-cemento, silico-calcáreo), planchas prefabricadas, ferrocemento, concreto, módulos prefabricados o que se use cierto tipo de material incompatible y compatible.

2.6.5 Factores utilitarios

Los factores utilitarios en el diseño, planeación y construcción de un biodigestor rural:

- Función principal.- Si se construye de manera experimental, demostrativa o productiva
- Usos.- Si el uso es de tipo sanitario, energético, fertilizante e integral
- Organizativo.- Si el biodigestor se va a construir a escala doméstica, para grupo familiar, comunitario o empresas
- Operación de la instalación.- Considerando aspectos como el funcionamiento del pretratamiento, la mezcla, la carga, controles de pH, obstrucciones de líquidos, sólidos y gases. Las descargas de

efluentes tanto líquidas como gaseosas y de lodos; el almacenamiento de los líquidos, sólidos y gases; la aplicación de líquidos por bombeo, por tanques regadores o arrastre por riego; los sólidos que están disueltos en el agua y los sólidos en masa y por último, los gases utilizados para la cocción, iluminación e indirectamente en los motores.

2.6.6 Tamaño

El tamaño es de gran importancia porque indica como se debe de seleccionar la materia prima, para cuantificar la materia disponible, las necesidades de gas y la producción de biogás (*I.I.T., 1979*).

En la Tabla 2.3 se describe una clasificación por medio del tamaño y capacidad de los digestores.

Tabla 2.3 Tipo de digestores de acuerdo a su tamaño y su capacidad
(*I.I.T., 1979*)

Tamaño	Capacidad del digestor
Pequeño	3 a 12 m ³
Mediano	12 a 45 m ³
Grande	45 a 100 m ³

Con el objetivo de disminuir el tamaño de los digestores se han utilizado los desechos orgánicos que brindan mayor cantidad de biogás por unidad de volumen. Algunos de ellos son: La excreta animal, la cachaza de la caña de azúcar, los residuales de mataderos, destilerías y fábricas de levadura, la pulpa y la cáscara del café, así como la materia seca vegetal (*FH, 2005*).

2.7 Parámetros que rigen el comportamiento del tratamiento anaerobio

Para el diseño de un biodigestor es importante evaluar parámetros básicos que directamente influyen para su construcción y diseño. La variedad de microorganismos que intervienen, sus actividades (a la vez complementarias e inhibidoras unas de otras) y la amplia variedad de los constituyentes del substrato, permiten el desarrollo óptimo del proceso de digestión, y también que por sí sólo, se dificulte. Sin embargo, con el conocimiento, manejo y control de los parámetros internos y externos relacionados directamente al proceso, darían como resultado criterios para evaluar la operación de la digestión. Tales parámetros son: 1) Temperatura, 2) pH, 3) Tiempo de residencia hidráulica, 4) Nutrientes inhibidores en la relación carbono/nitrógeno 5) Porcentaje de sólidos, 6) Materias tóxicas, 7) Agitación, 8) Características químicas de los desechos, 9) Potencial redox, 10) Cinética del proceso, y 11) Características de las reacciones biológicas.

2.7.1 Temperatura

Generalmente, la degradación anaerobia se realiza a temperaturas comprendidas entre 10 y 65°C. Dentro de estos límites, se distinguen dos puntos donde la producción de biogás es óptima, uno a 35°C y el otro a 55°C; mesofílico y termofílico, respectivamente, siendo un punto de producción máxima que es superior a los 60°C. En general, trabajar en el rango mesofílico significa menor producción de biogás, largos tiempos de retención, población bacteriana estable, menores requerimientos energéticos y menor vapor de agua y de CO₂ en el biogás. Por otro lado, en el rango termofílico habrá un crecimiento bacteriano mayor, grandes requerimientos energéticos, mayor reducción de patógenos y virus, menores tiempos de digestión, digestores de menor volumen, mayor reducción del volumen del

substrato, la población bacteriana es más sensible a los cambios de temperatura y pH. Si se opera a temperaturas superiores al punto óptimo termofílico se obtendrá una mayor producción de biogás, pero la principal regla es mantener constante la temperatura (*Pauss, 1987; Vesilind y Rimer, 1981*).

Existe otro rango de operación, conocido como psicrófilico, en donde la temperatura oscila entre los 10 y 25°C, y para poder obtener cantidades de gas apreciables, es necesario que el residuo tenga bajo contenido de materia sólida.

La temperatura es un factor muy importante pero se ha demostrado que se pueden implementar biodigestores 4000 msnm (metros sobre nivel del mar) a 10°C.

2.7.2 pH

En las diferentes fases de la digestión, el pH fluctúa entre 6.5 y 8.0. Por debajo de 6.5, se inhibirá la producción de metano debido a la presencia de grandes concentraciones de ácidos grasos volátiles. Por arriba de 8.0, la concentración de H_2 , H_2S y amoníaco en el biogás serán más elevadas. El equilibrio del pH está asegurado principalmente por bicarbonatos disueltos y su desequilibrio es debido a grandes fluctuaciones de temperatura, cambios en la velocidad de carga del substrato y a la presencia de materiales tóxicos, como metales pesados y pesticidas. Las bacterias metanogénicas también son muy sensibles a los cambios de pH, teniendo un pH óptimo de 7.2 a 7.4 (*Gollata y Sarada, 1989*).

El pH en un digestor en operación normal fluctúa entre 6.8 y 7.6. Se evita en la alimentación del biodigestor, los cítricos ó sustancias ácidas ya que acidifican el proceso.

Cualquier aumento de pH, genera un exceso de amoníaco (NH_3), que es tóxico en el proceso. Cualquier disminución del pH implica un aumento en el contenido de los ácidos grasos volátiles (ácidos acético, propiónico y butírico) creando un ambiente poco favorable para la vida de las bacterias metanogénicas y por consiguiente una menor producción de biogás.

Ambas situaciones detectadas a tiempo, pueden solucionarse agregando un álcali (generalmente cal) o un ácido (generalmente H_2SO_4) respectivamente, según sea el caso (SAGARPA, 2008).

2.7.3 Tiempo de residencia del sustrato

Ya que las velocidades de crecimiento de las diferentes bacterias que participan en el proceso son diferentes, deben distinguirse tres tipos de tiempos: Tiempo de residencia hidráulica (TRH), tiempo de retención de sólidos (TRS) y el tiempo de retención de microorganismos (TRM). Largos TRS y TRM proporcionan mayores producciones de CH_4 en el biogás, mientras que un amplio TRH aumentará el volumen del digestor.

Las bacterias requieren de un cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran medida de la temperatura, a mayores temperaturas, el tiempo de retención requerido para obtener una buena producción de gas es menor.

En un digestor que opera a carga discontinua o intermitente, el tiempo de retención es el que transcurre entre la carga y descarga del sistema. En un sistema de carga continua, el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario alimentar al digestor. Se tiene la siguiente ecuación de TRH (Tiempo de retención hidráulica):

$$TRH = \frac{[\text{Volumen del Digestor (m}^3\text{)}] [\text{Contenido sólidos (carga Kg/m}^3\text{)}]}{[\text{Sólidos cargados diariamente (Kg/día)}]} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Esta expresión se puede escribir también en forma simplificada, sin considerar la cantidad de sólidos en la carga del digestor:

$$\text{Volumen carga diaria (m}^3\text{/día)} = \frac{\text{Volumen del digestor (m}^3\text{)}}{TRH \text{ (días)}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Es decir, para un tiempo de retención de 30 días, cada día se carga 1/30 del volumen total del digestor, y en promedio la materia orgánica y la masa microbiana permanecerá 30 días dentro del sistema. La cantidad de biogás producido por una planta dependerá, entre otras cosas, de la cantidad de desechos que se introduzcan en el digestor diariamente. Usualmente se trabaja con tiempos de retención hidráulica entre 20 y 55 días y la alimentación diaria varía entre 1 y 5 Kg de sólidos totales por metros cúbicos de digestor. La carga en estos casos se lleva a cabo normalmente una vez al día.

En el intervalo termofílico, la digestión completa puede llegar a obtenerse con tiempo de retención hasta 5 días. Con relación a esto, hoy se trabaja intensamente por lograr eficiencia de digestión con un menor volumen de digestores. Trabajos recientes de procesamientos de aguas negras o albañales y desechos industriales orgánicos diluidos, con menos del 2% de sólidos, en los cuales la carga es a flujo continuo y en estos casos se ha podido llegar a un tiempo de retención hidráulica de 10 horas. En este caso, los sólidos que incluyen a los microorganismos, por un mecanismo especial son recirculados al digestor, teniendo así un tiempo de retención superior. Otros procesos utilizan un medio de soporte sobre los cuales se fijan los microorganismos.

2.7.4 Nutrientes inhibidores en la relación carbono/nitrógeno

Para el metabolismo del sustrato, las bacterias requieren nutrientes. Se admite generalmente, una relación de C:N de 30:1. Proporciones más grandes de 150 mgN/L pueden inhibir la metanogénesis. Los sulfatos son inhibidores, si su presencia rebasa los 200 mg/L, en cantidades inferiores pueden ser benéficos, como por ejemplo, ayudando a precipitar sustancias tóxicas.

Prácticamente, toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaerobia y la cantidad y calidad del biogás producido dependerá de la composición del desecho utilizado.

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano. El carbono además de ser su constituyente básico de las bacterias es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células. La relación ideal de estos elementos en la materia prima a digerir es de 30:1, o sea 30 partes de carbono por 1 parte de nitrógeno. Esta relación puede llegar hasta 20:1 y considerarse adecuada.

Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitada. Si por el contrario, el nitrógeno se presenta en exceso se producirá más amoníaco del necesario y se inhibirá el proceso debido a que el exceso de amoníaco es tóxico. En la Tabla 2.4 se presentan valores del contenido de carbono y nitrógeno para diferentes materias orgánicas.

Entre las materias primas (desecho) más utilizadas en la generación de biogás, están los desechos animales. Este desecho tiene una relación C:N y es siempre menor que la óptima, pues el contenido tiene altas concentraciones de nitrógeno.

Por otra parte, los residuos agrícolas contienen poco nitrógeno. Por lo que se acostumbra a mezclarlos con las excretas animales buscando un valor óptimo o aceptable de la relación C:N.

Tabla 2.4 Relación C:N de diversos desechos disponibles en el medio rural (SAGARPA, 2008)

Material Desechos animales	% N (base seca)	% C (base seca)	C:N
Bovinos	17	30.6	18:1
Equinos	2.3	57.6	25:1
Ovinos	3.8	83.6	22:1
Porcinos	3.8	76.0	20:1
Aves	6.3	50.0	79:1
Excretas humanas	0.85	2.5	3:1
Desechos Vegetales			
Paja de trigo	0.53	46.0	87:1
Paja de arroz	0.63	42.0	67:1
Rastrojo de maíz	0.75	40.0	53:1
Hojas secas	1.00	41.0	41:1
Rastrojos de soya	1.30	41.0	32:1

2.7.5 Porcentaje de sólidos

El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga un digestor, es también un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se lleve a cabo en forma satisfactoria.

Experimentalmente se ha comprobado que una carga que contenga entre 7 y 9% de sólidos totales es óptima para la digestión del sistema.

De estos sólidos, normalmente entre 70 y 90% son materia orgánica biodegradable y se denomina sólidos volátiles.

2.7.6 Materias tóxicas

Existen otras sustancias que son tóxicas para las bacterias presentes en el proceso y su toxicidad resulta en una reducción, algunas veces a cero, de la producción de gas.

Sales solubles de algunos metales como cobre, zinc y níquel producen inhibición del proceso.

Sin embargo, sales alcalinas pueden acelerar o retardar el proceso dependiendo de la concentración en que se encuentren en la solución o mezcla a digerir.

En la Tabla 2.5 se muestran los intervalos de concentraciones catalizadoras e inhibidoras.

Algunos antibióticos, suministrados oralmente a los animales pueden inhibir la digestión del sistema cuando se encuentran en exceso.

2.7.7 Agitación

La agitación permite mejorar la productividad asegurando una buena homogeneidad del sustrato, evita la formación de costras y facilita la liberación de gases. Los microorganismos y la materia o sustrato deben estar en íntimo contacto para que se produzca la digestión o transformación de la materia orgánica, por lo que es necesario agitar ocasionalmente la masa interna del digestor, si se desea obtener un mejor rendimiento. La tendencia a formar "natas" o "costras" exige también de agitación, y una agitación esporádica es generalmente suficiente, especialmente en los digestores psicrófilos. No así se comportan los meso y termófilos, donde la homogenización de la temperatura es la que a veces justifica una mayor agitación. La

agitación o mezclado se puede lograr por medios mecánicos, recirculando el propio contenido del digester o reinyectando por el fondo del digester el biogás producido.

Tabla 2.5 Concentraciones de catalizadores e inhibidores (SAGARPA, 2008)

Nombre catalizador	Catalizador (mg/L)	Inhibición moderada (mg/L)	Inhibición fuerte (mg/L)
Sodio	100 – 200	3500 - 5500	8000
Potasio	200 – 400	2500 - 4500	12000
Calcio	100 – 200	2500 - 4500	8000
Magnesio	75 – 150	1000 - 1500	3000
Amonio	500 - 1000	1500 - 3000	3000

2.7.8 Características químicas de los residuos

Los desechos se caracterizan químicamente con parámetros químicos específicos. Además que la determinación de los parámetros químicos ofrecen la medición de la eficiencia del digester. A continuación se listan los más importantes.

a) Sólidos

Sólidos totales (ST): Es la suma de los sólidos disueltos y los sólidos en suspensión. Se expresa de la siguiente manera $ST=SDT+SST$.

Sólidos totales volátiles (STV): Compuestos pesados en la calcinación de los sólidos totales.

Sólidos totales fijos (STF): Corresponde a los residuos sólidos después de la calcinación a 550°C.

Sólidos suspendidos totales (SST): Cantidad de partículas flotantes o suspendidas en una columna de agua que puede ser separado del líquido por medio de métodos físicos como la filtración.

Sólidos suspendidos volátiles (SSV): Porción de materia orgánica que se puede eliminar o volatizarse cuando se quema en un horno.

Sólidos suspendidos fijos (SSF): Contenido inorgánico correspondiente a los residuos sólidos remanentes del horno.

b) Demanda química de oxígeno (DQO): Parámetro que mide la cantidad de materia orgánica e inorgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida o semisólida.

c) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): Indicador de la capacidad de contaminación de un efluente expresada por el consumo de oxígeno disuelto por parte de los microorganismos que descomponen la materia orgánica en el propio efluente.

2.7.9 Formulaciones de carga

En la Tabla 2.6, se muestran algunas formulaciones de carga con las proporciones adecuadas para diferentes tipos de desechos.

Tabla 2.6 Formulaciones de carga para un TRH de 10 días utilizando diferentes tipo de desechos (SAGARPA, 2008)

Tipo de desecho	Formulaciones (Kg)
Estiércol de vacuno	1,714 a 2,610
Desecho porcino	1,916 a 2,530
Hierbas y hojas secas	842
Chala de maíz	201 a 387
Pajas de cebada	205 a 383
Paja de arroz	170 a 333
Pajas de trigo	122 a 257

Una vez seleccionados los desechos que se van a utilizar para la primera carga, se someten a un proceso de fermentación al aire libre para eliminar la capa cerosa que cubre los residuos agrícolas. Si los materiales son introducidos en el biodigestor sin este previo tratamiento, el proceso de digestión será lento y se formará en la parte superior de la cámara de digestión una capa de nata que impedirá la formación y acumulación de hojas.

En las instalaciones de ganado bovino existe una gran cantidad de material fibroso, o presente en sus desechos, por lo que el proceso de degradación anaerobia es más lento. En la Tabla 2.7 se enuncian las características fisicoquímicas del estiércol bovino.

La cantidad de estiércol producida por un bovino, depende de su peso encontrándose valores entre 14 y 28 Kg/día.

2.7.10 Potencial redox

En cultivos puros las bacterias metanogénicas sólo actúan a un bajo potencial redox entre -300 a 330 mV, por lo que es conveniente asegurar el ambiente anaerobio.

Tabla 2.7 Características fisicoquímicas de los desechos bovinos
(SAGARPA, 2008)

Humedad (%)	ST (%)	SV (%)	C (%)	N (%)	C/N (%)
75-79	21-25	78-80	32-38	1.5-2.8	20.21

2.7.11 Cinética del proceso

Para llevar a cabo un proyecto tecnológico que depure las aguas residuales provenientes de industrias o planes pecuarios, es necesario conocer su comportamiento frente a los diferentes sistemas

anaerobios con el fin de obtener una información necesaria para diseñar correctamente el proceso (*SAGARPA, 2008*).

Esto es lo que normalmente se refiere a la cinética de un determinado desecho, con una serie de condiciones operacionales de un digestor.

Los principales parámetros a tener en consideración son: Carga orgánica aplicada, temperatura de operación y tiempo de digestión.

2.7.12 Características de las reacciones biológicas

Las reacciones biológicas bajo el punto de vista cinético y termodinámico, presentan una serie de características propias que difieren sustancialmente de otros procesos de transformación química. Éstos son procesos generalmente lentos, la actividad de los biocatalizadores son lentos, son procesos de fermentación y son procesos extraordinariamente dependientes de las condiciones ambientales (temperatura, pH y oxígeno) (*Casablanca, 1998*).

2.8 Tratamiento anaerobio

A la degradación o descomposición de la materia orgánica, en la ausencia total de aire, debido a la acción de diversas poblaciones bacterianas, se le conoce como digestión. El resultado es la obtención de un gas llamado biogás rico en metano, así como de bióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno, ácido sulfhídrico y mercaptanos. Se obtiene también un lodo estable e inodoro rico en nitrógeno, fósforo y potasio ya que puede utilizarse como mejorador de suelos (*Alonso, 1996*).

La fermentación o digestión metanogénica es la descomposición bacteriana de materia orgánica en la ausencia de aire, produciendo una mezcla gaseosa, denominada biogás. El biogás está compuesto por 50 a 70% de metano, un 30 a 45% de dióxido de carbono, 0,5 a 3% de nitrógeno, 1% de hidrógeno, 1% de oxígeno y vestigios de

anhídrido sulfuroso y de otros gases. Como la conversión enzimática se produce en un estricto proceso anaerobio, se considera frecuentemente la fermentación metanogénica como sinónimo de fermentación anaerobia. El sedimento o lodo que queda al extraer el biogás, retiene eficientemente nitrógeno presente en la biomasa, proveyendo un excelente fertilizante sin olor para cultivos agrícolas.

El proceso de fermentación metanogénica es el mismo que ocurre en la naturaleza en la producción del conocido gas de los pantanos.

La conversión de la celulosa en metano se realiza en dos pasos, cada uno catalizado por enzimas diferentes provistas por microorganismos distintos. La primera fase de hidrólisis y acidificación es la rotura de la celulosa, un polímero grande, en materia orgánica soluble de cadenas cortas y simples. La cual es entonces fermentada como proceso final en la fase metanogénica. La temperatura de digestión, mantenida por el calor autogenerado en el proceso, se encuentra generalmente entre 25 y 45°C. El proceso puede ser acelerado operando a temperatura mayor (50 a 65°C). Las bacterias responsables de la degradación y producción del gas metano se encuentran presentes en la biomasa que se emplea (estiércol de los animales y lodos cloacales) por lo que no es necesaria la inoculación, ni el cultivo de cepas especiales para la producción de biogás.

Los materiales de desecho más utilizados son el estiércol animal, los residuos industriales y urbanos, las algas, los residuos de plantas y toda sustancia orgánica con elevado contenido de humedad. El estiércol con una dilución de 9% de sólido, produce aproximadamente 140 L·biogás/Kg·materia seca·día.

El biogás obtenido mediante este proceso puede ser empleado igual que el gas natural para cocción, calefacción, accionamiento de motores de combustión interna, refrigeración por absorción, etc. Su

poder calorífico depende de la composición; para una relación 60% metano y 40% anhídrido carbónico, el poder calorífico es 21.5 MJ/m³ (Moragues y Rapallini, 2007).

2.9 Proceso de obtención de metano

El proceso global de la obtención de CH₄ es el resultado de cuatro etapas consecutivas e independientes (Bu'lock y Kristiansen, 1987; Pauss, 1987; Vesilind y Rimmer, 1981):

- 1) Hidrólisis o solubilización
- 2) Acidogénesis (acidulación) o fermentación
- 3) Acetogénesis: Conocido como un proceso de enlace entre la acidogénesis y la metanogénesis
- 4) Metanogénesis

2.9.1 Hidrólisis

Las grandes y complejas moléculas del sustrato como lípidos, glúcidos, prótidos, etc. son despolimerizados y transformados en moléculas más sencillas por la acción de bacterias hidrolíticas. Debido a que algunos residuos orgánicos naturales como residuos lignocelulósicos son muy resistentes a la acción bacteriana hidrolítica, ésta es la etapa limitante.

2.9.2 Acidogénesis

Una parte de los monómeros producidos por la hidrólisis del sustrato es transformada en ácidos grasos como ácido acético, propiónico y butírico; alcoholes como metanol y etanol; bióxido de carbono e hidrógeno, por medio de una población compleja de bacterias, en su mayoría anaerobias estrictas.

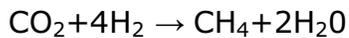
2.9.3 Acetogénesis

La función de esta etapa, es la de transformar a algunos de los productos finales de la acidogénesis que no podrían ser asimilados por la metanogénesis, en precursores de metano.

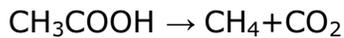
Las reacciones realizadas en esta etapa permiten evitar una acumulación de ácidos grasos volátiles, diferentes al acético, los cuales en concentraciones muy elevadas se convierten en inhibidores de la metanogénesis.

2.9.4 Metanogénesis

Las bacterias en esta etapa estrictamente anaerobias, realizan la síntesis del metano, especialmente, a partir del hidrógeno y del bióxido de carbono como se muestra en la siguiente reacción:



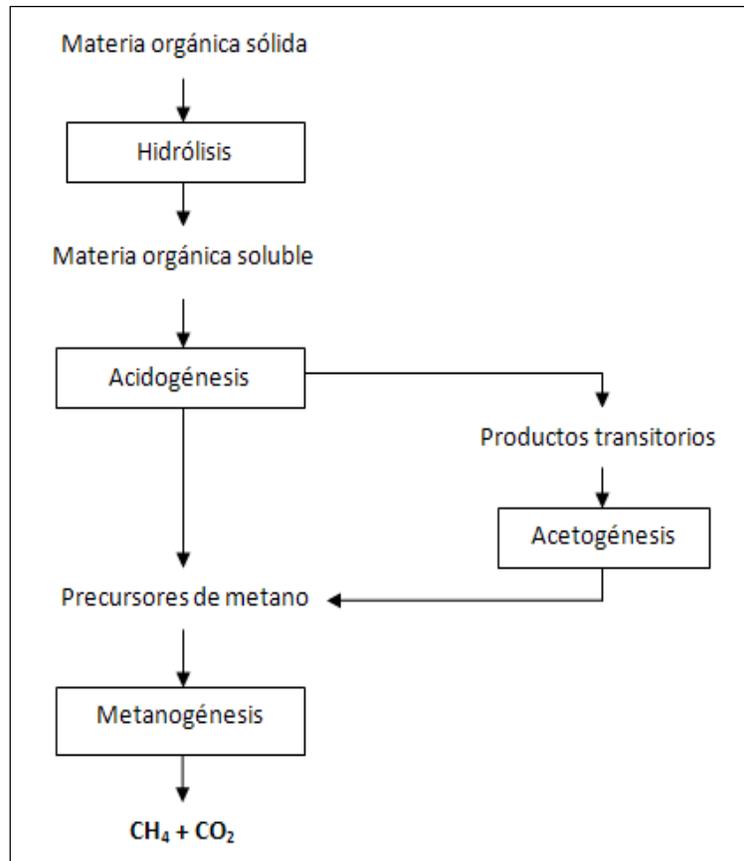
Y a partir del ácido acético la reacción



Algunas de las bacterias metanogénicas tienen una temperatura óptima de 30 a 45°C (mesofílicas) y otras entre 50 a 65°C (termofílicas). El valor óptimo del pH del medio en que actúan, está situado entre 6.5 y 8.0. La velocidad de crecimiento es baja aproximadamente 5 a 6 veces más lenta que la de las bacterias acidogénicas (*Chywoneth e Isaacson, 1987; Pauss, 1987*), lo que indica la necesidad de mayor tiempo de permanencia en el digester del desecho.

La Figura 2.5 muestra la formación de metano y bióxido de carbono, principales constituyentes del biogás.

Figura 2.5 Diagrama de flujo de la degradación anaerobia (Alonso, 1996)



2.10 Composición del biogás

La composición del biogás, así como de la participación de cada elemento depende de los diversos factores que intervienen en el proceso de la degradación anaerobia, tales como: La temperatura de operación, pH, TRH, TRS, TRM, características físicas y químicas del residuo, tipo de digester, estabilidad del sistema, etc. La inestabilidad del digester podría ocasionar grandes concentraciones de H_2S y con la retención de la población bacteriana metanogénica se enriquece el biogás de CH_4 .

Aunque, como se puede ver, el biogás es una mezcla de varios gases, típicamente es considerado como una mezcla de CH_4 , CO_2 y H_2S saturada con vapor de agua, que son los únicos componentes que realmente influyen en las propiedades físico-químicas del biogás. La mezcla puede considerarse homogénea, sobre todo si es almacenada a grandes presiones o en cortos periodos de almacenamiento a bajas presiones. En la Tabla 2.8 se resumen los elementos detectados y su participación en el biogás, producto del tratamiento de residuos orgánicos en digestores. Para fines prácticos, de aquí en adelante se considerará que el biogás está constituido sólo por CH_4 , CO_2 , H_2S y $\text{H}_2\text{O}_{\text{vap}}$.

2.11 Uso de biodigestores en zonas rurales

Se conoce que casi tres mil millones de personas en el mundo en zonas rurales emplean todavía la leña como fuente de energía para calentar agua y cocinar. Lo cual que provoca, junto a otros efectos, que anualmente se pierdan en el mundo entre 16 y 20 millones de hectáreas de bosques tropicales y zonas arboladas. En respuesta a esta situación surgen varias alternativas para llevar a cabo la cocción de alimentos, que tienen bajo impacto ambiental y su fuente de energía es considerada renovable. Una de ellas resulta de la producción de biogás a partir de la fermentación de la materia orgánica. Según la literatura, fue en la India donde se construyó la primera instalación para producir biogás, en fecha cercana al año 1900. A partir de ese momento, se ha incrementado el número de biodigestores y actualmente funcionan en ese país alrededor de doscientas mil unidades. China es la región que tiene un mayor número de este tipo de instalaciones, aproximadamente 6.7 millones (Lugones, 2008).

Tabla 2.8 Composición del biogás (*Chynoweth e Isaacson, 1987; Constant, 1989; Félix, 1979; Muñoz, 1981*)

Elemento o compuesto	% en volumen
CH ₄	47-86
CO ₂	20-40
H ₂ S	50-5,000 ppm
H ₂ O _{vap}	Saturado
H ₂	0.01-1.2
N ₂	0.1-3.0
O ₂	0.02-6.50
CO	0.001-2.100
Ar	<0.001
NH ₃	<0.001
Propano, butano, etano	-
CH ₃ SH	-

En las primeras décadas de nuestro siglo en varias ciudades de Europa, Asia y Estados Unidos, se instalaron plantas de tratamiento de aguas negras, en donde los sedimentos del alcantarillado eran sometidos a digestión. El gas producido se utilizó para el alumbrado público o como parte del combustible necesario para operar la planta de tratamiento. Alrededor de 1920, se estudió con verdadero detenimiento el procesamiento de lodos decantados de residuos urbanos, periódicamente, pequeñas cantidades de lodos en una masa grande de sustancia en descomposición anaerobia. De ahí en adelante, se generalizó aún más el uso del gas producido para el calentamiento de las propias plantas de tratamiento de residuos urbanos y como combustible de motores de dichas instalaciones (*SAGARPA, 2008*).

Durante la Segunda Guerra Mundial, en Francia y Alemania se construyeron grandes fábricas productoras de biogás que se emplearon en abastecer de energía gaseosa a tractores y vehículos. En 1941, los franceses Ducellier e Isman desarrollaron las primeras plantas denominadas: "Constrúyala usted mismo", que consistían en digestores intermitentes o lotes para campesinos. En Alemania se desarrollaron los sistemas de digestores de dos etapas intermitentes y el sistema Berlín por los ingenieros Reinhold, Noack, Ikonomoff y Gartner donde casi de la totalidad de las instalaciones se construyeron en hormigón con agitación o mezclado mecánico. El biogás se almacenaba en tanques independientes y flotantes de cubierta metálica. Desde aquí, el combustible se hacía huir por tuberías hasta las cocinas domésticas y también se comprimía en balones de acero, permitiendo su uso en tractores agrícolas. Casi todas estas fábricas de biogás cesaron de funcionar en el decenio de 1950-1959 al desarrollarse el uso de los combustibles fósiles, por la comodidad, simplicidad y bajos costos que significaban.

En la República Popular China, la explotación del biogás se remonta a los años treinta, pero los digestores construidos en esa época fueron abandonados. Durante la década de 1950 en Asia y particularmente en la India se desarrollaron modelos simples de cámaras de fermentación, más conocidas como biodigestores (gobar gas), para la producción de energía, bioabonos y saneamiento ambiental necesarios en los hogares aldeanos.

En 1958 se construyeron en China, en algunas aldeas de la provincia de Sichuan un número considerable de digestores que nuevamente fueron abandonados por simplicidad en la construcción.

En la parte Sur de África alrededor de 1961 ya se habían construido grandes digestores que producían gas para el funcionamiento de

diversos tipos de motores a partir de las experiencias desarrolladas por empresas locales en porquerizas de 1,000 animales.

Después de 1973 comenzó una oleada internacional para el desarrollo de investigaciones encaminadas a probar la conveniencia de utilizar nuevamente la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, especialmente de excrementos animales. Nuevamente la República Popular China a partir de 1974 y la República de la India a partir de 1976, emprendieron programas de ámbito nacional para popularizar la construcción de plantas domésticas de biogás en todas las zonas rurales.

Los trabajos acerca de la recuperación de energía a partir del tratamiento de los excrementos animales fueron progresando y en 1977 se construyó una gran planta de biogás en los Estados Unidos de América, cuyo digester alcanzó un volumen de 15,600 m³ de capacidad y que da tratamiento anaerobio al excremento de 100,000 toros estabulados permanentemente.

En América Latina, Guatemala fue el primer país en iniciar el desarrollo de la tecnología del biogás utilizando muy bajos volúmenes de agua y desechos vegetales y/o animales.

Desde 1954, se reporta la construcción de las primeras plantas de biogás. El concepto desarrollado en Guatemala ha sido el de producir abonos agrícolas para el sector de medianos y grandes agricultores y ganaderos mediante digestores intermitentes o de lotes. Posteriormente, México desarrolla también tecnología apropiada en este campo, construyendo plantas de biogás para uso doméstico de muy bajo costo y tecnología rudimentaria de fácil difusión.

Asia es el continente que más instalaciones de biogás ha reportado. En la República Popular China el 80% de sus habitantes residen en el

campo, o sea, alrededor de 814 millones de personas y de ellas 333 millones constituyen la fuerza laboral rural. De ahí la necesidad de encontrar soluciones energéticas factibles y económicas al alcance de los habitantes del campo.

Desde 1973 se estableció la Oficina de Difusión del Biogás y posteriormente el Centro Regional de Investigación y Capacitación en Biogás para Asia y el Pacífico Sur adjunto al Ministerio de la Agricultura. La situación actual en las zonas rurales se caracteriza por una grave escasez de energía. Alrededor de 130 millones de familias carecen de combustible doméstico durante 3 meses del año. El 70% del combustible para uso doméstico proviene de pajas y tallos de cultivos. El estado solo puede solucionar un equivalente de 85 Kg/persona año de carbón estándar, o sea, el 13% de las necesidades energéticas individuales para el sector rural.

Con estos antecedentes, el Gobierno de este país ha desarrollado un programa nacional de construcción de plantas de biogás donde en la actualidad funcionan aproximadamente 4 millones de plantas. Se considera que en el año 2015, se tendrán construidas unos 10 millones de instalaciones, aquí se aplica el concepto filosófico chino de "3 en 1" (porque se usa una carga de materia orgánica por tres de agua), donde los digestores funcionan conjuntamente con los desperdicios de los retretes, residuos de la cocina y excrementos porcinos de su crianza particular. Con esto, se logra mejorar las condiciones higiénicas del hogar, abono para sus cosechas y energía barata y segura para la cocción de alimentos, el alumbrado de la vivienda y el combustible del motor estacionario molidor de granos.

En la India, alrededor de 500,000 familias utilizan plantas de biogás para producir energía como sustituto del combustible doméstico. Un plan patrocinado por el Gobierno Indio permite el desarrollo de estas

instalaciones ante la escasez de energía en el hogar. Hoy existen plantas demostrativas multifamiliares, donde el gas se suministra por tuberías a cada vivienda sobre la base de un precio módico por consumidor. En la localidad de Masudpur, el estado ha construido una planta de biogás multifamiliar a partir de excrementos humanos y vacunos. El digestor de 194 m³ de capacidad tiene una campana de acero de 85 m³ y el biogás se envía a 162 viviendas familiares separadas de la instalación productora a 1 Km de distancia. Hoy, 31 comunidades cuentan con plantas de biogás multifamiliares que trabajan eficientemente porque son atendidas con esmero.

La utilización del biogás proveniente de los biodigestores en las zonas rurales es muy factible ya que comúnmente, en estas zonas se cuenta con la materia prima orgánica y a la vez se da un mejor aprovechamiento de los recursos logrando mejoras en la calidad de vida de la gente en dicha población.

Un biodigestor se puede construir en una semana y 15 días, después de haber colocado el estiércol con agua, se inicia la producción de gas metano.

El biodigestor es una forma barata y fácil de obtención de energía que tiene gran potencial para ser desarrollada y utilizada ampliamente en zonas rurales. Las plantas de biogás pueden ofrecer varias mejoras a las comunidades rurales, incluyéndose los aspectos descritos en los siguientes apartados.

2.11.1 Ventajas del uso de biodigestores en zonas rurales

A continuación se listan las ventajas para la utilización de biodigestores en las zonas rurales (*Earth, 2003*):

- Reducción del trabajo físico, sobre todo para las mujeres

- Humanización del trabajo de los campesinos, que antes debían buscar la leña en lugares cada vez más lejanos
- Reducción del uso de los recursos naturales como combustible y carbón de leña que permite disminuir la tala de los bosques al no ser necesario el uso de la leña para cocinar
- Producción de energía barata, diversidad de usos como alumbrado, cocción de alimentos, producción de energía eléctrica, transporte automotor y otros
- Mejoramiento del sistema de cultivo, reciclando estiércol a través de los biodigestores, producción de gas para cocinar y fertilizante. Una vez que el estiércol que se ha digerido en el biodigestor se vuelve un fertilizante orgánico excelente (bioabono), produce biofertilizante rico en nitrógeno, fósforo y potasio, capaz de competir con los fertilizantes químicos, que son más caros y dañan el medio ambiente
- Reducción de la contaminación, sobre todo en áreas urbanas.
- Eliminación de los desechos orgánicos, por ejemplo, la excreta animal, contaminante del medio ambiente y fuente de enfermedades para el hombre y los animales.
- Los digestores que se usan en zonas rurales son eficaces por las condiciones que tiene el mismo medio. Este tipo de biodigestor es de fácil aplicación por la fuente de materia prima que utilizan.

2.11.2 Desventajas del uso de biodigestores en zonas rurales

Entre las adversidades generales que presentan los biodigestores en zonas rurales al usarse los digestores de plástico por ser los más económicos y fáciles de implementar, se enuncian a continuación (*Earth, 2003*):

- Bajo tiempo de vida útil, lo que hace necesario montar una nueva instalación cada tres años.
- Vulnerabilidad a sufrir roturas por condiciones climáticas adversas, por las acciones del hombre y los animales.
- Necesita acumular los desechos orgánicos cerca del biodigestor.
- Riesgo de explosión, en caso de no cumplirse las normas de seguridad para gases combustibles.

2.12 Situación energética mundial

A nivel mundial, la fuente energética se dispone principalmente de hidrocarburos, carbón, gas e hidroenergía y nuclear, son muy pocas las veces en que las comunidades rurales tienen acceso a estas fuentes de energía por lo cual se siguen las prácticas tradicionales de obtención de energía. La tendencia creciente del consumo de energía en el mundo se da a una tasa 2 a 3% anual y está formada fundamentalmente por el petróleo, carbón y gas. En la Figura 2.6 se observa la tendencia creciente en el mundo del consumo de petróleo, gas, energía nuclear, energía hidráulica y el carbón. En la Figura 2.7 se muestran las tendencias del uso de las principales fuentes de energía para generación de energía eléctrica (*Castells y Peral, 2005*).

Figura 2.6 Energía primaria en el mundo (*Ramage, 1981*)

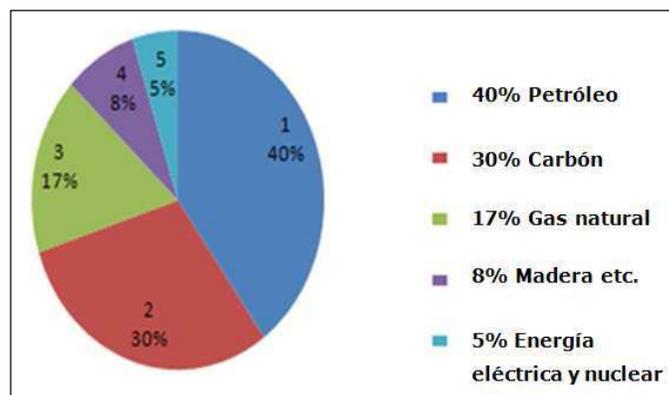
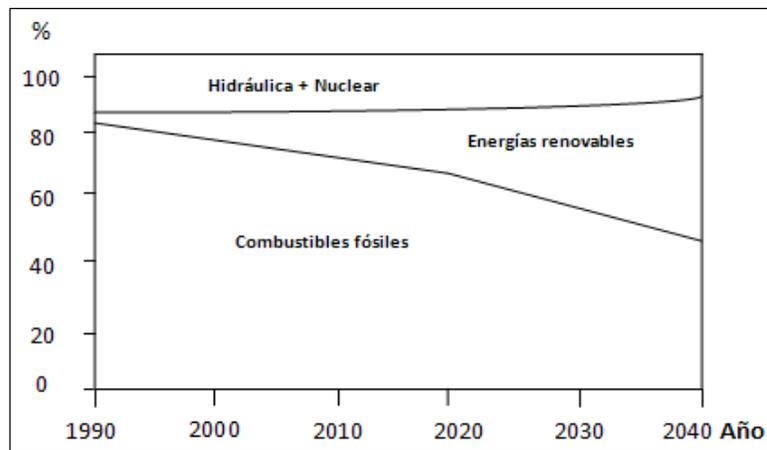
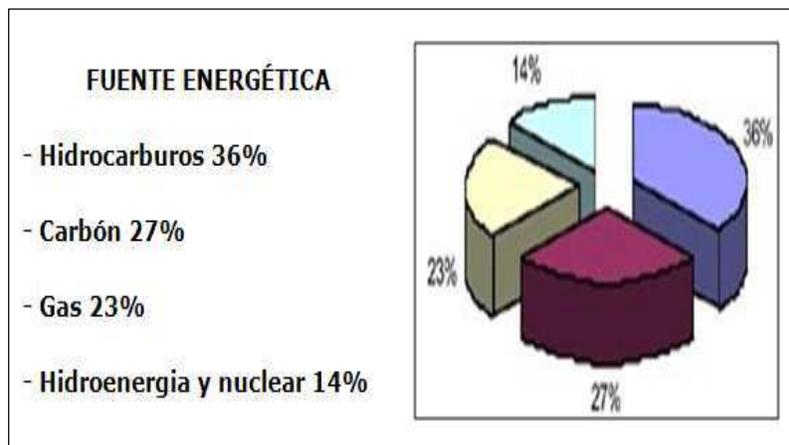


Figura 2.7 Tendencia de las fuentes empleadas para la generación de energía eléctrica (Castells y Peral, 2005)



El consumo global de energía en el mundo en el año 2005 estuvo dado por los hidrocarburos con casi 378 millones de TEP (tonelada equivalente de petróleo), siendo el 36%, el gas natural con 241 millones de TEP (23%), la hidroenergía y la nuclear hacen juntos casi 147 millones de TEP (14%) y el carbón con 284 millones de TEP (27%), que es una tendencia similar de hoy en día. En la Figura 2.8 se presenta dicha composición.

Figura 2.8 Consumo mundial de energía del año 2005 a la fecha (OLADE, 2005)



CAPÍTULO III

3.1 Instalación de biodigestores en Amanalco, Estado de México

En el presente proyecto se pretende hacer una instalación *in situ* de biodigestores o un solo digestor en una de las comunidades rurales del Estado de México, en el Municipio de Amanalco de Becerra en las comunidades Rincón de Guadalupe primera y segunda sección.

Esta iniciativa se da en la comunidad pues hay gran cantidad de residuos orgánicos que son directamente desechados al medio ambiente. Los residuos orgánicos como excretas de porcinos, ganado vacuno y de las piscifactorías son los desechos orgánicos principales.

Los residuos constituyen una fuente importante de contaminación ya que, al ser arrojados directamente a la superficie terrestre emiten gases metano y bióxido de carbono. Los cuales, son unos de los principales GEI (gases generadores de efecto invernadero) que provocan el sobrecalentamiento de la tierra. Los CFCs son químicamente inertes, resisten los ataques de moléculas, radicales y radiación UV presente en la tropósfera, y no se depositan en gran cantidad ni en clima seco ni lluvioso (*Harrison, 1999*).

La implementación de biodigestores permite aprovechar los residuos orgánicos, asimismo implementar las prácticas tecnológicas como alternativas de fuente de energía y además reducir los efectos contaminación. Se evita conjuntamente las enfermedades patógenas transmitidas por los restos de animales y en el proceso de obtención de biogás. Se aprovecha el producto para gas doméstico y los restos como son lodos que se drenan para posteriormente fertilizar las parcelas agrícolas disminuyendo sus contenidos de bacterias

(coliformes fecales) que pueden ocasionar enfermedades al ser humano.

Al usar el lodo estabilizado, por sus propiedades ácidas permite la posibilidad para una futura incorporación como abono en los campos de cultivo.

El sector que tiene mayor importancia de emisión contaminante de CO₂, es la actividad ganadera ya es una de las fuentes más importantes de metano (CH₄). El metano es un gas de efecto invernadero cuyo potencial de calentamiento es 21 veces mayor que el CO₂ pues contribuye con 6% de las emisiones totales de este gas en México (*Mentado, 2008*).

3.2 Inquietudes y puntos de vista de los pobladores de Amanalco sobre la problemática energética y ambiental

Estos resultados se obtuvieron mediante la investigación directa por medio de entrevistas personales a los campesinos de las comunidades de Amanalco. Lo recabado en esta investigación mostró que los campesinos están dispuestos a cooperar en la implementación de los biodigestores para obtener energía de ellos. Lo observado en la investigación fue lo que a continuación se lista:

- 1.- La población quema leña fomentando la tala inmoderada.
- 2.- La cocción de los alimentos algunas veces usan como combustible el PET, pero este al ser quemado genera una sustancia toxica llamado dioxino que son generadoras de cáncer.
- 3.- Pocas personas tienen un ingreso para pagar la electricidad pero no es fácil a su acceso. Por lo tanto, no es posible tener energía eléctrica en los hogares.

4.- La gente está interesada en este tipo de tecnología, ya que grupos de personas podrían pagar hasta un motogenerador de electricidad.

5.- La comunidad se dedica a las actividades ganaderas y agrícolas generando residuos orgánicos como son estiércol. Estos residuos provienen principalmente de vacas, borregos, peces, y además restos de plantas como caña de maíz, restos de trigo en forma de paja; que se pueden degradar en los biodigestores.

6.- Al ser una comunidad que se dedica casi en su mayoría a la actividad piscícola, todos los restos de los peces son arrojados directamente al agua que generan contaminación a los mantos acuíferos y la contaminación de la superficie terrestre. Se propicia la proliferación de bacterias y la posibilidad de infección para los habitantes.

7.- La gente no tiene conocimiento sobre este tipo de tecnología. Ellos desconocen si es una posibilidad para obtener energía. También desconocen si hay alguna institución pública o privada con apoyo económico como son subsidios o asesorías y capacitación para implementar estas alternativas energéticas y ecológicas.

8.- El alimento de los peces al ser arrojados al agua como alimento de las truchas no es consumido en su totalidad. El 6% de este alimento se sedimenta que al ser drenado de la piscifactoría se desecha también, y éste sigue generando contaminación. Pero con la alternativa de implementación de biodigestores, este sedimento se puede utilizar como materia prima para generar biogás.

9.- Las personas normalmente usan letrinas, pero este tipo de desperdicio orgánico también se puede utilizar como materia prima para los biodigestores.

10.- La comunidad quema como combustible desechos de plásticos, cartón, leña y pilas. Sus cenizas se esparcen por el aire o el agua contaminando.

11.- La mayoría de los campesinos tienen animales domésticos y se dedican a las actividades agrícolas, generando residuos orgánicos que podrían ser implementados como materia orgánica.

12.- En sus cocinas, los alimentos se preparan con un fogón de leña al piso en un cuarto de madera, mismo que puede ocasionar accidentes en el hogar.

13.- Los estanques de los peces tienen 10 centímetros de desperdicios de alimentos y excretas en el fondo de los estanques que se drenan cada mes. En algunos casos los estanques son de 20 m de largo y 10 de ancho (20 m³) considerando que el volumen de materia orgánica es 6% de las truchas, es decir, 40L de desecho. Es desecho es factible como materia orgánica para alimentar el biodigestor que se va proponer.

14.- En la comunidad se cuenta con nacimientos de agua para alimentar los biodigestores

15.- En la comunidad les gustaría tener cocina con gas.

16.- Pagan \$250 trimestral por uso de agua a CNA (Comisión Nacional del Agua).

17.- En el municipio de Amanalco, la mayoría de su población está asentada en zonas rurales carentes de medios y recursos. Por lo cual es viable la implementación de biodigestores para responder a las necesidades energéticas y ahorrar en la economía familiar.

18.- El dinero para implementar los proyectos pueden ser financiados por el gobierno del Estado de México apoyando hasta un 50% del

costo, o por entidades privadas y en algunos casos asociaciones civiles que apoyan proyectos ecológicos.

19.- 90% de los sólidos provienen de corte de hierba y verduras de desecho.

Con los restos orgánicos como son vísceras y otros desechos, se pueden producir biogás, y el lodo digerido puede ser alimentos para las mismas truchas. Además de utilizar como fertilizante los lodos biológicos tratados.

3.3 Localización del lugar de estudio municipio de Amanalco, Estado de México

El estudio de la implementación de biodigestores en el municipio de Amanalco, Estado de México (Figura 3.1) es viable. Esto debido a las características del lugar como son extensión, orografía, hidrografía y de clima; las características se indican posteriormente.

Se eligió como zona de estudio el municipio de Amanalco, pero en los municipios aledaños como se listan en la Tabla 3.1 como son Valle de Bravo, Villa Victoria, pueden también implementarse el uso de biodigestores pues tienen las mismas condiciones naturales.

Las poblaciones del municipio de Amanalco de Becerra son en su mayoría rurales y cuentan con los medios naturales como son clima templado, temperatura media de 13.4°C, agua, zonas agrícolas de cultivo, todos estos son necesarios para la implementación de sistemas anaerobios. Una foto satelital como se muestra en la Figura 3.2, se observa que es un medio rural y con los recursos naturales necesarios para la instalación *in situ* de biodigestores.

3.4 Características del lugar de estudio, Municipio de Amanalco, Estado de México

Se localiza en la parte central de la porción occidental del Estado de México (Figura 3.3) ligeramente al Oeste de Toluca, la capital, pertenece a la Región VIII, Valle de Bravo (*Salinas, 2003*).

Figura 3.1 Mapa geográfico de Amanalco de Becerra, Estado México
(INEGI, 2005)

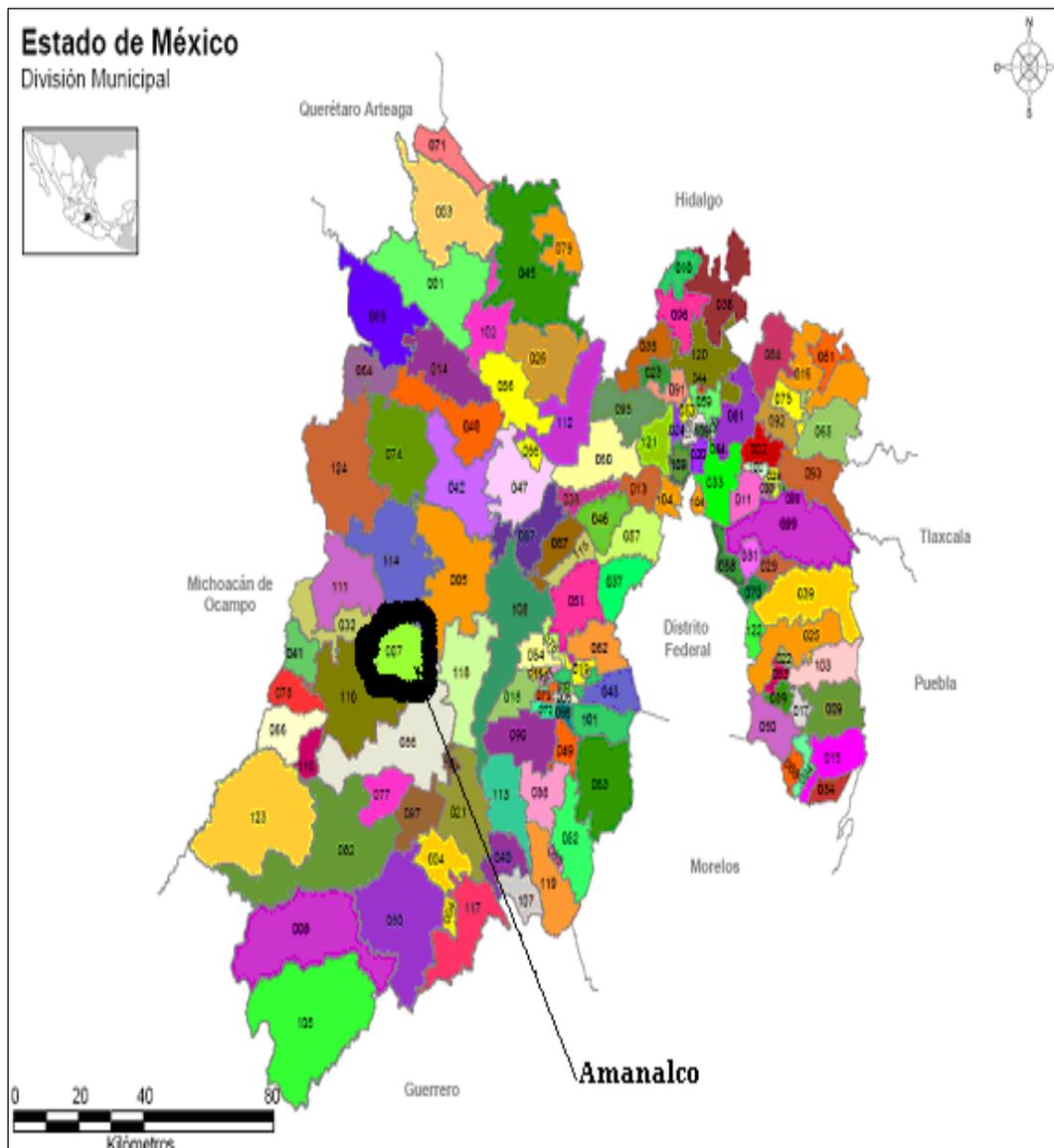


Tabla 3.1 Nombre de los Municipios del Estado de México (*INEGI, 2005*)

Estado de México		
División municipal		
001 Acambay	043 Xalatlaco	085 Temascalcingo
002 Acolman	044 Jaltenco	086 Temascaltepec
003 Aculco	045 Jilotepec	087 Temoaya
004 Almoloya de Alquisiras	046 Jilotzingo	088 Tenancingo
005 Almoloya de Juárez	047 Jiquipilco	089 Tenango del Aire
006 Almoloya del Río	048 Jocotitlán	090 Tenango del Valle
007 Amanalco	049 Joquicingo	091 Teoloyucán
008 Amatepec	050 Juchitepec	092 Teotihuacán
009 Amecameca	051 Lerma	093 Tepetlaoxtoc
010 Apaxco	052 Malinalco	094 Tepetlaxpa
011 Atenco	053 Melchor Ocampo	095 Tepozotlán
012 Atizapán	054 Metepec	096 Tequixquiac
013 Atizapán de Zaragoza	055 Mexicaltzingo	097 Texcaltitán
014 Atlacomulco	056 Morelos	098 Texcalyacac
015 Atlautla	057 Naucalpan de Juárez	099 Texcoco
016 Axapusco	058 Nezahualcóyotl	100 Tezoyuca
017 Ayapango	059 Nextlalpan	101 Tianguistenco
018 Calimaya	060 Nicolás Romero	102 Timilpan
019 Capulhuac	061 Nopaltepec	103 Tlalmanalco
020 Coacalco de Berriozábal	062 Ocoyoacac	104 Tlalnepantla de Baz
021 Coatepec Harinas	063 Ocuilán	105 Tlatlaya
022 Cocotitlán	064 El Oro	106 Toluca
023 Coyotepec	065 Otumba	107 Tonatico
024 Cuautitlán	066 Otzolotepec	108 Tultepec
025 Chalco	067 Otzolotepec	109 Tultitlán
026 Chapa de Mota	068 Ozumba	110 Valle de Bravo
027 Chapultepec	069 Papalotla	111 Villa de Allende
028 Chiautla	070 La Paz	112 Villa del Carbón
029 Chicoloapan	071 Polotitlán	113 Villa Guerrero
030 Chiconcuac	072 Rayón	114 Villa Victoria
031 Chimalhuacán	073 San Antonio la Isla	115 Xonacatlán
032 Donato Guerra	074 San Felipe del Progreso	116 Zacazonapan
033 Ecatepec de Morelos	075 San Martín de las Pirámides	117 Zacualpan
034 Ecatzingo	076 San Mateo Atenco	118 Zinacantepec
035 Huehuetoca	077 San Simón de Guerrero	119 Zumpahuacán
036 Hueyopxtla	078 Santo Tomás	120 Zumpango
037 Huixquilucan	079 Soyaniquilpan de Juárez	121 Cuautitlán Izcalli
038 Isidro Fabela	080 Sultepec	122 Valle de Chalco Solidaridad
039 Ixtapaluca	081 Tecámac	123 Luvianos
040 Ixtapan de la Sal	082 Tejupilco	124 San José del Rincón
041 Ixtapan del Oro	083 Temamatla	125 Tonanitla
042 Ixtlahuaca	084 Temascalapa	

www.cuentame.inegi.gob.mx
FUENTE: INEGI, Marco Geoespacial Municipal 2005

3.4.1 Características físicas del municipio de Amanalco

El municipio de Amanalco, por ser el lugar de ubicación de estudio presenta las siguientes características (*Salinas, 2003*).

3.4.2 Extensión

El municipio cuenta con una extensión territorial de 219.5 Km². Sus colindancias con los municipios aledaños son: (Figura 3.4).

Al norte: Villa Victoria y Villa de Allende

Al sur: Valle de Bravo y Temascaltepec

Al este: Almoloya de Juárez y Zinacantepec

Al oeste: Donato Guerra y Valle de Bravo

Se ubica entre las siguientes coordenadas geográficas extremas:

Latitud norte: 19°18´

Latitud sur: 19°10´

Longitud este: 99°54´

Longitud oeste: 100°05´18"

Por lo que respecta a su localización el municipio de Amanalco, la cabecera municipal se localiza a 19° 15' de latitud norte y 100° 01' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, y a 2,320 msnm (metros sobre nivel del mar).

Figura 3.2 Ubicación geográfica del Rincón de Guadalupe (*Google
Hearth, 2008*)



Figura 3.3 Ubicación de Amanalco en el Estado de México (*Salinas, 2003*)

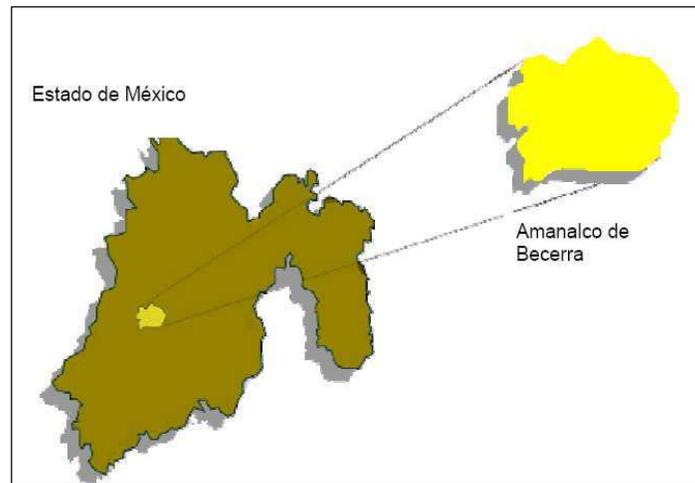


Figura 3.4 Municipios vecinos de Amanalco (*Municipio de Amanalco, 2003*)



3.4.3 Orografía

Predomina en la región el sistema montañoso que prolonga la sierra del volcán Xinantécatl hasta la sierra Náhuatl en el Estado de Michoacán. Una parte es propicia para la agricultura de temporal y de

riego. Cuenta con múltiples mantos acuíferos que dan fertilidad al suelo. El terreno muy accidentado en todo el municipio. Forma pequeñas prominencias que en muchos casos se elevan hasta formar cerros, entre los que se abren amplias y profundas cañadas, quebradas y barrancas. De entre los cerros destacan: La Cumbre, Agua Bendita, El Faro o cerro de Los Órganos, Vilchis, El Huacal, Hacienda Nueva, Corral de Piedra; El Rincón de Guadalupe y San Mateo, La Cal, cerro de San Miguel Tenextepec, cerro de Pipioltepec, San Juan, Laguna Seca y Capilla Vieja, Lodo Prieto, Cañada Obscura, Los Órganos, el de El Faro; Caballero, San Bartolomé; Los Reyes y El Coporito, entre otros.

3.4.4 Hidrografía

En cuanto a su hidrología, el municipio de Amanalco de Becerra cuenta con 2 ríos y 432 manantiales. El río más importante es el Grande Amanalco que alimenta a las presas de Avándaro, Colorines e Ixtapantongo. Entre los manantiales destacan: Los Mimbres, La Mulita, El Jazmín, Chupamuerto, San Bartolo, Casa Blanca, San Mateo, San Lucas, Las Peñitas, Ojo de Agua, Tenextepec y el de Chimalpa.

3.4.5 Clima

El clima en este municipio es sub-húmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 13.4°C, con una máxima de 29.7°C y una mínima de 0.5°C. La temporada de heladas se registra de noviembre a abril. La precipitación pluvial promedio es de 1,155.9 milímetros. En invierno se presentan heladas muy intensas y en época de lluvias fuertes granizadas y vientos que soplan de occidente a oriente; en febrero y marzo los del sur; en invierno se registran algunas nevadas.

3.4.6 Recursos naturales

Propiamente todo el territorio municipal es una reserva ecológica, ya que cuenta con abundante flora y fauna, abundantes manantiales y dos ríos que han evitado el deterioro natural.

3.5 Datos estadísticos del municipio de Amanalco

La mayoría de la población de Amanalco, sus habitantes viven en zonas rurales, como se observa en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Población rural de Amanalco (INEGI, 2005)

Localidad	Pob. Total	Porcentaje	Tamaño
Total Municipal	20,343	-	-
Amanalco De Becerra	1,044	5.13	Rural
Agua Bendita	596	2.93	Rural
El Ancon	129	0.63	Rural
Capilla Vieja	191	0.94	Rural
Capulin Primera Sección	570	2.80	Rural
Hacienda Nueva	71	0.35	Rural
Huacal Viejo	180	0.88	Rural
El Pedregal	253	1.24	Rural
El Potrero	1,155	5.68	Rural
Rincón De Guadalupe	1,015	4.99	Rural
San Bartolo	2,316	11.38	Rural
San Jeronimo	1,806	8.88	Rural
San Juan	2,336	11.48	Rural
San Lucas	1,009	4.96	Rural
San Mateo	1,642	8.07	Rural
San Miguel Tenex-tepec	876	4.31	Rural
San Sebastian Chico	471	2.32	Rural
San Sebastian Grande	816	4.01	Rural
Temporal	293	1.44	Rural
El Zacatonal	89	0.44	Rural
Polvillos	1,158	5.69	Rural
Pueblo Nuevo	683	3.36	Rural
Corral De Piedra	246	1.21	Rural
Capulin Tercera Sección	474	2.33	Rural
San Lucas Cuarta Sección	226	1.11	Rural
Ojo De Agua	32	0.16	Rural
Providencia	139	0.68	Rural
San Jeronimo	251	1.23	Rural
El Capulin Segunda Sección	275	1.35	Rural

3.5.1 Datos estadísticos obtenidos en la población de estudio

Con base en la investigación de campo que se llevó a cabo en distintas comunidades del municipio de Amanalco, Estado de México. La obtención de los resultados se ve en la Tabla 3.3 (*Alcalde, 2008*).

Tabla 3.3 Población y habitantes de las comunidades visitadas
(*Alcalde, 2008*)

Localidad	No. de habitantes
San Bartolomé	1,952
San Jerónimo	1,946
San Mateo	1,531
San Juan	1,288
San Lucas	1,141
Polvillos (San Bartolomé 5ª. Sección)	1,021
Rincón de Guadalupe	890
El Capulín	883
San Miguel Tenextepec	824
San Sebastián El Grande	786

3.6 Piscifactorías en el municipio de Amanalco

En el municipio de Amanalco existen varias comunidades que se dedican como actividad principal a la cría de trucha, estas localidades se observan en la Tabla 3.4 (*INEGI, 2005*).

Tabla 3.4 Piscifactorías en Amanalco (INEGI, 2005)

Comunidad	Unidad de producción	Nombre del productor	Capacidad de producción		Producción Ton/año
			Estimada (Ton)	Actual (Ton)	
Rincón de Guadalupe	Los Ayles	Alfredo Quintero	-	3.75	9.8
	Dameje	Domingo de la Cruz	1.50	1.50	
	La Joya	Guadalupe Mondragón V.	1.45	4.50	
San Sebastián el Chico	El Salto	José Guadalupe C.	2.40	0.90	5.3
	San Mateo	Margarito Ramos	2.00	2.00	
	El Salto	Manuel García	-	2.40	
San Lucas	Los Mimbres	Juan W. García L.	6.50	2.30	33.6
	Rancho Feshi	Abraham Arista P.	40.00	20.0	
	La Cueva	Juan Carlos de la C.	0.50	0.50	
	Las Garzas	Emilio Lucas C.	2.30	1.80	
	Cañada Oscura I	Alejo Orozco de la C.	6.10	3.00	
	Cañada Oscura II	Aurelio López	2.60	6.00	
San Jerónimo	Conejeras I	Víctor Trinidad	3.70	2.30	43.0
	Conejeras II	Felipe Esquivel	2.80	1.70	
	Conejeras III	Félix Lozano G.	2.80	1.70	
	Conejeras IV	Lazar Felipe L.	2.80	1.70	
	Conejeras V	Genaro Mariano	1.00	0.60	
	Los Alevines	Alejandro Medina G.	40.00	32.00	
	Agustín Álvarez	Agustín A.	2.00	3.00	
Producción total de trucha en Amanalco					91.7

3.7 Origen de los residuos orgánicos del municipio de Amanalco

Se propone disponer de los residuos orgánicos generados de la actividad piscícola y agropecuaria en el municipio principalmente. Con esto se pretende reducir el problema de la contaminación, además de proveer combustible a las zonas rurales por el biogás generado de la degradación anaerobia de la materia orgánica. Este estudio podrá constituir un desarrollo para las comunidades en términos no solo ambientales sino también económicos, energéticos, sociales y de salud. El municipio de Amanalco alberga 13 comunidades: Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección, San Sebastián Chico 1ª y 2ª sección, San Lucas 1ª y 2ª y 3ª sección, Amanalco de Becerra, San Lucas 4ª sección (San Francisco), San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección y San Jerónimo 1ª y 2ª sección. En la Tabla 3.5 se muestran datos relevantes para el estudio del año 2005 del municipio (INEGI, 2005).

Tabla 3.5 Desechos orgánicos de las comunidades de Amanalco
(INEGI, 2005)

Población	Habitantes	Casas	Sólidos orgánicos Kg/día	Piscifactorías	Producción de trucha Ton/año
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma)	985	201	413.7	3	9.8
San Sebastián Chico 1ª y 2ª sección	473	108	198.7	3	5.3
San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección	862	178	362.0	0	0
San Lucas 1ª y 2ª y 3ª sección	1,217	260	511.1	6	33.6
San Lucas 4ª sección (San Francisco)	278	53	116.8	0	0
Amanalco de Becerra	1,362	314	572.0	0	0
San Jerónimo 1ª y 2ª sección	1,931	391	811.0	7	43.0

3.8 Producción diferentes residuos orgánicos en Amanalco

Con la información contenida en la Tabla 3.4 se puede obtener la cantidad por día de: excretas de truchas, excretas de seres humanos y la cantidad de residuos sólidos; los residuos sólidos comprenden desechos de cocina, basura orgánica en general que desecha una persona diariamente.

3.8.1 Residuos de truchas

La producción de residuo de trucha se puede obtener de la producción de truchas y solo el 6% son residuos de las truchas, como se ejemplifica en el siguiente cálculo (*Brambila, 2008*):

$(9,800 \text{ Kg}/365\text{días})=26.84 \text{ Kg/día}$, luego solo el 6% es desecho

$(26.84 \text{ Kg/día}) * 0.06 = 1.61 \text{ Kg/día}$ de residuos de trucha

La producción de residuos de truchas por comunidad se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Residuos de trucha por día en Amanalco

Población	Piscifactorías	Producción de trucha Ton/año	Producción de residuos de trucha Kg/día
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma)	3	9.8	1.61
San Sebastián Chico 1ª y 2ª sección	3	5.3	.87
San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección	0	0	0
San Lucas 1ª y 2ª y 3ª sección	6	33.6	5.52
San Lucas 4ª sección (San Francisco)	0	0	0
Amanalco de Becerra	0	0	0
San Jerónimo 1ª y 2ª sección	7	43.0	7.068

3.8.2 Residuos de excretas humanas

Con la información contenida en la Tabla 3.4 se puede obtener la cantidad de excremento por habitante de cada comunidad al día utilizando la proporción por persona de 0.3 Kg/hab·día (*Brambila, 2008*).

Ejemplo de cálculo:

$$985 \text{ habitantes} \cdot 0.3 \text{ Kg excreta/hab} \cdot \text{día} = 295 \text{ Kg excreta/día}$$

La producción diaria de residuos por excretas de todas las comunidades de Amanalco se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Residuos de excretas humanas por día de cada población

Población	Habitantes	Kg excreta/día
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma)	985	295.5
San Sebastián Chico 1ª y 2ª sección	473	141.9
San Miguel Tenextepac 1ª y 2ª sección	862	258.6
San Lucas 1ª y 2ª y 3ª sección	1,217	365.1
San Lucas 4ª sección (San Francisco)	278	83.4
Amanalco de Becerra	1,362	408.6
San Jerónimo 1ª y 2ª sección	1,931	579.3

3.8.3 Residuos de sólidos orgánicos

Con la información contenida en la Tabla 3.4 se puede obtener la cantidad sólidos orgánicos por día. Los sólidos orgánicos comprenden todos los restos diferentes a las excretas como son cáscara de fruta, desecho de comida, verduras. Estos se calculan multiplicando el número de habitantes por 0.420 Kg que es promedio de basura orgánica que produce una persona diariamente (*Pedroso, 2006*).

La producción diaria de residuos por sólidos orgánicos por comunidad se muestra en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Residuos de sólidos orgánicos por día de cada población

Población	Habitantes	Sólidos orgánicos Kg/día
Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma)	985	413.7
San Sebastián Chico 1ª y 2ª sección	473	198.7
San Miguel Tenextepec 1ª y 2ª sección	862	362.0
San Lucas 1ª y 2ª y 3ª sección	1,217	511.1
San Lucas 4ª sección (San Francisco)	278	116.8
Amanalco de Becerra	1,362	572.0
San Jerónimo 1ª y 2ª sección	1,931	811.0

3.9 Producción de biogás de acuerdo al tipo de desecho

Con base en la literatura se muestra en la Tabla 3.9, parámetros de producción de biogás de los residuos orgánicos de personas o de diferentes animales y la producción de metano por kilogramo de los diferentes residuos (Pedroso, 2006).

Tabla 3.9 Cantidad de biogás obtenido para diferentes tipos de desechos orgánicos (Pedroso, 2006)

Material Origen	Kg de excreta/ animal/día	m³ biogás/animal/día	m³ biogás/ Kg_{residuo}	m³ CH₄/kg_{residuo}
Vacas	15	0.60	0.40	0.24
Caballos	15	0.60	0.40	0.24
*Truchas	0.015	0.00375	0.25	0.15
Basura	-	-	0.086	0.052
Niños	0.20	0.014	0.07	0.042
Adultos	0.40	0.028	0.07	0.042
Cerdos	1.5	0.10	0.06	0.036
Gallinas	0.15	0.009	0.06	0.036
Carneros	2	0.10	0.05	0.03
Terneritas	4	0.16	0.04	0.024

* (Ayala, 2008)

3.10 Ejemplo de cálculo de la producción de metano en una piscifactoría de las comunidades de Amanalco

El siguiente cálculo es para predecir la producción de metano en una piscifactoría. Específicamente este cálculo es de la población Rincón de Guadalupe 1ª y 2ª sección (La Loma) con datos obtenidos directamente de la Tabla 3.4.

Los datos a utilizar son la cantidad de trucha producida por un año y el factor de conversión de metano por kilogramo de residuo. El cálculo se desarrolla de la siguiente manera:

$$9.8 \text{ Ton (1000 Kg/1 Ton)} = 9,800 \text{ Kg}$$

$9,800 \text{ Kg}/365 \text{ días} = 26.84 \text{ Kg/día}$ de residuo de trucha pero como solo el 6% del residuo es de trucha entonces

$$26.84 \text{ Kg/día} * 0.06 = 1.61 \text{ Kg/día}$$

Con datos de la Tabla 3.9, 1 kilogramo de trucha produce 0.25 m^3 de biogás entonces:

$$1.61 \text{ Kg/día} * 0.25 \text{ m}^3 \text{ de biogás} = 0.4025 \text{ m}^3 \text{ de biogás}$$

Solo el 60% del biogás es metano entonces:

$$0.4025 \text{ m}^3 \text{ de biogás} * 0.6 = 0.2415 \text{ m}^3 \text{ de CH}_4$$

Finalmente todos los resultados de producción de biogás y consecuentemente la producción de metano se presentan en la Tabla 3.10 para todas las comunidades de Amanalco que cuentan con granjas piscícolas.

Tabla 3.10 Producción de biogás por granja piscícola de la zona Amanalco

Comunidad	Piscifactorías	Producción de trucha Ton/año	Residuos de trucha Kg/día	Producción de biogás/día (m ³)	Producción CH ₄ /día (m ³)
Rincón de Guadalupe 1 ^a y 2 ^a sección (La Loma)	3	9.7941	1.610	0.4025	0.2415
San Sebastián chico 1 a y 2 ^a sección	3	5.2925	0.87	0.2175	0.1305
San Lucas 1 a, 2 ^a y 3 ^a sección	6	33.58	5.52	1.38	0.828
San Jerónimo 1 a y 2 ^a sección	7	42.997	7.0680	1.767	1.060

Estos resultados de biogás obtenidos son solo para los residuos de truchas, en la Tabla 3.11 están las cantidades totales de cada comunidad de Amanalco y considera residuos de truchas, residuos de excretas humanas y residuos sólidos.

3.11 Producción total de metano en las comunidades de Amanalco

Para calcular la cantidad total de metano producido de todas las comunidades de Amanalco se usan los datos de las Tablas 3.6, 3.7, 3.8 en las que contienen información del origen del residuo, kilogramos de residuos producidos. Cada kilogramo de cada tipo de residuo se multiplica por el factor de conversión de producción de metano, para el caso del residuo de trucha se multiplica por 0.15 m³CH₄/kg de residuo, el de excretas humanas por 0.042 m³CH₄/kg de residuo y el de sólidos orgánicos por 0.052 m³CH₄/kg de residuo, estos datos son obtenidos de la Tabla 3.9.

Los resultados se muestran en la Tabla 3.11. Los factores de conversión fueron tomados de la literatura para poder convertir directamente el 60% del biogás a metano (*Pedroso, 2006*).

Tabla 3.11 Producción total de metano en las comunidades de Amanalco

Población	Origen residuo	Residuo producido Kg/día	m³ CH₄/Kg de residuo	m³ CH₄/día
Rincón de Guadalupe 1 ^a y 2 ^a sección (La Loma)	Trucha	1.61	0.15	34.16
	Excreta	295.5	0.042	
	Sólidos orgánicos	413.7	0.052	
San Sebastián Chico 1 ^a y 2 ^a sección	Trucha	0.87	0.15	16.42
	Excreta	141.9	0.042	
	Sólidos orgánicos	198.7	0.052	
San Miguel Tenex-tepec 1 ^a y 2 ^a sección	Trucha	0	0.15	29.68
	Excreta	258.6	0.042	
	Sólidos orgánicos	362	0.052	
San Lucas 1 ^a y 2 ^a y 3 ^a sección	Trucha	5.52	0.15	42.73
	Excreta	365.1	0.042	
	Sólidos orgánicos	511.1	0.052	
San Lucas 4 ^a sección (San Francisco)	Trucha	0	0.15	9.57
	Excreta	83.4	0.042	
	Sólidos orgánicos	116.8	0.052	
Amanalco de Becerra	Trucha	0	0.15	46.90
	Excreta	408.6	0.042	
	Sólidos orgánicos	572	0.052	
San Jerónimo 1 ^a y 2 ^a sección	Trucha	7.068	0.15	67.56
	Excreta	579.3	0.042	
	Sólidos orgánicos	811	0.052	

Sumando el metano producido en todas las comunidades se obtienen 247.05 m³CH₄/día para ser usado como combustible.

Haciendo un análisis de este resultado: Si un m³ de biogás puede calentar 110 L de agua, 1m³ de metano calentaría 183.33 L de agua, (ver Figura 3.5).

$247.05 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 * (183.33 \text{ L}/1 \text{ m}^3) = 45,291.70 \text{ L de agua caliente}$

Si la población total de Amanalco es de 7,108 habitantes entonces:

$(45,291.70 \text{ L} / 7,108 \text{ habitantes}) = 6.45 \text{ L/habitante}$

Es decir, si se usa como combustible el gas metano se calentarían 6.45 L de agua para cada habitante del municipio, considerando que comunidades como Amanalco que es la cabecera municipal. Sin considerar que algunas comunidades como la cabecera municipal no tiene animales o granjas para producir desechos orgánicos. Si solo se utilizaría el gas metano en las comunidades donde hay mayor producción de residuos orgánicos. El metano generado en las comunidades de mayor producción de residuos orgánicos cubriría la demanda de los pobladores de las zonas carentes de recursos económicos y energéticos.

3.12 Casos de estudio propuestos para el diseño e implementación de un digestor

Se proponen tres casos con diferentes números de personas y varios tipos de animales que son situaciones comunes en las granjas rurales. Los casos número I, II y III son situaciones reales de los datos obtenidos directamente en las comunidades de Amanalco. Los resultados de la obtención de metano se muestran en las Tablas 3.12, 3.13 y 3.14 respectivamente, que posteriormente se evaluarán para la selección de un biodigestor.

Para los resultados obtenidos de los casos se usa el procedimiento con el siguiente análisis:

Análisis de los residuos de truchas en una piscifactoría con 2000 truchas:

$$(2000 \text{ truchas}) \left(0.015 \frac{\text{Kg residuos}}{\text{trucha} * \text{día}} \right) = 30 \text{ Kg} \frac{\text{Kg residuos}}{\text{día}}$$

Cada kilogramo de residuo orgánico de trucha produce 0.25 m³ biogás (Ayala, 2008):

$$30 \frac{\text{Kg residuos}}{\text{día}} \left(0.25 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{Kg residuo}} \right) = 7.5 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}}$$

Pero de 7.5 m³ de biogás solo el 60% es CH₄ (gas metano) entonces

$$0.6 \frac{\text{CH}_4}{\text{biogás}} \left(7.5 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{día}} \right) = 4.5 \frac{\text{CH}_4 \text{ m}^3}{\text{día}}$$

Por lo tanto en una piscifactoría con 2000 truchas se obtiene 4.5 CH₄ en un día y este puede servir como combustible.

Los casos I, II y III usan este procedimiento para cada tipo de residuo y así finalmente obtener la cantidad de metano producido.

Caso I: Granja con 6 borregos, 7 cerdos, 10 personas, 2,000 truchas

En el presente caso se hace un análisis usando los factores de conversión de metano de la Tabla 3.9.

Tabla 3.12 Generación de metano para una granja con 6 borregos, 7 cerdos, 10 personas, 2,000 truchas (Caso I)

Material origen	Total de animales o personas	Kg de excreta/ animal*día	Total de Kg de excreta producidos	m ³ biogás/ animal*día o persona*día	Total m ³ biogás/ día	m ³ CH ₄ /día
Carneros	6	2	12	0.10	0.6	0.36
Cerdos	7	1.5	10.5	0.10	0.7	0.42
Personas	10	0.40	4	0.028	0.28	0.168
Truchas	2,000	0.015	30	0.00375	7.5	4.5
Total			76.5		9.08	5.45

Producción diaria de metano: 5.45 m³

De la Tabla 3.12 se obtiene un total de 5.45 m³ de metano útiles para ser usados en un hogar como combustible.

Caso II: Piscícola Tejocote granja con 70 borregos y 5 personas

En el presente caso se obtiene usando los factores de conversión de metano de la Tabla 3.9.

Tabla 3.13 Generación de metano para una granja con 70 borregos, y 5 personas (Caso II)

Material origen	Total de animales o personas	Kg de excreta/ animal*día	Total de Kg de excreta producidos	m ³ biogás/ animal*día o persona*día	Total m ³ biogás/ día	m ³ CH ₄ /día
Carneros	70	2	140	0.10	7	4.2
Personas	5	0.40	2	0.028	0.14	0.084
Total			142		8.14	4.28

Producción diaria de metano: 4.28 m³

Caso III: Manantial Bodegue granja con 5 borregos, 2 cerdos y 6 personas

En el presente caso se hace un análisis usando los factores de conversión de metano de la Tabla 3.9.

Tabla 3.14 Generación de metano para una granja con 5 borregos, 2 cerdos y 6 personas (Caso III)

Material origen	Total de animales o personas	Kg de excreta/ animal*día	Total de Kg de excreta producidos	m ³ biogás/ animal*día o persona*día	Total m ³ biogás/ día	m ³ CH ₄ /día
Carneros	5	2	10	0.10	0.5	0.3
Cerdos	2	1.5	3.5	0.10	0.2	0.12
Personas	6	0.40	2.4	0.028	0.168	0.1008
Total			15.9		0.688	0.52

Producción diaria de metano: 0.52 m³

3.13 Producción de materia orgánica y de metano en los casos propuestos para la implementación de un biodigestor

Para la implementación de un biodigestor se toman en cuenta los resultados obtenidos de kilogramos de residuos orgánicos por día y los metros cúbicos de biogás producidos por día de los tres casos propuestos. Los resultados se observan en la Tabla 3.15 y con base en la materia orgánica disponible diariamente y la cantidad de metano que se puede obtener en una granja con características similares se propondrá un biodigestor que use una carga orgánica similar como la que se dispone diariamente en las comunidades rurales de Amanalco.

Tabla 3.15 Cantidad de excretas producidas por día y producción de metano por día en los tres casos

No. de Caso	Total de Kg de excreta producidas por día	m ³ CH ₄ producido por día	Kg de residuo para producir 1 m ³ de CH ₄
I	76.45	5.45	14.02
II	142	4.28	33.17
III	15.9	0.52	31.8

Como se tiene un rango de 16 a 76 kilogramos de materia disponible por día se propone un biodigestor con carga diaria de 26.33 kilogramos de materia orgánica y con una capacidad de producción de aproximadamente 1 m³ de metano diarios, cantidad necesaria para suplir las necesidades energéticas de un hogar.

3.14 Aplicaciones de un metro cúbico de biogás y su capacidad calorífica respecto al gas natural y al gas L.P.

A continuación en la Figura 3.5 se observa los usos que se puede dar un metro cúbico de biogás en medio rural.

En la Tabla 3.16 se observa la capacidad calorífica del biogás frente al gas natural y al gas L.P. Siendo el gas L.P. tres veces mayor en cuanto a eficiencia energética que el biogás pero aun así el biogás es una gas útil y barato por su obtención directa de la descomposición de la materia orgánica.

Figura 3.5 Gráfico de las alternativas de rendimiento de 1 m³ de biogás en medio rural (Lemme, 1985)

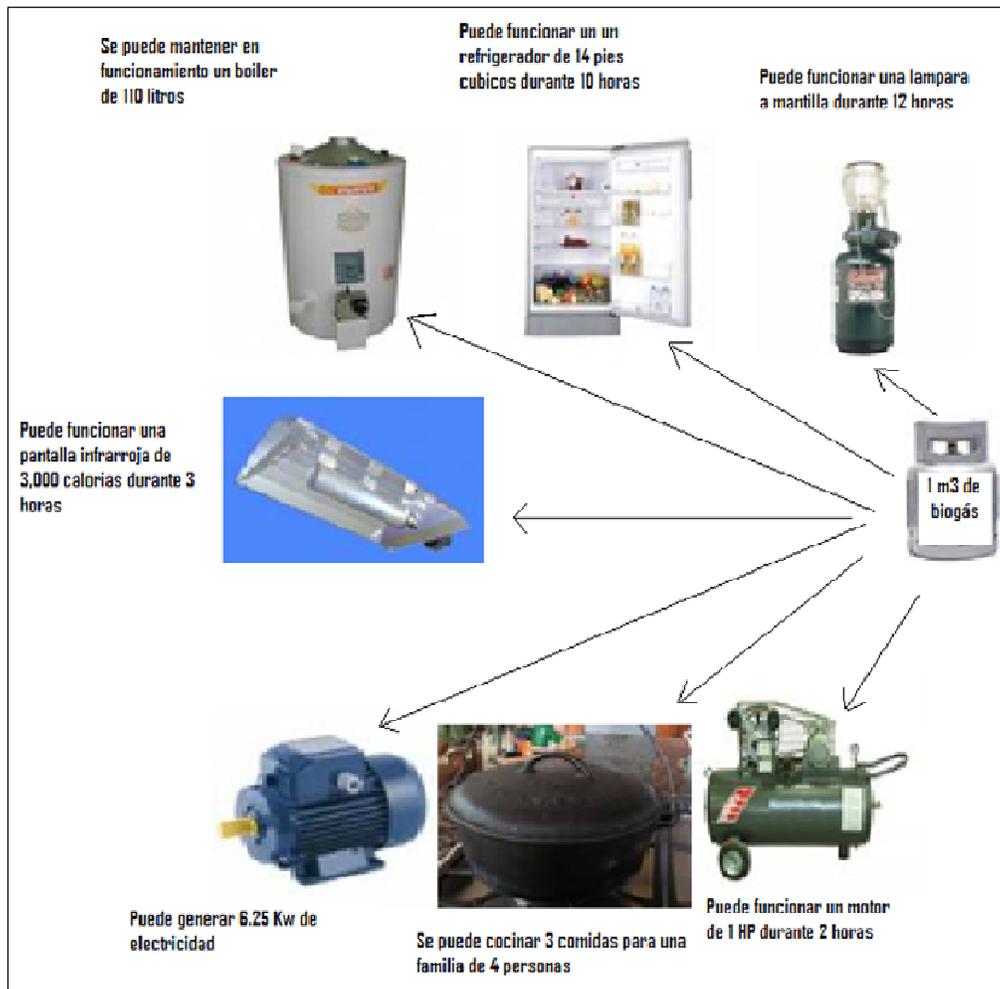


Tabla 3.16 Capacidad calorífica del biogás frente al gas natural y gas L.P. (Gas Natural, 2008)

Combustible	Capacidad calorífica Kcal/m ³
Biogás	4,500 a 5,600
Gas Natural	9,300
Gas L.P.	23 400

3.15 Formulaciones para la producción de biogás y metano

Para una estimación teórica de la producción de biogás a partir de residuos orgánicos se considera la siguiente ecuación:

$$P_{\text{biogás}} = t \times DM \times OM \times MBP$$

Donde:

t= Cantidad de sustrato (ton)

DM= Fracción de materia seca en el sustrato (%)

OM= Fracción orgánica de materia seca (%)

ODM= Partícula orgánica del sustrato = DM x OM

MBP= m³/ton ODM

Cuando son más de dos sustratos a degradar se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{\text{biogás}} = \left[M \cdot DM_M \cdot \frac{OM_M}{DM_{CS}} \cdot \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{KgOM}_M} \cdot 1000 \right] + \left[CS \cdot DM \cdot \frac{OM_{CS}}{DM_{CS}} \cdot \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{KgOM}_{CS}} \cdot 1000 \right]$$

Donde:

M = Desecho (ton/año)

DM= Contenido de materia seca

OM/DM= Fracción orgánica de materia seca OM= Producción de biogás por Kg de desecho

CS= Otro sustrato

Uno de los parámetros que permite evaluar la generación de metano a partir de la degradación de la materia orgánica es la productividad de metano (Sánchez y col., 2001). Este parámetro se define como la

cantidad de metano generado en la unidad de tiempo de la materia dispuesta en el reactor. La expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un determinado residuo orgánico en un tiempo determinado es la siguiente:

$$P_{CH_4} = (V_{CH_4}) / (V_{reactor} * t)$$

Donde:

V_{CH_4} = Volumen de metano generado

$V_{reactor}$ = Volumen de materia dispuesta en el recinto fermentador

t = Tiempo considerado para la degradación

La producción de metano tiene un límite ($0.35L_{CH_4}/gDQO_{removida}$) que es la producción teórica fundamentada y este depende fundamentalmente de la naturaleza de la materia dispuesta en el digestor. La ecuación que permite estimar la máxima generación de metano para un producto determinado, es:

$$M_{max} = V_{CH_4} / S_{org.total}$$

Donde:

V_{CH_4} : Volumen de metano generado

$S_{org.total}$: Cantidad de materia orgánica total utilizada en todo el proceso

3.16 Dimensiones de los digestores de polietileno

Para determinar las posibles dimensiones de los biodigestores a implementarse en Amanalco se necesita conocer la producción de biogás en términos anuales y la proporción de agua respetando una relación de 3:1. Las dimensiones del digestor se determinan con la siguiente ecuación:

$$V_{\text{digestor}} = \left[\text{de secho} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) + \text{co-sustrato} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) \right] * \frac{TRH(\text{días})}{365}$$

Donde:

V_{digestor} = Volumen del digestor

Desecho = Residuo que va a ser degradado en el digestor

Co-sustrato = Sólo en caso de que exista otro residuo a degradar

TRH = Tiempo de residencia hidráulica

Para determinar el volumen de almacenamiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{\text{alm}} = \text{Sustrato} \left(\frac{m^3}{\text{año}} \right) * \frac{\text{Tar}(\text{meses})}{12} - \text{Vol}_{\text{digestor}} (m^3)$$

Donde:

V_{alm} = Volumen de almacenamiento de biogás

Sustrato = Residuo a degradar

T_{ar} = Tiempo de almacenamiento requerido

El digestor a emplearse en las comunidades de Amanalco es de tipo salchicha siendo el adecuado para zonas rurales y de bajo costo. A continuación en la Tabla 3.17 se presentan los materiales, asimismo la cantidad necesaria de cada material y el precio promedio de construcción para un tamaño promedio de biodigestor de radio de 0.5 m y de largo del cilindro de 1.7 m, se dimensiona en forma cilíndrica aunque posteriormente la bolsa de gas va en una caja de concreto para su mejor protección y mayor durabilidad.

Tabla 3.17 Material y costo para el digester de polietileno propuesto
(Earth, 2003)

Cantidad	Descripción	Precio individual \$	Precio total \$
2	Metros cúbicos de arena fina para mezclar con el cemento para construir las paredes del tanque y pegar las tres filas de bloque de cemento	270	540
1	Metro cúbico de piedra cuarta (grava) para mezclar con el cemento y arena	270	270
6	Metros de un plástico tubular de calibre No. 8 que sea por lo menos 2.8 metros de ancho para cubrir el tanque y formar la bolsa que contendrá el biogás	50	300
2	Tubos PVC de 3" para hacer los tubos de entrada y salida del tanque del biodigester (6 m de tubo)	145	290
9	Bultos de cemento que pesan 50 kilos cada uno para hacer las paredes y el piso del tanque, tal vez se tenga que usar el cemento para montar la pila de carga sobre el tubo de entrada	80	720
60	Bloques de cemento de medidas 12 cm X 20 cm X 40 cm para hacer las tres filas en las cuales se meten los clavos y los ganchos que sostienen el plástico	7	420
3	Tubo PVC de 1/2" suficiente para hacer un marco rectangular de 16.6 metros y para llevar el biogás a la cocina donde se va a quemar	56	168
6	Varillas de 3/8" de hierro suficiente para pegar las tres filas de bloque de cemento	80	480
2	Tubos con codos redondos dentro de los cuales se va a meter la soga para mezclar la superficie de la mezcla de agua y desechos	60	120
5	Metros de una soga delgada que va a mezclar el contenido del tanque para que no haya una capa por la cima que impida la producción y escape del biogás	3	15
3-5	Envases de un galón cada uno que están llenos hasta la mitad con arena para ser atados a la soga para mezclar. Los envases se van a sumergir parcialmente para romper la capa que forma por encima de la mezclas de agua y desechos.	5	25
20	Tubos para los ganchos que sostienen hundido al marco del plástico.	3	60
12	Tubos lisos para los pines que sostienen el marco en el caso de una caída del nivel del contenido del tanque	3	36

Costo total de los materiales: \$3332.00

En el costo del biodigester a implementar es de 3,332 pesos y solo se incluyen los principales materiales. La mano de obra y otros utensilios los suministran los mismos habitantes pues son herramientas que

comúnmente poseen. Hay otros materiales que tal vez se van a necesitar como madera, clavos y láminas galvanizadas para construir el techo del biodigestor, pero no están incluidos en la lista porque se pueden usar otros materiales. También, la lista no incluye los materiales para conectar el tubo PVC que tiene el biogás.

Para los casos de estudio, el tiempo de almacenamiento requerido es de 8 a 10 días que representa el tiempo de residencia hidráulica de operación del sistema. En la Tabla 3.18 se observan los volúmenes de los biodigestores de polietileno de los tres casos de estudio y un cuarto que es el propuesto. Considerando un tiempo de retención de 10 días, relación 5:1 entre largo y diámetro de acuerdo a las bases de diseño y con las mangas de polietileno existentes en el mercado. También se considera la relación 3:1 de proporción de agua y residuo orgánico. Para fines de cálculos se considera el criterio de asumir la densidad de la materia orgánica igual a la del agua para poder convertir kilogramos a litros y así posteriormente sacar volúmenes en metros cúbicos estos cálculos son aproximados por considerar este criterio de cálculo.

Tabla 3.18 Volúmenes totales de los digestores de tres casos de estudio

No. de Caso	Kg de residuo para producir un metro cúbico de metano	Carga de la mezcla para producir $1\text{m}^3\text{CH}_4/\text{día}$ Residuos Kg: Agua L	Carga total Kg/día	Volumen del reactor con 25% de sobrecarga L	Volumen total L
I	14.02	14.02:42.06	56.08	140.2	701
II	33.17	33.17:99.51	132.68	331.7	1658.5
III	28.90	28.90:86.7	115.6	289	1445
Propuesto	26.33	26.33:78.99	105.32	263.3	1316.5

En la tabla 3.19 se presentan las dimensiones de los biodigestores de polietileno que son las requeridas para la instalación de un solo digestor en cada caso de estudio de las comunidades de Amanalco.

Tabla 3.19 Dimensiones de los digestores

No. de Caso	Volumen total L	Radio del cilindro m	Altura del cilindro m
I	701	0.5	0.89
II	1658.5	0.5	2.11
III	1445	0.5	1.83
Propuesto	1316.5	0.5	1.6762

3.17 Propuesta de un biodigestor para su uso en zonas rurales

La investigación en el tema de fermentación anaerobia, se busca aumentar la eficiencia de generación de biogás y de la degradación de la materia orgánica reduciendo el tiempo de retención hidráulica. Para ello, se ha llevado al desarrollo de diversos tipos de digestores. En estos sistemas generalmente; la alimentación es continua con altas diluciones (1-1,5: de sólidos totales) y por métodos físicos se logra retener los microorganismos dentro del digestor durante 20-30 días, mientras el líquido activo pasa a través del sistema en tiempos de 0.5 a 5 días. Con esto se logra reducir en forma significativa el tamaño del biodigestor, con la consecuente disminución de los costos de instalación y operación mejorando la eficiencia de generación de biogás (*Alonso, 1996*).

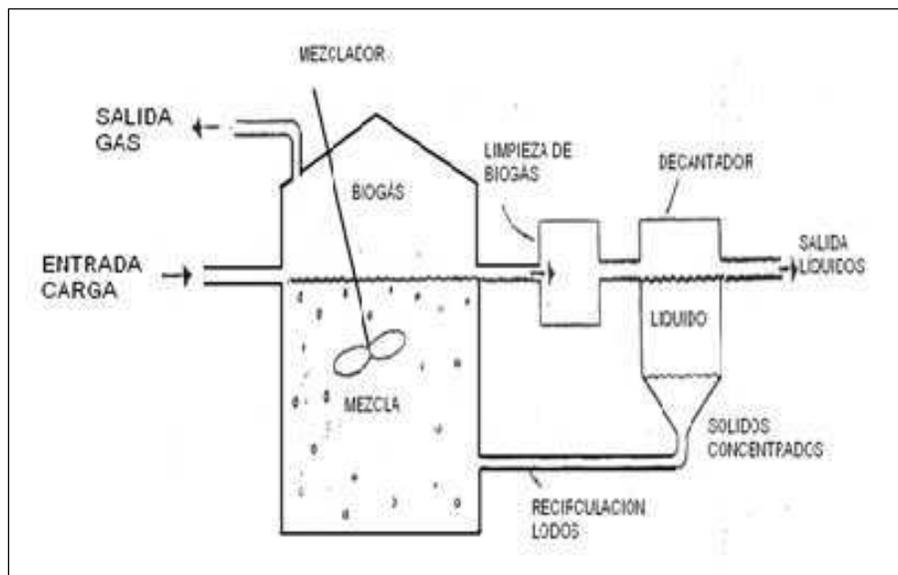
Por la materia orgánica con que cuentan las poblaciones rurales del municipio de Amanalco se propone el uso de un biodigestor de polietileno de bajo costo, el contenido de residuos promedio de todas

las granjas es de 26.33 Kg/día. Por lo cual se propone usar un digestor para ser alimentado con una carga de 26.33 Kg/día lo cual, puede generar 1 m³CH₄ como combustible y resolver las necesidades energéticas de un hogar diariamente.

De acuerdo a las características físicas y con la materia orgánica con que se cuenta en la comunidad de estudio, se propone implementar un tipo de biodigestor de polietileno como se observa en la Figura 3.6.

Biodigestor de polietileno: Por su magnitud y capacidad se propone para una familia ya que este mismo puede ser empleado con la materia orgánica que se genera en los hogares y puede ser de carácter familiar. Por la carga de influente que utiliza este tipo de biodigestor se emplea solo para una sola familia, o si se dimensiona en mayor amplitud y puede servir para varias familias según la materia orgánica con que se cuenta.

Figura 3.6 Diagrama del biodigestor de polietileno propuesto (Alonso, 1996)



3.18 Diseño de un biodigestor de polietileno

Un criterio es hacer una mezcla de tres a uno es decir por una carga de estiércol aplicar tres cargas de agua. Por datos de literatura las cargas de las mezclas difieren como se muestra en la Tabla 3.20 (Ayala, 2008; Brambila, 2008).

Tabla 3.20 Proporciones de cargas en un digestor

Tipo de estiércol	Proporción Mezcla Agua: estiércol
Porcino	1:1
Vacuno	2:1
Ovino	2:1
Piscícola	3:1
Vacuno, porcino y piscícola	3:1

Para la mezcla del digestor propuesto se usa la relación de 3:1 Es decir, una proporción residuo por tres de agua, después de diez días se puede obtener la primera producción de biogás. Con esto, una familia puede producir la cantidad de combustible que necesita y así una familia puede reducir en un tercio el consumo de gas propano.

Cálculo del volumen del digestor propuesto

$$V = (\pi * r) * h$$

V= Volumen del biodigestor

$$\pi = 3.141592$$

*r= Radio del cilindro

h=Altura del cilindro

Realizando los cálculos:

$$V = (\pi * r^2) * h$$

Sustituyendo los valores del caso propuesto, radio del cilindro=0.5m, altura del cilindro=1.7m

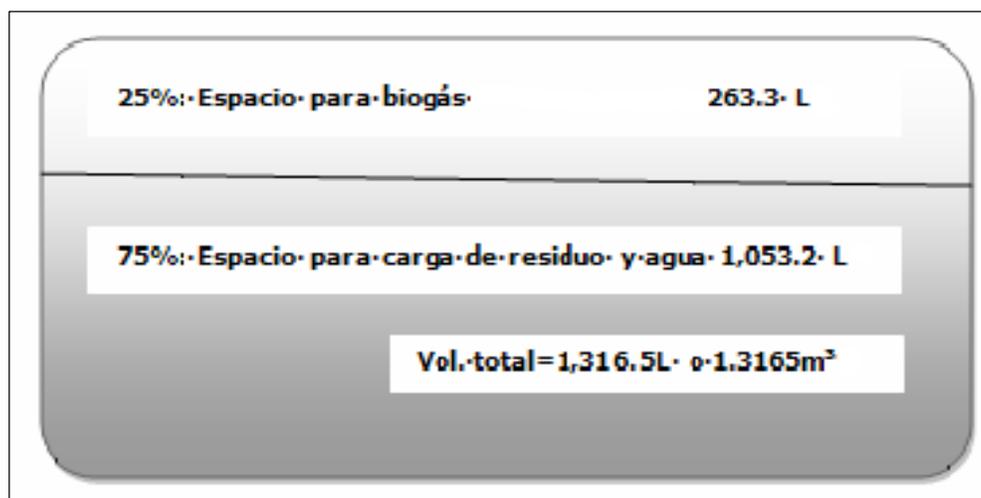
$$V = (3.141592 * (0.5 \text{ m})^2) * 1.7 \text{ m}$$

$$V = 1.32 \text{ m}^3$$

Por lo tanto el volumen total del biodigestor propuesto es de 1,316.5L.

A este biodigestor diariamente se le agrega por un periodo de 10 días 105.32L de agua y 26.33 Kg de estiércol, (se consideran que para fines de cálculo la densidad de la mezcla líquido-sólido es igual a la del líquido), con estas cantidades se cubre un 75% del volumen del biodigestor y el otro 25% de volumen es para el almacenamiento del biogás como se observa en la Figura 3.7.

Figura 3.7 Biodigestor propuesto



CAPÍTULO IV

4.1 Evaluación económica del proyecto

Método 1

Una manera de evaluar un proyecto es realizar un estudio del proyecto de inversión. Este es un plan que asigna determinada cantidad de capital, producirá un bien o servicio de utilidad para una persona o para la sociedad.

Las etapas para un proyecto de inversión son las siguientes:

- 1) Estudio Legal: Consiste en la seguridad ambiental, régimen de producción, comercialización, etc.
- 2) Estudio de Mercado: Calidad, precio, comercialización, etc.
- 3) Ingeniería del proyecto: Tecnologías, equipos, problemas tecnológicos etc.
- 4) Tamaño y localización: La realización de la instalación de los biodigestores se pretende realizar en las poblaciones rurales del municipio de Amanalco Estado de México.
- 5) Magnitud y estructura de la inversión (capital): se debe evaluar el costo del proyecto en términos monetarios.
- 6) Financiamiento: Para la construcción e implementación de los biodigestores se estima que los mismos campesinos podrán financiar los costos de los mismos. Pero además existen instituciones de gobierno como son SAGARPA, PROCAPI, Instituto de Ecología y otras instituciones particulares y de gobierno que puedan financiar los proyectos y aportar préstamos de capital, los métodos de financiamiento pueden ser hasta de un 50% del costo total de la inversión, por ejemplo en el presente trabajo el costo del biodigestor

es de \$3,332, la gente solo aportaría \$1,662 para tener su propio digestor para 5 años de vida útil en su hogar y así poder satisfacer sus demandas energéticas.

7) Estudio económico y financiero: Esta parte analiza la inversión, los flujos de efectivo, la rentabilidad del proyecto, los egresos e ingresos etc.

8) Evaluación económica y financiera (decisión correcta): Es la toma de decisión con base al estudio económico y financiero.

Método 2

Este método fue el utilizado para este trabajo. Para evaluar el proyecto de implementación de un biodigestor se consideraron varios términos económicos que se describen más adelante, pero el concepto más importante en que se basa esta investigación para la parte económica es el termino del VPN (valor presente neto). Este parámetro indica si un proyecto es viable o no, bajo los siguientes criterios como se observa en la Tabla 4.1 (*Baca, 2003*).

Tabla 4.1 Interpretación del valor presente neto (*Baca, 2003*)

Valor	Significado	Decisión a tomar
VPN > 0	La inversión produciría ganancias	El proyecto puede aceptarse
VPN < 0	La inversión produciría pérdidas	El proyecto debería rechazarse
VPN = 0	La inversión no produciría ni ganancias ni pérdidas	Dado que el proyecto no agrega valor monetario, la decisión debería basarse en otros criterios, como la obtención de un mejor posicionamiento en el mercado u otros factores.

Además del VPN se considera la TIR (tasa interna de rendimiento), con la tasa interna de retorno se mide el valor promedio de la

inversión en términos porcentuales para los años de vida útil estimado del proyecto, este parámetro también indica si es aceptable o no el proyecto.

4.2 Planteamiento general económico para la implementación de un biodigestor

Para la construcción e implementación del biodigestor se deben invertir \$3332, por análisis de datos que se mostrarán más adelante este equipo proporciona ingresos de \$2400 el primer año, ya que al usar gas metano (biogás), en el hogar se evita comprar gas propano con un costo aproximado de \$195 por tanque mensualmente dando así \$2400 como ingresos del proyecto en el primer año. Este aspecto se explica a detalle en la Tabla 4.3. El costo del gas L.P. tiene un incremento de 2.5% y así sucesivamente un gradiente de ingresos de \$60 anuales por un periodo de 5 años. Al final del periodo, los activos que quedan en la inversión podrían venderse en \$500 si considera la opción de vender lo que se ahorra en biogás; si el inversionista propone la TMRA (tasa mínima aceptable de rendimiento o tasa de descuento que se aplica para llevar a valor presente) de 15% anual; entonces el VPN (valor presente neto) se determina como se explica en el punto 4.6 de este capítulo. En este caso para calcular el VPN, la solución consiste simplemente en trasladar los flujos de efectivo al tiempo presente o a tiempo cero. En la Tabla 4.2 se muestra el costo del tanque de gas a un periodo de 5 años tomando como referencia el año 2008.

Se estimó un incremento de 2.5% anual, este incremento del 2.5%; en algunos casos es más severos pues el incremento del gas ha sido hasta del 10% anual. Por ejemplo en el año 2008, el precio del gas estaba a \$10.17 por Kg teniendo un costo del tanque de gas de 20 Kg de \$203.4. En el 2009, el gobierno ha bajado el precio a \$9.15 por

Kg, y el costo del tanque de gas es de \$183. Pero en general el aumento del precio del gas L.P. incrementa hasta un 5% anualmente (SAT, 2008).

La Tabla 4.2 indica que cada año el costo del gas aumenta en 2.5% de su costo actual tomando como base el precio de \$195 por tanque, es decir en cada año el precio del tanque de gas aumenta aproximadamente \$5, como se observan los valores de la penúltima columna de esta misma tabla y en el año número cinco el precio del tanque de gas es de 220.624 pesos.

Tabla 4.2 Costos del tanque de gas en un periodo de cinco años

Año No.	Costo del tanque de gas (\$) por 2.5% de incremento	Costo anual del tanque de gas (\$)	Redondeo costo anual del tanque de gas (\$)
1	195*1.025	199.875	200
2	199.875*1.025	204.871	205
3	204.871*1.025	209.993	210
4	209.993*1.025	215.243	215
5	215.243*1.025	220.624	220

El tipo de gas referido es el gas LP (gas licuado de petróleo) o gas doméstico, el gas L.P. es un derivado del petróleo, está compuesto principalmente por propano, butano, propileno y otros compuestos, pero es único entre los combustibles comúnmente usados. Debido a que bajo presiones moderadas y a temperatura ordinaria, puede ser transportado y almacenado en forma líquida, pero cuando se libera a presión atmosférica y a temperatura relativamente baja se evapora y puede ser utilizado como gas (CONAE, 2008).

4.3 Cálculo del planteamiento económico

Otra manera de calcular el costo del tanque del gas de 20 Kg a cinco años es usando la fórmula para calcular el valor futuro que ofrece la ventaja de obtener directamente el valor en un solo calculo; y es la siguiente ecuación.

$$\text{De la fórmula } F_n = P (1+i)^n \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

P: Valor presente (\$)

El valor presente P , corresponde a la cantidad de dinero que se invierte o se presta ahora, a la tasa de interés i y durante n periodos.

F: Valor futuro (\$)

El valor futuro F , es la cantidad de dinero de la cual se dispone al final de la transacción. Equivale a un pago único futuro en n , equivalente a un pago único presente ahora.

i: Tasa de interés (%)

Es la tasa que se obtiene durante cada periodo de inversión de los intereses a capital.

n: número de periodos (años)

Tratándose de rendimientos efectivos, n son los periodos de conversión durante los cuales se invierte o se presta P .

Calculando el costo de un tanque de gas a 5 años (Valor futuro)

Para el caso de la obtención del costo del tanque de gas a cinco años se considera el valor presente que es de \$195 por tanque de gas y el interés de 2.5% luego se sustituyen estos valores en la ecuación 4.1:

$F_n = P (1+i)^n$, con unidades monetarias

F: Valor futuro del tanque de gas que se desea obtener a 5 años

i: 2.5%

P: Precio presente de un tanque de gas, \$195.00

Sustituyendo los datos de la ecuación mencionada

$$F_{5\text{Años}} = \$ [195(1+0.025)^5]$$

F = \$220.624; este valor es el costo calculado directamente para un tanque de gas en cinco años, e incluye el 2.5% de incremento por año de un costo presente del tanque de gas de \$195; se observa que es el mismo valor obtenido en la Tabla 4.2.

4.4 Cálculo de los flujos de efectivo de cada año

Flujo de efectivo, o flujo neto de efectivo

Estado que muestra el movimiento de ingresos y egresos y la disponibilidad de fondos a una fecha determinada. Movimiento de dinero dentro de un proyecto o una economía en su conjunto (*Baca, 2003*).

Los flujos de efectivo del proyecto del biodigestor se muestran en la Tabla 4.3, de cada año, para obtener los flujos de efectivo positivos se obtienen multiplicando el costo estimado anual de un tanque de gas con un incremento incluido de 2.5% por 12 meses y estos son los flujos positivos pues indican un ingreso, este cálculo se hace para los 5 años (periodo de implementación del biodigestor). Y el flujo de efectivo de \$3332 se señala de manera negativa pues indica un egreso o salida de dinero que en este caso es la inversión de implementación del biodigestor económico propuesto.

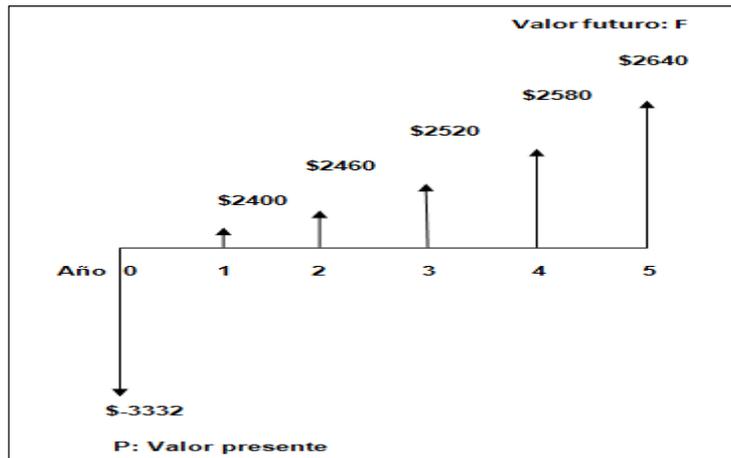
Tabla 4.3 Ahorro anual (flujos de efectivo) por uso de biogás

Año No.	Precio del tanque gas (\$) por doce meses	Ahorro anual total por uso de biogás (\$) (Flujos de efectivo)	Incremento del gradiente (\$)
0	195 Precio de referencia	-3332 Inversión	0
1	200*12	2,400	60
2	205*12	2,460	60
3	210*12	2,520	60
4	215*12	2,580	60
5	220*12	2,640	60

En la Tabla 4.3, el año cero no tiene gradiente y no se considera el 2.5% de incremento por ser el año de inicio y el precio base o presente es de \$195 por tanque de gas.

Posteriormente se grafican los datos obtenidos en la Tabla 4.3 como se puede observar en la Figura 4.1, el flujo de cada año esta hacia arriba y son positivos (ingresos o entradas), y el valor presente que es la inversión inicial esta hacia abajo con signo negativo (egresos o salidas).

Figura 4.1 Diagrama de flujos de efectivo de cada año



Valor futuro de la implementación del biodigestor a 5 años

Usando la ecuación 4.1

$$F_n = P (1+i)^n$$

Sustituyendo los valores

$$F_5 = \$3332(1+0.15)^5$$

$$F_{5\text{años}} = \$6701$$

Los \$6701 es el valor futuro de la implementación del biodigestor y es la cantidad de dinero de la cual se dispone al final del proyecto.

4.5 Cálculo del gradiente

El gradiente es el aumento en el flujo de efectivo por cada año y puede ser constante o varía según la tasa de interés de cada año y de acuerdo a las aproximaciones de los datos.

Para el caso del proyecto de implementación del biodigestor en Tabla 4.3 en la última columna se observa el gradiente que es de \$60 pesos cada año.

O con la siguiente fórmula se calcula directamente el gradiente:

$$G = [(\text{Incremento año 1} + \text{Incremento año 2} + \text{Incremento año 3} + \text{Incremento año n})/n] \quad \text{Ec.4.2}$$

En esta fórmula se suman todos los incrementos dividido entre el número de periodos, esta fórmula se utiliza cuando el gradiente no es constante y no se puede obtener directamente en una tabla de datos o en una gráfica.

Para fines demostrativos se sustituyen los incrementos obtenidos de la Tabla 4.3, en la ecuación 4.2, para obtener el gradiente.

$$G = \$ [(60+60+60+60+60)/5]$$

$$G = \$60$$

Aquí el gradiente es de \$60 lo cual indica que en cada año el flujo de efectivo aumenta \$60 por año, esto no debe confundirse con el aumento del tanque de gas por año ya que el precio del tanque de gas aumenta \$5 anualmente e incluye una tasa de interés de 2.5%.

4.6 Cálculo del valor presente neto del proyecto de implementación de un biodigestor de bajo costo

El valor Presente Neto (VPN)

Es el valor monetario en pesos que resulta de una inversión actual y sus flujos netos a futuro, tomando en cuenta la tasa de interés del mercado como un costo de oportunidad del capital a invertir.

Para calcular el VPN se usa la siguiente fórmula:

$$\text{VPN} = [-P + ((\text{FNE1}/(1+i)^1) + ((\text{FNE2}/(1+i)^2) + ((\text{FNE3}/(1+i)^3) + \dots + ((\text{FNEn}/(1+i)^n))] \quad \text{Ec.4.3}$$

Donde:

P: Valor presente o valor de inversión inicial en el año cero

n: Número de periodos en años

FNE: Flujo neto efectivo o flujo de efectivo

El Flujo neto efectivo es la diferencia entre los ingresos netos y los desembolsos netos, descontados a la fecha de aprobación de un proyecto de inversión con la técnica de "valor presente", esto significa tomar en cuenta el valor del dinero en función del tiempo. En el proyecto de implementación de un biodigestor se toma el flujo de efectivo igual al flujo neto de efectivo.

i: Tasa de interés

La tasa de interés es el porcentaje al que está invertido un capital en una unidad de tiempo, determinando lo que se refiere como "el precio del dinero en el mercado financiero".

TMAR: Tasa mínima de rendimiento aceptable

Se define como la menor cantidad de dinero que se espera obtener como rendimiento de un capital puesto a trabajar de manera de poder cubrir los compromisos de costos de capital. Se incluye en la ecuación del VPN y está asociado con la i (tasa de interés).

Para el caso específico de la implementación de un biodigestor económico se proponen tres TMRA asociadas con sus tasas de interés los cuales son $i=0.10$, $i=0.15$, $i=0.25$ estos valores son propuestos aleatoriamente pero por el tipo de tasa de interés que ha tenido el país durante los últimos diez años, se pretende usar una i menor a 0.10 ya que a menor i el VPN es mayor y por ende el proyecto es más viable, ver Tabla 4.1 (SAT, 2008).

Los diferentes valores de i del proyecto serán evaluados mediante el análisis del VPN y se toma la decisión según los criterios de la Tabla 4.1.

En este caso si la TMAR=15%, asociado con un interés $i=0.15$ y usando los flujos de la Figura 4.1 se obtiene el valor presente neto de la siguiente manera:

Para calcular valor presente neto se utiliza la ecuación 4.3, sustituyendo los valores se obtiene lo siguiente:

$$\text{VPN} = \frac{-3332 + (2400)/(1+0.15)^1 + (2460)/(1+0.15)^2 + (2520)/(1+0.15)^3 + (2580)/(1+0.15)^4 + (2640)/(1+0.15)^5}{1}$$

$$\text{VPN}=\$5060$$

El VPN es muy alto de acuerdo a los criterios de la Tabla 4.1.

El $\text{VPN}=\$5060$ es positivo, por cual el proyecto es aceptable, era de esperarse puesto que el inversionista baja sus exigencias de rendimiento y el proyecto en términos de lo que el inversionista desea ganar, se vuelve más atractivo. De esta forma, el valor positivo del VPN indica así el incremento en la riqueza del inversionista, por lo que si se tienen varias alternativas de inversión, se elegirá aquella con mayor VPN, pues es donde se obtiene mayor ganancia.

Analizando los otros valores de interés

Si se considera $i=0.25$ aplicando la ecuación 4.3:

$$\text{VPN}=[-3332+(2400)/(1+0.25)^1+(2460)/(1+0.25)^2+(2520)/(1+0.25)^3+(2580)/(1+0.25)^4+(2640)/(1+0.25)^5]$$

$$\text{El VPN}=\$3,375$$

Si se considera $i=0.10$ aplicando la ecuación 4.3:

$$\text{VPN}=[-3332+(2400)/(1+0.10)^1+(2460)/(1+0.10)^2+(2520)/(1+0.10)^3+(2580)/(1+0.10)^4+(2640)/(1+0.10)^5]$$

$$\text{VPN}=\$6,138$$

Los valores del VPN se calculan para un periodo de 5 años que es el tiempo de vida del biodigestor y además es el tiempo en el cual está proyectada la alternativa de implementación de estos mismos.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados de los cálculos para el VPN con diferentes tasas de interés. El proyecto considera un interés de 0.15, lo cual da un VPN, muy aceptable. Pero con un interés menor sería mejor, no siendo así el caso contrario pues con un interés muy

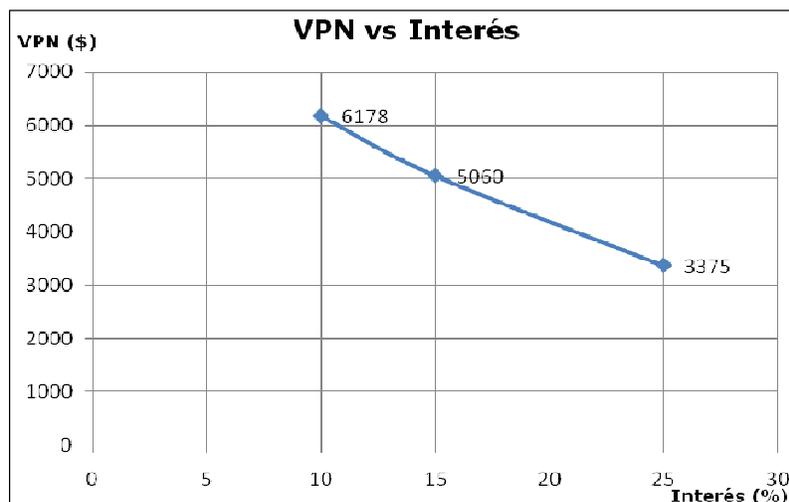
alto. El proyecto no da altas ganancias y en algunos casos se debe de rechazar el proyecto, estos resultados se obtuvieron considerando los criterios de la Tabla 4.1.

Tabla 4.4 Analizando diferentes escenarios de i la tasa de referencia correspondiente a la TMAR

TMAR (%) al año 5	i	VPN (\$)	Consideración
10	0.10	6,138	Es una muy buena opción y da mejores ganancias
15	0.15	5,060	Es muy viable y es aceptable para el proyecto
25	0.25	3,375	No es muy buena opción. Las ganancias son muy pequeñas

En la Figura 4.2 se han graficado los diferentes valores de VPN de acuerdo a sus respectivas tasas de interés, y se observa que a menor interés mayor es el valor del VPN, lo cual indica que se generan mayores ganancias en el proyecto usando una $i=0.10$.

Figura 4.2 Relación VPN vs Interés



Haciendo el análisis con el VPN para ver si el proyecto es viable se toma como referencia nuevamente la Tabla 4.1.

VPN del proyecto=\$5060, como el VPN es mayor a cero indica que la inversión producirá ganancias y el proyecto puede aceptarse y si el i fuera de 0.10 el proyecto daría más ganancias.

4.7 Periodo de recuperación descontado

El periodo de recuperación de la inversión es el número de años que tomará el proyecto para recuperar la inversión inicial del biodigestor.

Para calcular el periodo de recuperación del proyecto se usa la tasa de interés de 15%, para ello se va obteniendo el VPN en cada año hasta que su valor deje de ser negativo. Para conocer en qué año se recupera el capital invertido se usa la ecuación 4.3 y por medio de iteraciones se calcula el valor del VPN. Cuando el valor del VPN se vuelve positivo en ese punto se puede examinar en que periodo de tiempo será recuperación del capital invertido.

Sacando el VPN en el primer año

$$VPN=[-3332+(2400)/(1+0.15)^1]$$

$$VPN=\$(-1245)$$

En este caso el VPN es negativo indica que la inversión producirá pérdidas y el proyecto debe rechazarse o de lo contrario tomar otra alternativa como es poner a prueba un año más el proyecto.

Se calcula el VPN en el segundo año y conocer si es factible el proyecto y si se recupera la inversión en este año.

Sacando el VPN en el segundo año

$$VPN=[-3332+(2400)/(1+0.15)^1+(2460)/(1+0.15)^2]$$

VPN=\$615

Con este valor positivo del VPN el proyecto es aceptable y se puede considerar que desde el segundo año el proyecto es viable y después del segundo año se recupera la inversión inicial.

En la Tabla 4.5 se consideran los flujos de efectivo del proyecto y el periodo de planeación de 5 años. Para obtener el periodo de recuperación se suman sucesivamente los flujos y se resta la inversión y cuando se obtiene un valor positivo en ese momento la inversión se recupera como lo indica la ecuación 4.4.

Fórmula para calcular el periodo de recuperación

$$FNE1+FNE2+FNE_n-P=0 \quad \text{Ec.4.4}$$

Donde:

FNE: Es el flujo de efectivo neto

n: Número de años del proyecto

P: Valor presente o inversión inicial

Cuando el valor del resultado sea mayor a cero en ese momento se recupera la inversión

En el caso de la implementación del biodigestor, se suman:

\$2400+\$2460=\$4860 correspondientes a los flujos del primer y segundo año

Después se resta \$3332, el resultado es la inversión inicial:

$$(2400+2460)-3332=\$1528$$

Como el valor es mayor a cero. Entonces el proyecto se recupera desde el segundo año, caso contrario si solo se resta el flujo del

primer año con la inversión que sería $\$2400 - \$3332 = \$(-932)$, aquí el resultado es negativo e indica que la inversión aun no se recupera; en la Tabla 4.5 se observa que desde el segundo año se recupera el capital a invertir, en los cálculos se restan los flujos de efectivo menos la inversión y cuando da un valor positivo en ese momento se recupera la inversión del proyecto.

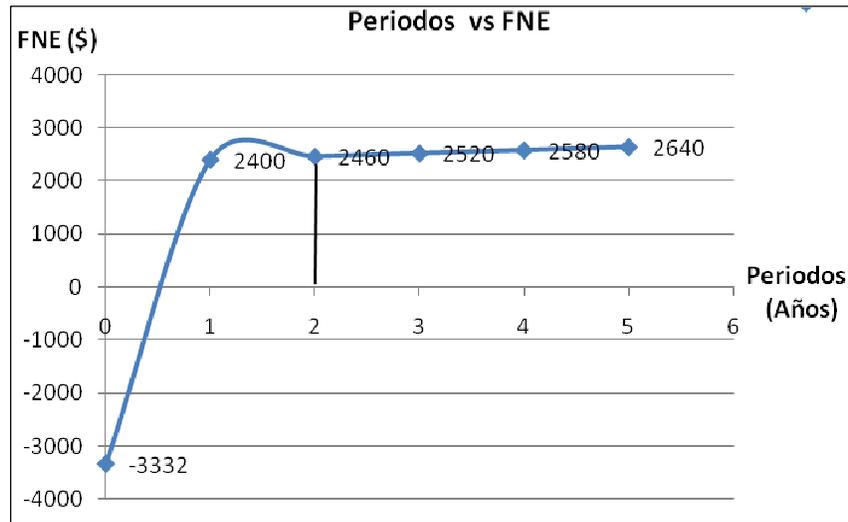
Tabla 4.5 Periodo de recuperación descontado

Año	Flujos de efectivo \$	Recuperación del capital \$	Resultado \$
0	-3332	[0-3332]	-3332
1	2400	[2400-3332]	-932
2	2460	[2400+2460-3332]	1528
3	2520	[2400+2460+2520-3332]	4048
4	2580	[2400+2460+2520+2580-3332]	6628
5	2640	[2400+2460+2520+2580+2640-3332]	9268

En la Figura 4.3 se observa un método gráfico que consiste en graficar los flujos de efectivo con los años y en donde se observa un declive en ese momento se recupera el capital. Se observa entonces, que desde el segundo año, el capital se recupera ya que en los años posteriores solo se generan ganancias.

En este método la inversión inicial se recuperara en dos años. La deficiencia más evidente del método es que no se consideran todos los flujos de efectivo del proyecto. Con este método se toma el periodo de recuperación adecuado independientemente de que en el análisis se considere un valor de TMAR.

Figura 4.3 Periodo de recuperación descontado



4.8 Tasa interna de rendimiento

La tasa interna de rendimiento es la tasa de descuento que permite que el VPN=0. Otra definición es la tasa de descuento que permite que la suma de los flujos descontados sea igual a la inversión inicial.

La TIR (tasa interna de rendimiento) es la que permite el valor presente de la inversión sea igual a la suma de los valores presentes de los flujo de efectivo en el año 0.

Iterando la ecuación de VPN (ecuación 4.3) se obtiene la TIR, que es el valor que permite que el VPN sea igual a cero. Ésto se observa en la Tabla 4.6, el valor de i que hace el $VPN=0$, es 68.53% asociado a la TMAR.

Usando la ecuación 4.3

$$VPN = [-P + (FNE1/(1+i)^1) + ((FNE2/(1+i)^2) + ((FNE3/(1+i)^3) + \dots + ((FNE_n/(1+i)^n))]$$

Para encontrar la TIR se introducen en la ecuación 4.3 diferentes valores de i , y también se introducen los valores de los FNE de los cinco años y el valor presente. Se hacen las iteraciones y se obtienen

los valores como se observa en la Tabla 4.6 hasta encontrar un valor que convierta en cero la igualdad del VPN.

Tabla 4.6 Cálculo de la TIR

Valor de la TMAR (%)	i	VPN(\$)	TIR de la inversión
69.50	0.6950	-39.69	
69.00	0.6900	-19.27	
68.70	0.6870	-6.92	
68.60	0.6860	-2.78	
68.59	0.6859	-2.36	
68.55	0.6855	-0.71	
68.54	0.6854	-0.29	
68.53	0.6853	0.00	68.53%
68.52	0.6852	0.53	
68.50	0.6850	1.36	
25.34	0.2534	3,332	
25.30	0.2530	3,338	
25.00	0.2500	3,375	
15.00	0.1500	5,060	
10.00	0.1000	6,138	

Después de hacer varias iteraciones el TMRA que permite que el VPN sea igual a cero es 68.53% o $i = 0.6853$.

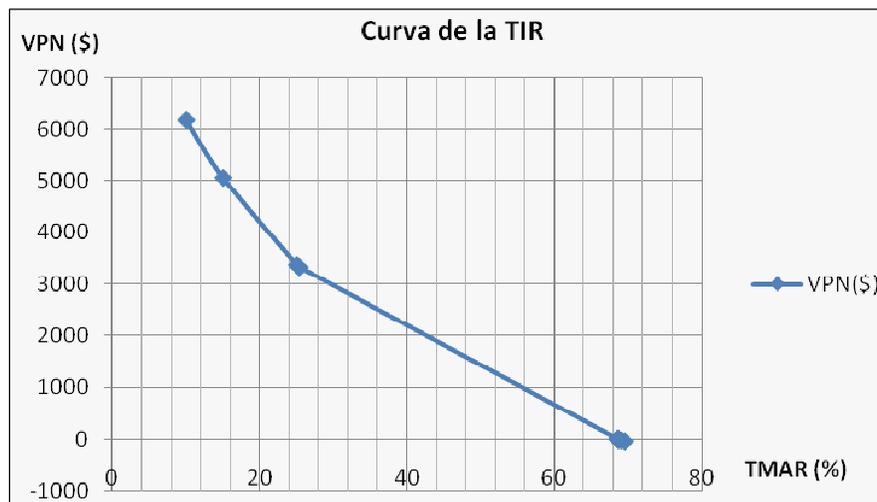
Se comprueba este valor en la ecuación 4.3, igualando a cero el VPN

$$VPN = [-3332 + (2400)/(1+0.6853)^1 + (2460)/(1+0.6853)^2 + (2520)/(1+0.6853)^3 + (2580)/(1+0.6853)^4 + (2640)/(1+0.6853)^5]$$

VPN=0

Como 68.53% hace cero el VPN, entonces la TIR se encuentra en ese punto como se observa en la Figura 4.4.

Figura 4.4 TIR del proyecto



Haciendo un análisis con los resultados obtenidos de la Tabla 4.4, se observa lo siguiente:

Cuando la TMAR=15%, la inversión se recupera al 15% más una ganancia extra de \$5,060. Si la TMAR=25%, lo invertido se recupera al 25%, más una ganancia de \$3,375. Si la TMAR=68.53% y este valor produce un valor de VPN=0, entonces la TIR=68.53% en este caso se recupera la inversión a esa tasa sin ninguna ganancia adicional. Pero si la TMAR>68.53% o mayor a la TIR no se alcanza a recuperar la inversión, por lo tanto se debe considerar el criterio de rechazar la inversión.

Con la tasa interna de rendimiento se mide el valor promedio de la inversión en términos porcentuales para los años de vida útil estimada del proyecto. Por tanto, los criterios de selección cuando se utiliza la TIR como método de análisis son:

Si se mantiene una TIR=68.53%, en el cálculo del VPN se consideran los siguientes criterios:

- Si la TIR es mayor que la tasa de rentabilidad mínima atractiva, la inversión es financieramente aceptable.
- Si la TIR es igual que la tasa de rentabilidad mínima atractiva, el inversionista es indiferente ante la inversión.
- Si la TIR es menor que la tasa de rentabilidad mínima atractiva, la inversión no es aceptable financieramente.

Los resultados en donde se aceptan o se rechazan las diferentes TMRA (tasa de rentabilidad mínima atractiva) se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Resultados de aceptación o rechazo del proyecto de acuerdo a la TIR

Valor de la TMAR (%)	i	VPN(\$)	TIR de la inversión	Decisión
69.50	0.6950	-39.69	Menor	Rechazar
69.00	0.6900	-19.27	Menor	Rechazar
68.70	0.6870	-6.92	Menor	Rechazar
68.60	0.6860	-2.78	Menor	Rechazar
68.59	0.6859	-2.36	Menor	Rechazar
68.55	0.6855	-0.71	Menor	Rechazar
68.54	0.6854	-0.29	Menor	Rechazar
68.53	0.6853	0.00	68.53%	Aceptar
68.52	0.6852	0.53	Mayor	Aceptar
68.50	0.6850	1.36	Mayor	Aceptar
25.34	0.2534	3,332	Mayor	Aceptar
25.30	0.2530	3,338	Mayor	Aceptar
25.00	0.2500	3,375	Mayor	Aceptar
15.00	0.1500	5,060	Mayor	Aceptar
10.00	0.1000	6,138	Mayor	Aceptar

Con respecto a la viabilidad del proyecto y considerando los criterios del VPN y la TIR de la parte económica, el proyecto es aceptable bajo las siguientes consideraciones:

Periodo del proyecto: 5 años

Inversión inicial del costo del biodigestor: \$3332

Tasa de interés: 15%

VPN: \$5060

TIR: 68.53%

Tomando en cuenta estas consideraciones el proyecto, genera buenas ganancias y se puede llevar a cabo sin ningún problema en cuanto a la inversión y recuperación del capital invertido, para la implementación de un biodigestor de bajo costo en las comunidades rurales del municipio de Amanalco, Estado de México.

4.9 Cálculo del P en el mantenimiento del biodigestor

Un factor muy importante en la implementación del biodigestor es incluir el costo del mantenimiento. El costo del mantenimiento está basado en un 15% del costo total del equipo. Los mantenimientos se evalúan por año, el mantenimiento considera cambio de materiales, refacciones extras así como la misma mano de obra en algunos casos.

El costo de mantenimiento en el primer año es de \$500 pues es el 15% de interés de los \$3332 del costo total del biodigestor:

$$\$3332 * 0.15 = \$500$$

En el caso en donde se considera el mantenimiento del biodigestor $n=5$ años que es el periodo de implementación, con un $i=15\%$; el primer pago de mantenimiento es de \$500 y aumenta a razón del 15% capitalizada cada año del costo del primer mantenimiento como se muestra en el siguiente cálculo:

$$\$500 * 0.15 = \$75$$

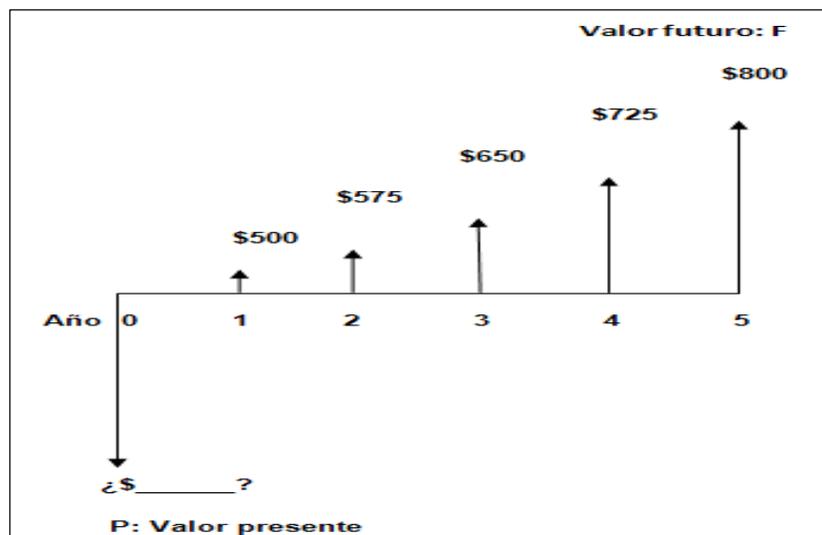
En los años subsecuentes el costo del mantenimiento aumenta a razón de \$75 anuales que es el gradiente si la tasa del interés es del 15% como se observan los resultados en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Costo del gradiente del mantenimiento del biodigestor

Año No.	Costo del mantenimiento del biodigestor por año (\$)	Incremento del gradiente anualmente (\$)
1	500	75
2	575	75
3	650	75
4	725	75
5	800	75

El diagrama de flujo del mantenimiento del biodigestor propuesto se muestra en la Figura 4.5.

Figura 4.5 Flujos de efectivo del mantenimiento del biodigestor



Para obtener el valor presente del costo del mantenimiento se hace el siguiente análisis:

Se consideran \$500 como el costo del primer año, pues es el 15% de \$3332 del costo total del biodigestor

$$\$3332 * 0.15 = \$500$$

Y en los años posteriores, el costo incrementa en un 15% del costo del primer año, estos valores de mantenimiento se observan en la Tabla 4.9. En la última fila de la columna indica el costo total de mantenimiento del biodigestor en un periodo de 5 años, y es de \$3250.

Tabla 4.9 Costo del mantenimiento del biodigestor

Año No.	Costo del mantenimiento del biodigestor por año (\$)
1	500
2	575
3	650
4	725
5	800
Total	3250

El procedimiento para el análisis general de la implementación del biodigestor a un periodo de 5 años es el siguiente:

La inversión inicial es de \$3332

El costo de mantenimiento por los años de vida del biodigestor es de \$3250.

Entonces los flujos negativos que son los egresos serán:

$$\$3332 + \$3250 = \$6582$$

Se consideran como flujos positivos el ahorro total por uso de gas de cada año y negativo la inversión señalados en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Relación de flujos positivos y negativos del proyecto

Año No.	Precio del tanque gas (\$) por doce meses	Ahorro anual total por uso de biogás (\$) (Flujos de efectivo)	Tipo de flujo
0	195 Precio de referencia	-3332 Inversión	Negativo
1	200*12	2,400	Positivo
2	205*12	2,460	Positivo
3	210*12	2,520	Positivo
4	215*12	2,580	Positivo
5	220*12	2,640	Positivo
		-3250 Costo de mantenimiento	Negativo
Total		12600-(3332+3250)=6,018	

Sumando los flujos positivos y flujos negativos del proyecto se obtiene la siguiente relación:

$$\$12600 - (\$3332 + \$3250) = \$6,018$$

En la Tabla 4.11 se muestran los valores totales de los flujos negativos positivos y negativos y el ahorro económico total por el uso de biogás como combustible en los hogares de Amanalco.

Tabla 4.11 Ahorro económico total por el uso de biogás

Flujos positivos \$12,600	Flujos negativos \$(3,332+3,250)=\$6,582	Ahorro económico total para un periodo de 5 años \$6,018
Esta cantidad representa la suma de los flujos de efectivos positivos o el ahorro por consumo de gas L.P. de los 5 años del periodo de implementación del biodigestor y este resultado proviene de sumar el precio del tanque gas que se usa en los hogares anualmente. Se suman los flujos de los 5 años para obtener esta cantidad.	Los \$3,332 es el costo de la implementación del biodigestor, esta cantidad incluye la compra de todos los materiales para la construcción del biodigestor de polietileno de bajo costo propuesto. Por otra parte los \$3250 es el costo de mantenimiento del biodigestor por un periodo de 5 años tiempo de vida del biodigestor.	Esta cantidad representa la suma de los flujos negativos más la suma de los flujos positivos. Esta cantidad representa el ahorro monetario para un periodo de 5 años de implementación del biodigestor propuesto.

De lo anterior se deduce: Para un periodo de 5 años se gasta en gas L.P. la cantidad de \$12,600 pero con el uso del biogás se ahorra esta cantidad. Restando el costo de mantenimiento e implementación da la cantidad de \$6,080, lo cual indica que usando biogás se ahorra la mitad de lo que se gasta usando gas L.P. siendo esta propuesta una excelente alternativa energética y económica para los hogares en las zonas rurales carentes de recursos económicos.

4.10 Contribuciones del proyecto

El trabajo realizado considera la importancia del mejoramiento de la calidad de vida de los pobladores de las zonas rurales, utilizando residuos orgánicos para la obtención de biogás puede suplir los combustibles tradicionales, utilizar esta alternativa energética genera contribuciones de carácter ambiental, social y económico.

4.10.1 Contribuciones ambientales

El departamento del Reino Unido (*DOE, 1993*) ha estimado que el valor de la emisión de CO₂ a la atmosfera como un contaminante global fluctúa entre 5 y 45 dólares por año.

Además, (*Kumar y col. 2000*) indican que 30 millones de toneladas de CH₄ son generadas anualmente por diferentes sistemas de producción animal y desechos. Estas emisiones pueden reducirse a aproximadamente 13.24 millones de toneladas de CH₄ al año por la aplicación de sistemas de digestión. A nivel mundial, el uso de la digestión puede evitar emisiones alrededor de 420 millones de toneladas de CO₂ y puede prevenir la emisión de 49 mil toneladas de óxido de nitrógeno. Si estos números son convertidos a valores monetarios, la aplicación mundial de la digestión podría resultar en un ahorro anual de entre 2,167.8 y 16,391.1 millones de dólares.

Al quemar una molécula de metano se produce:



El peso molecular del CH₄ es de 16 y el de CO₂ es de 44, cuando se queman 16g de CH₄ también se producen 44 gCO₂, su equivalencia con el CH₄ es 21 veces su peso molecular por lo que se reduce a: 21*(16-24)=292gCO₂ equivalente. La tonelada de carbono equivalente se cotizaba en el 2002 entre 3 y 5 dólares y en el 2004 entre 5 y 10 dólares.

Para la contribución ambiental del proyecto de implementación de biodigestores: La cantidad total de metano generado por toda la población Amanalco fue de 247.05 m³CH₄/día (apartado 3.11) lo cual, equivale a 3.53 Toneladas métricas de CO₂ equivalente por día. Resultado de la página de conversión de la EPA (*EPA, 2008*).

La disminución de gases efecto invernadero de 3.53 Toneladas métricas de CO₂ equivalente por día corresponden a 30.53 dólares por día, esto en proyecto MDL (mecanismo de desarrollo limpio) equivale a 11,143.45 dólares por año.

4.10.2 Sociales y económicas

El tiempo de vida del biodigestor propuesto es de 5 años, la inversión de construcción es de \$3,332 pesos, la materia prima principal son 26.33 Kg/día de residuos orgánicos; utilizando tecnología de degradación anaerobia el biodigestor propuesto puede producir 1m³CH₄/día, equivalente al ahorro diario de consumo de gas L.P. Usando biogás como combustible puede satisfacer las necesidades energéticas de un hogar de 6 integrantes y se ahorran \$ 200 pesos por mes ya que es el costo de un tanque de gas de 20 Kg y así obtener un sustituto adecuado del gas L.P.

Este tipo de proyecto puede ser apoyado por instituciones no gubernamentales como son empresas privadas o por alguna institución pública como FIRCO (fideicomiso de riesgo compartido) esta institución apoya económicamente hasta el 50% y SAGARPA (secretaría de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación) apoya con la asesoría técnica y capacitación para el uso de biodigestores; estas instituciones están interesadas en programas de MDL que consiste en disminuir gases generadores de efecto invernadero a la atmósfera (SAGARPA, 2008).

CONCLUSIONES

El trabajo realizado ha abordado el tema del uso de biomasa como fuente de energía, en particular atención en las tecnologías de degradación anaerobia. Se consideran que tienen posibilidades reales de ser aplicadas en las comunidades rurales del país y reducirían en gran medida el consumo de leña para la cocción de los alimentos, tendrían a su alcance un combustible competente al gas L.P.

Las comunidades de Amanalco al no disponer de un medio específico de aplicación de la basura orgánica como son los residuos de truchas excrementos de animales y humanos; es posible utilizar estos residuos orgánicos como fuente de alimentación en un biodigestor para producción de biogás. Así reduciendo el riesgo de infección por la emisión de heces fecales, la implementación del biodigestor planteado en el trabajo, ayudaría a la reducción de los desechos, evitaría la tala de árboles y contribuiría en el mejoramiento social y ambiental de las comunidades.

El digestor propuesto es de tipo continuo pues permite manejar las variables relacionadas, carga específica, tiempo de retención y temperatura; la temperatura óptima es de 30° a 35°C aproximadamente, el periodo de vida de este digestor es del orden de 5 años, se necesita un terreno de 1.5 metros de ancho por 3 metros de largo en donde se va instalar el biodigestor, los materiales básicos para la construcción son una caja de block de cemento que protegerá el biodigestor y el material empleado para digerir la mezcla de agua y estiércol es un plástico de polietileno de bajo costo.

Con esta investigación se pudo calcular que el biodigestor propuesto utilizando 26.33 kilogramos de restos orgánicos produciría $1\text{m}^3\text{CH}_4/\text{día}$ a un régimen de operación de 10 días TRH.

Con el metano producido en Amanalco ($247.05 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{día}$) se podría calentar 45,292L de agua y habría 6.45L de agua caliente para cada habitante del municipio por días, considerando que comunidades como Amanalco que es la cabecera municipal no cuenta con animales o granjas para producir desechos orgánicos. Si solo se utilizaría el gas metano en las comunidades rurales donde hay mayor producción de residuos orgánicos el metano podría alcanzar para poder calentar más agua y puede servir para el uso y servicio de los pobladores de las zonas carentes de recursos económicos y medios energéticos; se dejaría de consumir madera y no gastarían por consumo de gas L.P.

Utilizar el metano como combustible reduce la emisión de CH_4 a la atmósfera evitando el calentamiento global. La cantidad total de metano generado por toda la población de Amanalco fue de $247.05 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{día}$ lo cual, equivale a 3.53 Toneladas métricas de CO_2 equivalente por día. La disminución de gases efecto invernadero de 3.53 Toneladas métricas de CO_2 equivalente por día corresponden a 30.53 dólares por día, esto en proyecto MDL (mecanismo de desarrollo limpio) equivale a 11,143.45 dólares por año.

Los habitantes al obtener combustible de los biodigestores lo pueden utilizar para uso doméstico. De esta manera no se exponen a los gases nocivos por la quema de leña y de botellas de plástico que contienen dioxinos sustancias generadoras de cáncer.

En la parte económica, la inversión inicial para la instalación de un biodigestor proyectada a cinco años es de \$3,332 pesos, con una tasa de interés de 15%, obteniéndose un valor presente neto de \$5,060 pesos, esto indica que la inversión se recupera al 15% más una ganancia extra de \$5,060 pesos, y con una TIR de 68.53%. Lo cual indica que se pueden aceptar inversiones hasta con tasas de interés menores de 68.53% y todavía obtener ganancias. El proyecto tiene

un costo de mantenimiento de \$3250 pesos por un periodo de 5 años que es el tiempo de vida del biodigestor.

Con lo que respecta a los flujos de efectivo, por utilizar biogás se evita gastar \$12,600 pesos en la compra de gas L.P. y descontando \$6,582 pesos de la inversión del biodigestor y mantenimiento. La implementación de un biodigestor genera ahorros de \$6,018 pesos por un periodo de cinco años. Por día se traduce en un ahorro \$3.30 pesos ayudando el gasto familiar no comprando gas L.P.

Finalmente se concluye, que la implementación de biodigestores para producir (biogás) puede ser empleado como combustible en el municipio de Amanalco de Becerra, siendo técnica y económicamente factible por sus beneficios económicos, energéticos y ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcalde, M. 2008. Encuesta llevada en las comunidades de Amanalco en el mes de agosto de 2008 para obtención de datos de campo. México.
- Alonso, R. 1996. Factibilidad técnico económica del uso del biogás obtenido de la digestión anaeróbica de estiércol porcino para la generación de electricidad. Tesis de licenciatura Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F; México.
- Ayala, E. 2008. Producción de metano de desechos de granjas de truchas de truchas, ovejas y cerdos de la comunidad rural de Amanalco de Becerra en Estado de México para su posible uso como bioenergía. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Tesis en proceso. Facultad de Química, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F; México.
- Baca, G. 2003. Fundamentos de ingeniería económica. Editorial MCGRAW HILL, México.
- Brambila, C. 2008. Factibilidad de la micro-generación de energía eléctrica a partir de biogás producido de desechos de granjas piscícolas en el Estado de México. Tesis de licenciatura de Ingeniería Eléctrica-Electrónica. Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F; México.
- Bu'lock, J. y Kristiansen, B. 1987. Biotecnología básica. Editorial Acribia, S. A., España.
- Casablanco, G. 1998. Ingeniería bioquímica. Francesc ed. Madrid, España.

- Castellanos, L. 1980. Biodigestores: Una alternativa para solucionar los problemas de energía en las regiones marginadas. Tesis de licenciatura. Facultad de Estudios Superiores de Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Castells, X. y Peral, J. 2005. Tratamiento y valorización energética de residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana. Editores Díaz de Santos. España.
- Chynoweth, P. e Isaacson, R. 1987. Anaerobic Digestion of Biomass. Elsevier Applied Science. New York, EEUUA.
- CONAE, 2008. Precios de gas natural en los últimos 5 años. Publicación de la Comisión Nacional de Ahorro y Energía. México.
- Constant, M. 1989. Biogas end-use in the Europe community. Elsevier Science Publishers, New York.
- DOE, 1993. Externalities from landfill and incineration. Department of Environment. Centre for social and economic research. Warren spring laboratory, for the environment consultancy, HMSO. Gran Bretaña.
- Earth, 2003. Biodigestores de bajo costo para la producción de combustibles y fertilizantes a partir de excretas. Publicación de de la Fundación Earth. Ecuador.
- EPA, 2008. Coalbed Methane Outreach Program (CMOP). Publicación en internet de U.S. Environmental Protection Agency. United States.
- FAO, 1992. Materiales y métodos para el montaje de un biodigestor de flujo continuo. Publicación de la Organización de las Naciones Unidas para la Salud y la Alimentación. Ecuador.

- Félix, A. 1979. Estudios, adaptación y pruebas de equipos comerciales para la utilización de biogás. Publicación del Instituto de Investigaciones Eléctricas (I.I.E). Cuernavaca, Morelos, México.
- FH, 2005. Biodigestores una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes. Publicación de la Fundación Habitat. Costa Rica.
- Gas Natural, 2008. Costos de gas natural y L.P. Publicación de Gas natural de México. S.A. México D.F., México.
- Gollata, K. y Sarada, R. 1989. Anaerobic degradation of tea wastes and some aromatic compounds by a methanogenic consortium. En memorial del 5th International Symposium on Anaerobic Digestion, Hall, E. R. and Hobson, P.N. (eds.). International Association on Water Pollution Research and Control. EEUUA.
- Google Hearth, 2008. <http://earth.google.com/>
- Gunnerson, C. y Stuckey, D. 1986. Anaerobic Digestion. The World Bank. Washington D.C; EEUUA.
- Harrison, R. 1999. El medio ambiente introducción a la química medioambiental y a la contaminación. Editorial Teribia S.A. España.
- I.I.T. 1979. Obtención de biogás a partir de desechos orgánicos. Publicación del Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Editorial Guadalupe CTDA. Bogotá, Colombia.
- INEGI, 2005. Marco Geoestadístico Municipal. Estadísticas de las poblaciones rurales. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

- Kumar, M., Humar, S. y Poonia, M. 2000. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide reduction through the application of biogas technology. ***Indian Journal of Environmental***. 42(3):117-120.
- Lemme, J. 1985. Instalaciones aplicadas a los edificios (combustibles, gas, biogás). Editorial Ateneo. Buenos Aires, Argentina.
- Lugones, B. 2008. Análisis de biodigestores. Cuba energía. Cuba
- Mandujano, M. 1981. Biogás: Energía y fertilizantes a partir de desechos orgánicos. Manual para el promotor de la tecnología. Organización Latinoamericana de Energía. Cuernavaca, Morelos, México.
- Mentado, P. 2008. Excretas animales, explosivo crecimiento. Revista Energía Hoy. pp.55. México.
- Moragues, J. y Rapallini, A. 2007. Energía de la Biomasa. Revista Energías Renovables y Ambiente. Buenos Aires, Argentina. Tomo I, pp. 18-19.
- Muñoz, F. 1981. Revisión bibliográfica del proceso de digestión anaeróbica de desechos orgánicos. Tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria, DEPMI Facultad de ingeniería, UNAM. Ciudad Universitaria, D.F; México.
- OLADE, 2005. Energy sector modernization in Latin America and the Caribbean. Regulatory Frammework Disvesture and Free Trade. Publicación de la Organización Latinoamericana de Energía. EEUUA.
- Pauss, A. 1987. Biomass. Editores Hall, D.O. and Overend, Editorial John Wiley & Sons. EEUUA.

- Pedroso, P. 2006. Potencialidades para la producción de biogás en entidades y asentamientos poblacionales del Municipio Viñales. Revistas Ciencias.com. Pinar del Río Cuba.
- Ramage, J. 1981. Energía. Editorial Edamex. México.
- SAGARPA, 2008. Introducción a la tecnología de la digestión anaerobia. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.
- Salinas, R. 2003. Ayuntamiento del Municipio de Amanalco, cronista municipal de Amanalco. Estado de México.
- Sánchez, E., Weiland, P. y Martín, A. 2001. Effect of substrate concentration and temperature on the anaerobic digestion of piggery waste in a tropical climate. **Process Biochemistry**. Volumen 37, Numero 5, pp. 483-489.
- SAT, 2008. Gobierno no rebaja precio del gas propano. El metro periódico digital. Secretaria de Administración Tributaria. Publicación de la México, D.F.
- Urbáez, C. y Carballo, L. 2008. Fuentes de biomasa. Publicación de la Universidad de Pinar del Río. Cuba.
- Vesilind, P. y Rimer, A. 1981. Unit Operations in Resource Recovery Engineering. Prentice Hall, Inc. México.