



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y
ZOOTECNIA

EVALUACION ECONÓMICA DE UN BIODIGESTOR
PARA EL CENTRO DE ENSEÑANZA,
INVESTIGACIÓN Y EXTENSION EN PRODUCCION
PORCINA DE LA F.M.V.Z.-UNAM

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

P R E S E N T A

PAULINA ASPEITIA CUÉLLAR

ASESORES:

MPA Juan Rafael Meléndez Guzmán

MVZ Roberto Martínez Rodríguez



MÉXICO, D.F. 2012



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.

DEDICATORIA

Este Trabajo esta dedicado a todas aquellas personas que a lo largo de mi vida me han apoyado, escuchado y enseñado que todo en esta vida es útil y que día a día se debe buscar la felicidad siendo una mejor persona.

Con mucho orgullo dedico esta tesis a mi facultad mis profesores y los médicos que me ayudaron a mi formación a lo largo de mi vida como estudiante siempre llevare conmigo sus enseñanzas y consejos.

A mi familia por la educación y cuidados que me procuraron, siempre tendré en cuenta su amor y dedicación y espero retribuirles algún día con creces.

A la familia Pérez y mis compañeros de entrenamiento quienes me brindaron siempre su apoyo y los valores que me seguirán a lo largo de mi vida. Gracias Roberto porque en ti no solo encontré un ejemplo a seguir sino un gran amigo.

Muy especialmente a mis hermanos de la Brigada de Rescate Topos de Tlaltelolco por su paciencia, enseñanzas, lealtad y amistad.

A todos mis amigos por acompañarme en los buenos y malos momentos, por permitirme aprender de ustedes y recordarme lo valioso de la vida.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos los que colaboraron en la realización de esta tesis.

Agradezco especialmente el apoyo del fondo PAPIME por medio del MVZ. Rafael Meléndez quien permitió la realización d este proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
ANTECEDENTES	2
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
Generales	4
Particulares	5
DESARROLLO E LA INVESTIGACIÓN	6
HISTORIA DE LA TECNOLOGÍA	6
EL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	8
Etapas de la digestión anaerobia	9
Hidrólisis	9
Etapa fermentativa o acidogénica	11
Fase acetogénica	11
Fase metanogénicas	13
Productos finales	14
Parámetros ambientales y de control	15
Temperatura	15
Contenido de nutrientes	17
pH	17
Velocidad de carga orgánica y tiempo de retención	19
Agitación	20

Facilitadores	20
Tóxicos e inhibidores	21
CARACTERÍSTICAS DE LOS BIODIGESTORES	25
Elementos principales	25
Clasificación	26
Por la frecuencia de carga	26
Tipos de biodigestores según el mezclado	28
Por el flujo bacteriano	30
Por el número de etapas	31
Modelos más difundidos	32
Según su forma	33
Cálculos para la implementación de un biodigestor	33
Construcción y funcionamiento	34
INTRODUCCIÓN AL USO DE ESTIERCOL EN GRANJAS PORCINAS	38
Características de las excretas porcinas	38
El uso de las excretas de cerdo para un biodigestor	39
Uso de los productos finales de la biodigestión de excretas de cerdo.	40
REVISIÓN SISTEMÁTICA	42
ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	47
REFERENCIAS	52

RESUMEN

ASPEITIA CUÈLLAR PAULINA. Evaluación económica de un biodigestor para el centro de enseñanza, investigación y extensión en producción porcina de la F.M.V.Z.-UNAM (Bajo la dirección de MPA Juan Rafael Meléndez Guzmán y MVZ Roberto Martínez Rodríguez).

Dos de los problemas más críticos que enfrenta el mundo actual son la generación de energía suficiente y el manejo de residuos por lo tanto el objetivo que plantea este trabajo es el evaluar un modelo de biodigestor mediante la recopilación de información y la evaluación de costos para definir los beneficios y pormenores de su implementación.

Las producciones ganaderas de cualquier tipo, tamaño y nivel de tecnificación obtienen tanto productos deseados como subproductos y efluentes. Estos efluentes son las emisiones gaseosas, líquidos sobrantes o de desecho y residuos sólidos los cuales tienen la posibilidad de ser cuantificados y procesados como un insumo más dentro de la producción en lugar de desechos, todo esto mediante una digestión bacteriana de tipo anaerobio, la cual es un proceso natural, que corresponde al ciclo anaeróbico del carbono, donde por una acción coordinada y combinada de diferentes grupos bacterianos en ausencia total del oxígeno, estos puedan utilizar la materia orgánica para alimentarse y reproducirse. A partir de estos planteamientos en la granja porcícola de la UNAM en Jilotepec estado de México, se evaluó la posibilidad de implementar un biodigestor para minimizar los costos referentes al consumo de gas equivalente a un tanque de 500 litros ubicado a las orillas de la granja próximo al vertedero de residuos. Dicho biodigestor será de una etapa con sistema semicontinuo y agitación parcial, construido por practicidad y durabilidad en fibrocemento según los cálculos correspondientes y tubo de cobre para la conducción del biogás el cual será preferentemente utilizado en el boiler próximo de los cuartos para estudiantes y una de las lechoneras.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el problema energético ha afectado tanto a países industrializados como aquellos en vías de desarrollo, en los que subsisten grandes limitaciones para el crecimiento del sector rural como es el caso de México.¹

Dentro de la filosofía integradora y conservacionista, que implica el *desarrollo sustentable*, la alternativa de producir un combustible gaseoso, a partir de la digestión anaeróbica de los distintos residuos orgánicos que se generan en los establecimientos agropecuarios, puede significar un decisivo aporte al bienestar de las poblaciones rurales, y el saneamiento de su hábitat, como también para diversas escalas de asentamientos urbanos.²

En el presente trabajo se desarrollará en forma preliminar una metodología general de evaluación considerando en particular los factores intervinientes y la evaluación de los insumos y productos generados para la implementación de un biodigestor funcional y rentable.³

ANTECEDENTES

Para procurarse su alimento y vivienda nuestros antepasados talaron y quemaron áreas de bosque con el fin de limpiar el suelo para cultivarlo, atraer al mismo tiempo a los animales silvestres para darles caza. Con la baja población humana era factible la regeneración del bosque nativo pero, durante la época actual, se ha presentado un aumento considerable de la población mundial y esto ha ocurrido principalmente en las naciones en vía de desarrollo y con menores recursos, trayendo consigo la problemática asociada a la *gestión de los residuos orgánicos* de origen ganadero y agrícola, de forma que la mayoría de las explotaciones no poseen una base territorial suficiente para reutilizar los residuos ganaderos.^{4,5}

Esto, junto con el *aumento del censo ganadero*, la disminución de la superficie agrícola útil, y el aumento de las dimensiones de las explotaciones ganaderas, hace equiparable el sector ganadero con la industria, en cuanto a la problemática de gestión de residuos.⁵

Además de los *costos crecientes y la disponibilidad limitada* de las fuentes minerales de energía, adicionados a la dificultad de su distribución en el medio rural y los altos costos de los fertilizantes químicos hacen necesario desarrollar métodos más eficientes y de bajo costo para el reciclaje de las excretas y la producción de combustible y fertilizante en los sistemas agropecuarios.⁴

JUSTIFICACIÓN

Las proyecciones del uso de la energía global se basan en escenarios que son contruidos alrededor de suposiciones acerca de cuán lejos la economía se expandirá, cuán rápido crecerá la población mundial, el grado de avance tecnológico, medidas de conservación, la adopción de tecnologías energéticamente eficientes, la disponibilidad relativa y precio de los combustibles fósiles.⁶

Un estudio de la WEC proyecta, si las actuales políticas continúan así, las energías renovables contribuirán con un 4% a la provisión global de la energía para el año 2020. Dentro de ellas la *biomasa* es un recurso renovable cuya utilización presenta características singulares y beneficios notables. Se trata de una fuente prácticamente inagotable, producida cíclica y continuamente por el reino vegetal y animal y el sistema urbano e industrial, y existe por lo menos en alguna de sus formas en todos los espacios geográficos. El uso de la biomasa aporta beneficios que no son sólo energéticos, su transformación se convierte en beneficiosa y necesaria para el entorno. Es un sistema idóneo de eliminación de residuos, con la subsiguiente mejora del ambiente rural, urbano e industrial. Puede ser además, un modo de equilibrar determinados excedentes agrícolas.⁶

En el sector rural, la principal forma de contaminación es el estiércol, que genera malos olores y polución con nitratos al agua de consumo. La opción del uso del estiércol permite responder a una demanda de la sociedad, las actividades agrícola-ganaderas deben ser más respetuosas del medio ambiente, y en particular deben promover la reducción de posibles fuentes de contaminación. Otro aspecto de importancia en la economía rural, se refiere a la obtención de fertilizantes, cuya demanda es frecuente, por la explotación intensiva de los suelos. Generalmente, para suplir esta necesidad, se han empleado abonos minerales o químicos, derivados del petróleo y de alto costo.^{1,6}

Una opción considerada factible, que ofrece grandes posibilidades en el medio rural, es la biodigestión anaerobia de desechos orgánicos, provenientes de plantales pecuarios. Mediante este proceso, es posible obtener bioabonos y energía, en forma de gas metano, solucionando paralelamente el grave problema de contaminación ambiental, generado por la presencia de desechos y excretas.¹

Se hace necesario promover la producción de energías renovables y fertilizantes, que permitirán disminuir costos en la producción agrícola y ganadera. Muchos países han destinado sumas crecientes a la investigación de sus potenciales recursos energéticos alternativos.¹

OBJETIVOS

GENERALES

El objetivo del presente trabajo es investigar y evaluar las aplicaciones de las tecnologías de producción de biogás aplicables a los sistemas de producción agropecuaria del país.

La adopción de dichas tecnologías significa un gran aporte económico y ecológico sustentable para el mejoramiento de la calidad de vida de los productores y sus familias.²

Y conforme a lo anterior evaluar un modelo de biodigestor en la granja porcícola de Jilotepec Edo. De México que permita aprovechar el uso integral de los desechos orgánicos, aplicable a pequeños y medianos productores.^{1,2}

PARTICULARES

- Recopilar la información técnica sobre las características, implementación y funcionamiento de un biodigestor. ¹
- Establecer el costo de implementar un tipo de biodigestor semitecnificado para diversas explotaciones pecuarias según su espacio físico, volumen de excretas y de agua disponible. ¹
- Proporcionar a la granja una fuente de energía que permita reducir costos de producción con el uso de los desechos orgánicos, estiércol y el agua de limpieza, mediante la implementación de un biodigestor. Utilizando el biogas para calefacción en el área de destete y dormitorios para estudiantes. ¹
- Evaluar la opción de tener un ingreso alternativo con la venta y utilización de la composta producida por el biodigestor. ¹

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

HISTORIA DE LA TECNOLOGÍA

El proceso anaerobio ocurre de forma espontánea en la naturaleza para degradar la materia orgánica, produciendo, por ejemplo, el gas de los pantanos, el gas natural de yacimientos subterráneos o incluso el gas metabólico producido en el estómago de los rumiantes.⁵

En el siglo XVIII Alessandro Volta investigó e identificó el gas de los pantanos. John Dalton, en 1804, estableció la composición química del metano (CH₄). Hasta mediados del siglo XIX no se tuvo certeza de la participación de organismos vivos unicelulares en el proceso, siendo Beauchamp, en 1868, quién estableció la presencia de microorganismos en los procesos de producción de metano. Luis Pasteur descubrió que mediante la temperatura se podía favorecer el desarrollo de los microorganismos más interesantes. Propoff, en 1875, descubrió que la formación de biogás sólo se producía en condiciones anaerobias. En 1884, Pasteur investigó sobre la producción de biogás a partir de residuos animales, proponiendo la utilización del biogás para la iluminación de las calles.⁵

En la primera mitad del siglo XX se realizaron numerosas experiencias a escala laboratorio y piloto, alcanzando una especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Con el fin de la guerra y la fácil disponibilidad de combustibles fósiles la mayoría de las instalaciones fueron cesando en su funcionamiento.⁵

En la India, a partir de la década de los 60, se impulsó notablemente la tecnología de producción de biogás a partir de estiércol bovino con el doble objetivo del aprovechamiento energético.⁵

En China se ha fomentado, también, desde la década de los 70, la construcción de biodigestores, mediante programas de ámbito nacional.⁵

En los países industrializados la historia de la tecnología de biometanización ha sido diferente y el desarrollo ha sido fomentado más por motivaciones medioambientales que puramente energéticas, siendo un método clásico de estabilización de lodos activos residuales de estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas. A partir de la crisis energética de 1973, y durante la década de los ochenta, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales.⁵

Con la disminución de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados se han desarrollado importantes programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial, teniendo como objetivos principales la gestión de residuos, principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos, y el fomento de las energías renovables, para disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero. El principal exponente es Dinamarca, donde, en 1985, comenzó un programa de demostración desarrollado conjuntamente por los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente, en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica. Así, en 1997 se contabilizaban 19 grandes plantas que tratan conjuntamente residuos de origen industrial, residuos urbanos, lodos de depuradora y residuos ganaderos, aunque en el año 2000 los objetivos eran duplicar la producción, y continuar aumentando hasta el año 2030.⁵

Actualmente la utilización de biodigestores ha sido llamada *la tecnología milagrosa*. Sin embargo, aun hoy, muchos años después de su desarrollo inicial, solamente una porción relativamente pequeña de campesinos la emplean, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo ya sea por la falta de información al respecto o por falta de apoyo económico inicial que les permita invertir en nuevas tecnologías.⁴

En México desde hace un par de años, con el fin de promover la producción y utilización de biocombustibles el gobierno trabaja en una estrategia intersectorial

de los bioenergéticos que se complementa con los programas sectoriales de cada región. Siendo predominantes los programas: Producción sustentable de insumos para Bioenergéticos y de desarrollo Científico y Tecnológico de SAGARPA y el Programa de Introducción de Bioenergéticos de la Secretaría de Energía.¹¹

Con la estrategia de dichos programas se establecen las bases por las que la actividad agropecuaria se integrará a la actividad energética coadyuvando a la diversidad energética y el desarrollo sustentable, sin poner en riesgo la seguridad alimentaria del país, además de contribuir a la reactivación del sector rural y la mejor calidad de vida para la población. Buscando alcanzar una meta de 300 mil hectáreas dedicadas a los insumos bioenergéticos en el 2012.¹¹

El potencial de la bioenergía en México va mucho mas allá del limitado aprovechamiento que se hace en la actualidad. Se calcula que la potencia total es de entre 3,000 y 4,500 pico joule por año.¹¹

EL PROCESO DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso complejo desde el punto de vista microbiológico; al estar enmarcado en el ciclo anaerobio del carbono, es posible en ausencia de oxígeno, transformar la substancia orgánica en biomasa y compuestos inorgánicos en su mayoría volátiles: CO₂, NH₃, H₂S, N₂ y CH₄. Naturalmente ocurre en el tracto digestivo de animales y debajo de aguas estancadas o pantanos, pero también puede realizarse en depósitos cerrados herméticamente, llamados biodigestores. Estos se utilizan cuando se quiere captar todos los productos obtenidos de la descomposición anaerobia (gases y sólidos), ya que existe en su interior un ambiente obscuro y sin aire que favorece el medio óptimo para el cultivo intensivo de bacterias anaerobias.⁷

En esta condición, cuando se acumulan polímeros naturales orgánicos como proteínas, carbohidratos, celulosa, etc., se produce un rápido consumo de oxígeno, del nitrato y del sulfato por los microorganismos, produciéndose la metanogénesis; en estas condiciones, el nitrato se transforma en amonio y el

fósforo queda como fosfato. También se reducen los iones férricos debido a la ausencia de oxígeno.⁷

Las materias primas fermentables que se pueden usar para dicho proceso incluyen dentro de un amplio espectro a los excrementos animales y humanos, aguas residuales orgánicas de las industrias (producción de alcohol, procesado de frutas, verduras, lácteos, carnes, alimenticias en general), restos de cosechas y basuras de diferentes tipos, como los efluentes de determinadas industrias químicas.³

ETAPAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia, a partir de polímeros naturales y en ausencia de compuestos inorgánicos, se realiza en tres etapas: 1) hidrólisis y fermentación, en la que la materia orgánica es descompuesta por la acción de un grupo de bacterias hidrolíticas anaerobias que hidrolizan las moléculas solubles en agua, como grasas, proteínas y carbohidratos, y las transforman en monómeros y compuestos simples solubles; 2) acetogénesis y deshidrogenación, donde los alcoholes, ácidos grasos y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético, CO_2 e hidrógeno que son los sustratos de las bacterias metanogénicas; 3) metanogénica en la que se produce metano a partir de CO_2 e hidrógeno, a partir de la actividad de bacterias metanogénicas.⁷

Los microorganismos que en forma secuencial intervienen en el proceso son:

1) Bacterias hidrolíticas y fermentadoras; 2) bacterias acetogénicas obligadas reductoras de protones de hidrógeno 3) bacterias sulfato reductoras (sintróficas facultativas) consumidoras de hidrógeno; 4) bacterias homoacetogénicas; 5) bacterias metanogénicas; 6) bacterias desnitrificantes.⁷

HIDRÓLISIS

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos

fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles, que serán metabolizados por las bacterias anaerobias en el interior de las células. Los compuestos solubles, básicamente diferentes tipos de oligosacáridos y azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos, son fermentados por los microorganismos acidogénicos que producen, principalmente, ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, dióxido de carbono e hidrógeno. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en acético, hidrógeno y CO_2 , mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Finalmente ocurre la metanogénesis, que produce metano principalmente a partir de acético y a partir de H_2 y CO_2 .⁵

Cualquier sustrato se compone de los tres tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas y lípidos. La hidrólisis de cada tipo de compuesto se realiza por diferentes grupos enzimáticos.⁵

Uno de los principales componentes de la materia orgánica, sobre todo en residuos ganaderos, son los materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa. La lignina es un material altamente refractario a la degradación anaerobia, afectando también a la biodegradabilidad de la celulosa, de la hemicelulosa y de otros polímeros, convirtiéndose su degradación en el proceso limitante de la velocidad de la hidrólisis y por tanto, de la degradación anaerobia de determinados sustratos. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos.⁵

Las proteínas son hidrolizadas por proteasas en proteosomas, peptonas, péptidos y aminoácidos. Hay proteasas extracelulares, conocidas como proteinasas que atacan la proteína entera, y las peptidasas, intracelulares, que cortan aminoácidos del extremo de proteínas y péptidos. Los aminoácidos producidos son degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro reducido. Generalmente la tasa de hidrólisis de proteínas es menor que la de los carbohidratos. La degradación de lípidos en ambientes anaerobios consiste en una ruptura inicial de las grasas por un grupo de enzimas hidrolíticas en los correspondientes ácidos grasos de cadena larga y moléculas de glicerol o

galactasa. Una molécula de fosfolípidos produce un equivalente de ácido fosfórico, uno de glicerol y dos de ácidos grasos.⁵

ETAPA FERMENTATIVA O ACIDOGÉNICA

Las bacterias ácido-propiónicas, del género *Propionibacterium*, llevan a cabo un proceso distinto, conocido como fermentación ácido-propiónica, en el que se produce la fermentación del ácido láctico, carbohidratos y polihidroalcoholes, produciendo, principalmente, ácido propiónico, succínico, acético y CO₂. Sus requerimientos nutricionales son complejos y crecen con lentitud.⁵

Por otra parte la ruta principal de degradación de Ácidos grasos de cadena larga (AGCL) es la β -oxidación. Los ácidos grasos libres (AGL) son introducidos en la célula a través de la pared celular. Este proceso puede ser desarrollado por un gran número de microorganismos, incluso un número mayor que los organismos capaces de hidrolizar las grasas. Una vez dentro de la célula, el ácido graso es convertido en el correspondiente tio-ester-CoA, lo que sirve tanto para activar su degradación, como para disminuir el efecto tóxico de los ácidos grasos libres.⁵

La β -oxidación es un ciclo en espiral que va liberando un acetil-CoA en cada bucle, produciendo, principalmente, ácido acético. Si se trata de un ácido con un número, n, impar de átomos de carbono, al final se obtendrían n-1 acetil-CoA y un propionil-CoA. Durante el proceso se produce la deshidrogenación del ácido graso, liberándose hidrógeno molecular a través del intermediario NADH. El H₂ es el principal aceptor de electrones.⁵

La β -oxidación de AGCL es una reacción endotérmica, lo que unido a la linealidad de la ruta metabólica, hace que el proceso sea muy dependiente de la acción simbiótica de los microorganismos consumidores de hidrógeno para que se pueda producir.⁵

FASE ACETOGÉNICA

Las moléculas orgánicas solubles son fermentadas por varios organismos fermentativos formando compuestos que pueden ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más

reducidos (láctico, etanol, propiónico, butírico, principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas a substratos que puedan utilizar las metanogénicas.⁵

Las proporciones entre los productos de la fermentación varían en función del consumo de H₂ por parte de las bacterias que utilizan hidrógeno. Cuando el H₂ es eliminado de forma eficiente las bacterias fermentativas no producen compuestos reducidos como el etanol, favoreciendo la producción de H₂ y la liberación de energía en forma de ATP.⁵

La actividad de algunas bacterias fermentativas y acetogénicas depende de la concentración de H₂, siendo posible sólo a valores muy bajos de presión parcial de H₂. La eliminación continua de H₂ mediante oxidación por CO₂ (bacterias metanogénicas hidrogenotróficas) estimula la acción de las bacterias fermentativas, al eliminar un producto de la reacción.⁵

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acetato), otros (valerato, butirato, propionato, algunos aminoácidos, etc.) necesitan ser transformados en productos más sencillos, acetato e hidrógeno, a través de las bacterias acetogénicas.⁵

Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Los procesos acetogénicos son energéticamente difíciles, por lo que necesitan ser "ayudados" por los organismos metanogénicos u otros organismos consumidores de hidrógeno y la energía libre de la reacción depende de la presión parcial de hidrógeno del medio.⁵

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos, que consumen H₂ y CO₂, y producen acetato. Los principales exponentes son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en azúcares, al contrario que los metanogénicos, siendo más parecidos a los fermentativos que a los metanogénicos, a pesar de utilizar los mismos substratos.⁵

FASE METANOGENICA

Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de *biometanización*. Las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H₂, CO₂, formiato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea*, y, morfológicamente, pueden ser bacilos cortos y largos, cocos de varas ordenaciones celulares, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, existiendo tanto Gram positivos como Gram negativos. Todas las bacterias metanogénicas que se han estudiado poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación de metano.⁵

Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal, dividiéndose en los *hidrogenotróficos*, que consumen hidrógeno y fórmico, y los metilotróficos o *acetoclásticos*, que consumen grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas.⁵

La mayoría de los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, mientras que sólo dos géneros son capaces de utilizar el acetato. A pesar de ello, en ciertos ambientes anaerobios, éste es el principal precursor del metano, considerándose que alrededor del 70% del metano producido en los reactores anaerobios se forma a partir de acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son *Methanosarcina* y *Methanothrix*, siendo el principal exponente *Methanosarcina barkeri*, que es capaz de crecer en diversos sustratos, entre los que están H₂ y CO₂, acetato, metanol, metilaminas y CO.⁵

PRODUCTOS FINALES

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, son el biogás y un efluente estabilizado. El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente por metano y dióxido de carbono y pequeñas proporciones de otros gases, como H₂S, H₂, NH₃, etc. La composición o riqueza del biogás depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. En el Cuadro 1 se muestran valores medios de composición del efluente en función del sustrato utilizado.⁵

La potencial calorífica inferior del biogás es aproximadamente de 5.250 kcal/m³, para una riqueza en metano de 60%.⁵

En cuanto al efluente sus características dependen mucho del tipo de sistema, pero tratando con sistemas de mezcla completa y con residuos orgánicos (Cuadro1), se puede decir que el efluente es la mezcla del influente estabilizado y la biomasa microbiana producida. Durante el proceso anaerobio parte de la materia orgánica se transforma en metano, por lo que el contenido en materia orgánica es menor que en el influente. Se trata, además, de un producto más mineralizado que el influente, con lo que normalmente aumenta el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuye el nitrógeno orgánico.⁵

Parámetros	Influente (carga inicial)	Efluente (carga final)
Nitrógeno total (%)	0.1036	0.058
Fósforo total (mg L ⁻¹)	179	17.2
Potasio total (mg L ⁻¹)	263.9	363.8
Calcio total (mg L ⁻¹)	56.6	19.7
Magnesio total (mg L ⁻¹)	109.3	59.3
Hierro total (mg L ⁻¹)	2.64	1.159
Cobre total (mg L ⁻¹)	1.3	0.225
Zinc total (mg L ⁻¹)	26.7	0.611
pH	7.6	7.05
CE (dS m ⁻¹)	5.8	4.08
DQO (mg L ⁻¹)	2640.8	1399
DBO (mg L ⁻¹)	543	172.2
SSed (mg L ⁻¹)	1672	210
UFC coliforme en 100 mL ⁻¹	9 x 10 ¹¹	0

CUADRO 1 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos en el influente y efluente del biodigestor anaerobio. Tomado de: Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. Terra 19:353-362,2001

La calidad del efluente obtenido de la biodigestión de la excreta varía de acuerdo con la cantidad de sólidos sedimentables totales contenidos en ésta, ya que estos sólidos son los que sirven de alimento a los microorganismos responsables de la biodigestión.⁷

PARAMETROS AMBIENTALES Y DE CONTROL

Para que las bacterias aseguren su ciclo biológico en el proceso de digestión anaerobia es necesario que se presenten en condiciones óptimas los siguientes factores: Temperatura, hermetismo, presión, tiempo de retención, relación C/N 30:1, porcentaje de sólidos, pH y agitación.⁷

TEMPERATURA

La temperatura es un parámetro importante en la operación del biodigestor anaerobio, debido a que tiene que procurarse un crecimiento bacteriano adecuado y aumentarse la velocidad de las reacciones bioquímicas que se dan en el proceso, los requerimientos nutrimentales de los microorganismos anaerobios son especiales, debido a su lento metabolismo y a que la regeneración de nuevas células también es muy baja, la fijación de los elementos nutritivos como el nitrógeno y el fósforo es escasa, no así el consumo de carbono que es transformado a metano y a dióxido de carbono.⁷

El proceso se lleva a cabo satisfactoriamente en rangos bien definidos, entre los 10°C a 37°C, para la flora mesofílica y entre 55 a 60°C para el rango termofílico. Para que las bacterias trabajen en forma óptima, se requiere mantener temperatura lo mas constante posible es decir sin bruscas variaciones durante el día. El proceso fermentativo anaeróbico no genera una cantidad apreciable de calor, por lo tanto las temperaturas mencionadas deben lograrse desde el exterior.

El proceso mesofílico es el más estable, y más adecuado para utilizar en el medio rural, con biodigestores de pequeño volumen y bajo costo.²

La solubilidad de los gases NH_3 , H_2S y H_2 desciende al aumentar la temperatura, favoreciéndose la transferencia líquido-gas, y por tanto desapareciendo más rápidamente del medio acuoso.⁵

Esto supone un efecto positivo, dada la toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaerobios de los citados compuestos. Una posible desventaja de este fenómeno es que el descenso de la solubilidad del CO_2 , que implicará un aumento del pH en los reactores termofílicos, lo que en condiciones de alta concentración de amonio puede ser negativo.⁵

La solubilidad de la mayoría de las sales aumenta con la temperatura. Las sales orgánicas son más solubles a altas temperaturas, por lo que la materia orgánica es más accesible para los microorganismos, y aumenta la velocidad del proceso. Sin embargo, si se trata de compuestos tóxicos, al aumentar su solubilidad con la temperatura serán potencialmente más tóxicos, lo que puede explicar parcialmente la mayor inhibición de determinados compuestos orgánicos en el rango termofílico, como los ácidos grasos de cadena larga.⁵

Además, la temperatura influye directamente en determinados equilibrios químicos, con gran influencia sobre el proceso anaerobio, como los del amonio-amoniaco libre o ácidos grasos volátiles ionizados-no ionizados. En general, con la temperatura se favorecen las formas no ionizadas, que resultan más tóxicas para los microorganismos.⁵

La viscosidad de los líquidos y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura, lo que implica menores requerimientos energéticos para la mezcla (agitación). A altas temperaturas se produce también una mejor sedimentación de los sólidos.⁵

La producción de biogás, en ausencia de inhibidores, aumenta con la temperatura, puesto que aumenta la tasa de crecimiento de los microorganismos; temperaturas más bajas implican tiempos de retención más largos, y por tanto mayores volúmenes de reactor. La tasa de hidrólisis también aumenta con la temperatura, por lo que el régimen termofílico puede tener gran interés al tratar residuos en los que la hidrólisis sea la etapa limitante, como los residuos con alto contenido en componentes lignocelulósicos.⁵

La sensibilidad a los cambios de temperatura ambiental depende de diversos factores, la adaptación del cultivo, del modo de operación y el tipo de bioreactor.⁵

CONTENIDO DE NUTRIENTES

El proceso anaerobio se caracteriza, frente a procesos aerobios, por los bajos requerimientos de nutrientes, debido fundamentalmente a los bajos índices de producción de biomasa. A pesar de ello, la biomasa necesita para su desarrollo el suministro de una serie de nutrientes minerales, además de una fuente de carbono y de energía. Para determinados procesos necesita, además, compuestos orgánicos especiales, como vitaminas. Los principales nutrientes del sistema anaerobio son nitrógeno, sulfuro, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio, riboflavina y vitamina B12.⁵

Otros autores han expresado las necesidades de nitrógeno y fósforo en función de la concentración de carbono de la alimentación, considerándose que la relación C/N debe oscilar entre 15-30:1, y la C/P de 75-113.⁵

En general, los residuos ganaderos suministran una suficiente concentración de todos los nutrientes, siendo más común la presencia de problemas por exceso que por defecto.⁵

pH

Los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación. Parece ser que el pH afecta fundamentalmente a la actividad enzimática de los microorganismos, mediante: cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como el carboxil y amino; alteración de los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo el substrato; y desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas.⁵

Para que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3. Sin embargo, el proceso de inhibición parece ser

completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración.⁵

El pH es también una importante variable de diagnóstico de los sistemas anaerobios, pues muchos fenómenos tienen influencia sobre el mismo.⁵

Ejemplos clásicos son las sobrecargas orgánicas, o la presencia de un inhibidor de la etapa metanogénica, que pueden provocar desequilibrios entre la producción y el consumo de ácidos grasos volátiles, produciendo la acumulación de éstos y el consiguiente descenso del pH, produciéndose la *acidificación del reactor*. En función de la alcalinidad del medio, la bajada de pH será más o menos rápida. En residuos ganaderos, que presentan altas alcalinidades, la bajada de pH será poco importante incluso aunque se produzcan importantes acumulaciones de ácidos.⁵

Por otro lado, el pH es un importante modulador del sistema puesto que influye en varios equilibrios químicos, pudiendo desplazarlos hacia la formación de una determinada componente que tenga influencia en el proceso. Su papel es fundamental en el equilibrio amonio - amoníaco, teniendo, por tanto, una gran importancia en el proceso general, por ser el amoníaco libre un importante inhibidor de la fase metanogénica.

El pH influye también en el mecanismo de inhibición de degradación de propionato por acético, habiéndose descrito una mayor inhibición a pH bajos, debido a que, en este caso, el componente tóxico es la forma no ionizada del ácido acético, que aumenta con la acidez del medio.⁵

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del medio. Esta capacidad tampón puede ser proporcionada por un amplio rango de sustancias, siendo por tanto una medida inespecífica. En el rango de pH de 6 a 8, el principal equilibrio químico que controla la alcalinidad es el dióxido de carbono-bicarbonato.⁵

La relación de alcalinidad (RA), se define como la relación entre la alcalinidad debida a los AGV y la debida al bicarbonato, recomendándose no sobrepasar un valor de 0,3-0,4 para evitar la acidificación del reactor.⁵

La alcalinidad al bicarbonato debe mantenerse por encima de 2500 mg/L para asegurar la estabilidad del digestor.⁵

Para ayudar a mantener y corregir el pH ácido, mas rápidamente, se puede adicionar cal, o agua de cal.²

VELOCIDAD DE CARGA Y TIEMPO DE RETENCIÓN

El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, es el tiempo que requieren las bacterias para digerir el efluente y residuos, y producir biogás.

Este tiempo, por tanto, dependerá de la temperatura de la región donde se vaya a instalar el biodigestor. Así, a menores temperaturas se requiere un mayor tiempo de retención que será necesario para que las bacterias, que tendrán menor actividad, tengan tiempo de digerir y de producir biogás.

Se calcula dividiendo el volumen del biodigestor por el volumen de carga diaria, en consecuencia se expresa el valor en días.²

De acuerdo al diseño del biodigestor, en el mezclado y la forma de extracción de los efluentes pueden existir variables que determinen diferencias entre los tiempos de retención de líquidos y sólidos, debido a lo cual suelen determinarse ambos valores.

Velocidad de carga se define como el volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor. Este valor tiene una relación de tipo inversa con el tiempo de retención, dado que a medida que se incrementa la carga volumétrica disminuye el tiempo de retención.³

Existen diferentes formas de expresar este parámetro siendo los más usuales los siguientes: Kg de material/día; Kg de materia seca/día; kg de sólidos volátiles/día todos expresados por metro cúbico de digestor.³

Las cantidades de sólidos y sólidos volátiles se extraen afectando a las cantidades en kg de material cargado con los porcentajes de sólidos o sólidos volátiles que se obtiene por análisis.³

AGITACIÓN

Los objetivos buscados con la agitación son: remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanógenas, mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios sin actividad biológica.³

En la selección del sistema, frecuencia e intensidad de la agitación se deberán realizar las siguientes consideraciones: El proceso fermentativo involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias. La ruptura de ese equilibrio en el cuál el metabolito de un grupo específico servirá de alimento para el siguiente implicará una merma en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de gas.³

La velocidad de agitación es un parámetro que puede influir en el desarrollo del proceso, siendo necesario un equilibrio entre la buena homogeneización y la correcta formación de agregados bacterianos. Una velocidad de agitación alta, por encima de 700 rpm, puede disminuir ligeramente la producción de biogás, por ruptura de agregados bacterianos.⁵

Existen varios mecanismos de agitación utilizados desde los más simples que consisten en un batido manual o el provocado por la entrada y salida de los líquidos hasta sofisticados equipos que involucran agitadores a hélice, recirculadores de sustrato e inyectores de gas.³

FACILITADORES

El consumo de carbono es superior al del nitrógeno al momento de la digestión, en forma amoniacal, en relación C/N=30:1, por lo cual se requiere de una cantidad de fósforo en una proporción N/P=5:1. Además requieren de metales alcalinos y alcalinotérreos, como sodio, potasio, calcio y magnesio en pequeñas concentraciones como micronutrientes; de lo contrario, puede ser causa de la inhibición de la digestión. Para cumplir con las funciones enzimáticas también requiere de pequeñas concentraciones de hierro, cobre, zinc, níquel, azufre, etc.

Los que se encuentran en las cantidades necesarias, en todos los residuos orgánicos habitualmente utilizados.²

El crecimiento bacteriano dentro de los digestores sigue desde su arranque la curva típica del crecimiento bacteriano en la cual puede distinguirse claramente tres etapas (Figura 1):

La de arranque (I), la de estabilización (II) y la de declinación (III) (Figura1).³

La primera etapa puede ser acortada mediante la inclusión de un determinado porcentaje de material de otro digestor rico en bacterias que se encuentran en plena actividad. Esto es particularmente importante en los digestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente después de vaciar el efluente resultante de la digestión.³

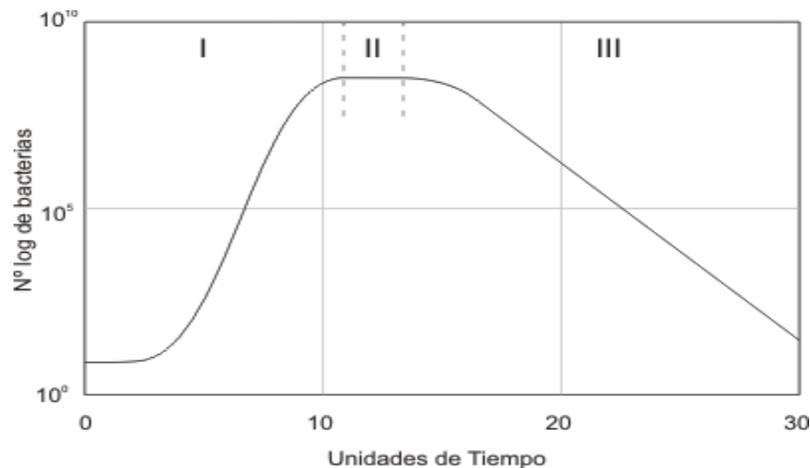


Figura 1 Curva de crecimiento bacteriano Arranque (I), estabilización (II) y declinación (III).

Tomado de los documentos de cambio climático de SAGARPA en sagarpa.gob.mx

TÓXICOS E INHIBIDORES

El problema más acentuado para la aceptación de los sistemas que utilizan energías renovables, es la resistencia al cambio que produce en la rutina habitual, o la nueva responsabilidad que genera. Esto sucede cuando el sistema requiere de la atención de los usuarios.

El problema de mantenimiento de la biodigestión se centra principalmente en que se está interactuando con seres vivos, y para que continúen en esta condición hay que proveerle de condiciones ambientales que permitan el desempeño de su función, la generación de biogas. ⁶

La introducción de sustratos en un digestor puede ocasionar problemas de inhibición y sobrecarga orgánica y ser capaz de preverlo puede ser vital para el funcionamiento de una planta de tratamiento. ⁵

La presencia de un compuesto tóxico para los microorganismos se refleja en una menor tasa de crecimiento de los mismos. No todos los microorganismos se ven afectados de la misma forma por los mismos compuestos. Se dice que hay tres tipos básicos de inhibición, en función de la reversibilidad y del parámetro cinético al que afecta. ⁵

El principal modulador de la digestión anaerobia de residuos ganaderos, especialmente en residuales de cerdo, es la inhibición por amoníaco libre, cuya concentración es una función del pH y la temperatura, aumentando con dichas variables. Pero si el efecto tóxico aumenta, el pH puede bajar, debido a la acumulación de ácidos grasos volátiles (principales intermediarios del proceso), con lo que disminuirá la concentración de amoníaco libre y, por tanto el efecto inhibitor. Además el pH afecta a las velocidades de crecimiento de los microorganismos. ⁵

En presencia de sulfatos las bacterias metanogénicas compiten con las bacterias sulfato-reductoras por los sustratos útiles, mostrando las últimas, ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras, tanto sobre las que consumen hidrógeno.

El resultado de esta competencia determinará la proporción de sulfhídrico y metano en el biogás producido. El sulfato es, además, un importante inhibidor. Además de esa competencia, el sulfhídrico es tóxico a altas concentraciones para muchos grupos bacterianos. Parece que la forma tóxica es la no ionizada, ya que es la que puede atravesar la membrana celular, por lo que la inhibición se ve

favorecida a pH bajos y a bajas temperaturas (predominio de la forma no ionizada y mayor solubilidad en la fase líquida).⁵

En general, los microorganismos metanogénicos son más sensibles que los acetogénicos y los acidogénicos.⁵

Altas concentraciones de ácidos grasos de cadena larga pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia. Las grasas neutras (triglicéridos) son hidrolizadas rápidamente a ácidos grasos de cadena larga (AGCL). Las concentraciones límite de inhibición no están muy claras en la bibliografía y depende mucho del tipo de ácido graso, así como de la forma en que se encuentra. El efecto inhibitorio de los ácidos grasos de cadena larga provoca un aumento de la duración de la fase *Log* en ensayos en discontinuo.⁵

Aunque la adsorción de los AGCL sobre la pared celular puede jugar un papel importante sobre la inhibición, ésta se ha relacionado con la concentración de AGCL, más que con la relación de ácidos grasos/biomas. El efecto tóxico se ha descrito como no reversible, y la forma tóxica son los ácidos grasos libres. El efecto inhibitorio de los lípidos está muy relacionado con la adaptación de los microorganismos, y prácticamente condicionados a la existencia de microorganismos acetogénicos que degraden AGCL a medida que se van produciendo por hidrólisis de las grasas (triglicéridos u otras formas), evitando así, alcanzar concentraciones tóxicas.⁵

En presencia de calcio el efecto tóxico de los ácidos grasos de cadena larga disminuye debido a la precipitación de las sales cálcicas.⁵

Todos los cationes pueden proporcionar toxicidad a algún nivel de concentración, aumentando la toxicidad con el peso molecular, por lo que los metales pesados son los que provocan toxicidad a menor concentración.⁵

Los niveles de inhibición varían mucho en función de la fuente, debido a varios factores. En primer lugar la toxicidad es menor si la introducción en el reactor es gradual. Los metales pesados precipitan en presencia de sulfuros, desapareciendo de la solución, por lo que resultan menos tóxicos para los microorganismos, pudiendo llegar a tolerarse elevadas concentraciones de metales pesados.⁵

Otros cationes como calcio, sodio, potasio, etc., pueden resultar inhibidores para el proceso anaerobio, a concentraciones altas. La concentración de inhibición por cationes depende mucho de la presencia de posibles antagonistas. El potasio es antagonista del sodio, del magnesio y del calcio; el sodio lo es del amonio, potasio, magnesio y calcio; el calcio del potasio; el magnesio del potasio y el amonio del potasio.⁵

La acumulación de propiónico en el reactor, especialmente de la forma no ionizada, puede inhibir la acetogénesis a partir de propiónico, y la metanogénesis acetoclástica.⁵

La acumulación de acético, puede inhibir la acetogénesis a partir de propiónico, y la acetogénesis a partir de butírico. Sin embargo, son necesarias concentraciones de acético muy altas para que llegue a afectar a la producción de metano, por encima de 4000 mg/L o más.⁵

Los antibióticos son comúnmente añadidos a las dietas de los animales, para mejorar la producción o para control de enfermedades. La presencia de penicilina y tetraciclina, procedentes de la dieta de los animales inhiben el proceso anaerobio. Sin embargo otros antibióticos no muestran ningún efecto sobre el proceso. Los restos de desinfectantes, procedentes de la limpieza y desinfección de las granjas en los residuos animales pueden resultar tóxicos para el sistema anaerobio.

La toxicidad dependerá, básicamente de la concentración, de la biodegradabilidad de los mismos, y del tiempo transcurrido desde su utilización, hasta la entrada del residuo en el sistema anaerobio.⁵

Los residuos de cultivos agrícolas, susceptibles de ser utilizados para producción de metano, pueden contener algunos compuestos tóxicos para el crecimiento de los microorganismos anaerobios, por ejemplo, residuos de pesticidas, compuestos fenólicos, terpenos, resinas, etc.

Al realizar un pretratamiento químico con ataque ácido o básico, se pueden formar, también, compuestos tóxicos.⁵

CARÁCTERÍSTICAS DE LOS BIODIGESTORES

Para que el biodigestor actúe de forma correcta, deberá reunir las siguientes características:²

- a) Deberá ser hermético para evitar el escape del influente o el gas hacia el exterior. Y principalmente evitar la entrada de aire.
- b) Térmicamente aislado lo cual evita la modificación de la temperatura y la mantiene constante en las cámaras.
- c) El contenedor primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad y tapa pesada.
- d) Deberá contar con medios para la carga y descarga de fácil acceso y limpieza.
- e) Los digestores deberán tener acceso para realizar tareas de mantenimiento.
- f) Medio para romper las costras que se forman.

ELEMENTOS PRINCIPALES

El biodigestor cualquiera que sea debe incluir los siguientes elementos en su estructura.

CÁMARA DE CARGA

Debe permitir introducir el material orgánico disponible al biodigestor, que permanezca el tiempo necesario, en ausencia total de oxígeno. Dicha cámara debe estar dotada de elementos para la agitación de la masa en digestión, con el fin de que mejore el contacto entre el sustrato que ingresa y las bacterias.²

CONDUCTO DE CARGA

Comunica la cámara de carga con el biodigestor propiamente dicho. Por el mismo circula el material ya preparado, que generalmente ingresa por acción de la

gravidad, al estar ubicada la cámara de carga por sobre el nivel de líquido en el biodigestor. Conviene que la conducción sea recta, sin curvas que puedan producir que el material se atasque al ingreso, y que también permita una fácil limpieza.²

CONDUCTO DE DESCARGA

Posibilita la extracción del material estabilizado, que ha cumplido el tiempo de residencia dentro del biodigestor. Se coloca el extremo del caño de descarga a una cota tal con respecto al nivel del terreno, que permita la salida del residuo por el principio de “vasos comunicantes”. El dimensionamiento y diseño dependerá fundamentalmente del uso que se le dará al efluente. Como mínimo deberá tener un volumen 2 a 3 veces superior al de descarga diario.^{2,3}

AGITADOR

Puede construirse colocando un caño camisa que se instala, en forma inclinada dentro de la cámara de digestión, mediante una unión que impida pérdidas de líquido hacia el exterior. También debe sobresalir hacia el exterior por sobre el nivel de descarga del líquido. Dentro de este se coloca un caño eje sobre el cual se ajustan paletas mezcladoras. El impulsor puede ser una placa plana o con forma de hélice que se hace girar sobre su propio eje. El movimiento desde el exterior se logra mediante una manija accionada manualmente.²

CLASIFICACIÓN

De acuerdo a la frecuencia de cargado y su funcionamiento, los sistemas de biodigestión se clasifican variando entre autores.⁸

POR LA FRECUENCIA DE CARGA:

Sistema Batch: Se caracterizan por una carga y vaciado total de la cámara de digestión. De uso en laboratorios y en el tratamiento de materias vegetales. Con o sin agitación. Requieren para acelerar su arranque de una proporción de inóculo

20%. Su curva de producción de gas sigue la característica (arranque-estabilización-agotamiento).³

Esto obliga a fin de mantener una producción de gas estable a lo largo del tiempo a poseer por lo menos tres o cuatro digestores de este tipo cada uno de los cuales se hallará operando en las distintas etapas (Figura 2). Lo que permite mantener la producción de biogas en un cierto nivel uniforme.³

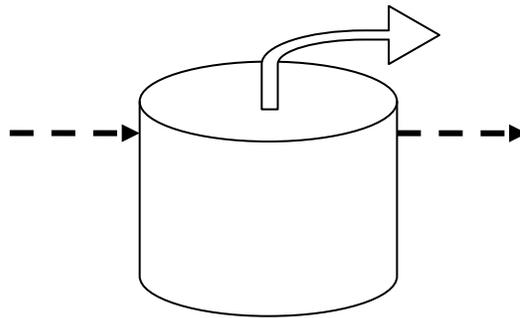


Figura 2 Sistema de vaciado total Diseño propio de Paulina Aspeitia

Sistema continuo o semicontinuo: En este tipo de digestores el volumen que ingresa desplaza una cantidad equivalente de efluente que se evacua por la salida. De este modo el volumen del substrato en la cámara de digestión se mantiene constante. Los continuos se cargan generalmente en forma diaria, a diferencia de los semicontinuos se descargan totalmente una o dos veces por año que generalmente coincide con el período de siembra para aprovechar el poder fertilizante de los residuos de la digestión y de los lodos fermentados, parte de estos últimos es utilizada en el nuevo arranque.³

El tiempo de permanencia de la biomasa dentro del digestor estará dado por el cociente entre el volumen de la cámara de digestión y el de la carga diaria (Figura3). Dicho valor no es exacto debido a que la parte del material introducido puede salir en un período más corto, lo que se trata de minimizar mediante un adecuado diseño de la cámara. La mayor parte de los digestores difundidos a lo

largo de todo el mundo pertenecen a esta categoría y existen dentro de ella enormes variaciones sobre el mismo principio.³

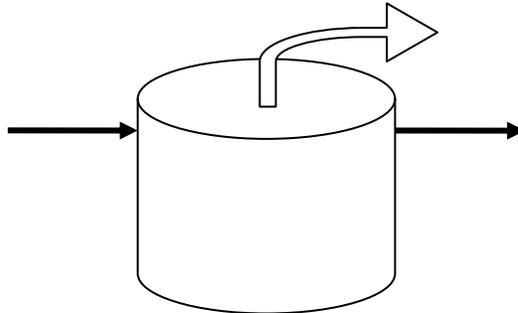


Figura 3 Sistema continuo Diseño propio de Paulina Aspeitia

TIPOS DE BIODIGESTORES SEGÚN EL MEZCLADO

Mezclado completo: En estos digestores se busca que el sustrato en fermentación dentro de la cámara se mezcle en forma total, en general diariamente (Figura 4). En el caso de los reactores calefaccionados, esta acción asegura una distribución uniforme de la temperatura en todo el volumen. Existen diversos medios para lograr este fin, entre los que podemos mencionar: la agitación de líquidos mediante bombas internas o externas al digestor y la reinyección de biogás dentro de la cámara produciendo un intenso burbujeo.³

Se debe tener mucho cuidado en la intensidad y periodicidad de la agitación, para no afectar el delicado equilibrio bacteriano.³

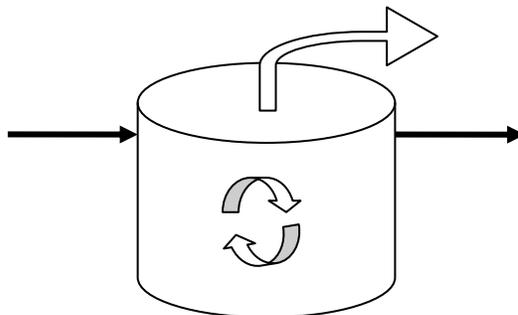


Figura 4 Sistema de mezclado completo. Diseño propio por Paulina Aspeitia

Mezclado parcial: Los dos factores a tener en cuenta en la inoculación de un digestor de mezclado parcial es la proporción en que se agrega el sustrato y la agitación del mismo (Figura5). Cuanto mayor sea la proporción y menor el tiempo de retención, mayor será la eficacia, siendo necesaria una agitación proporcionalmente más constante.³

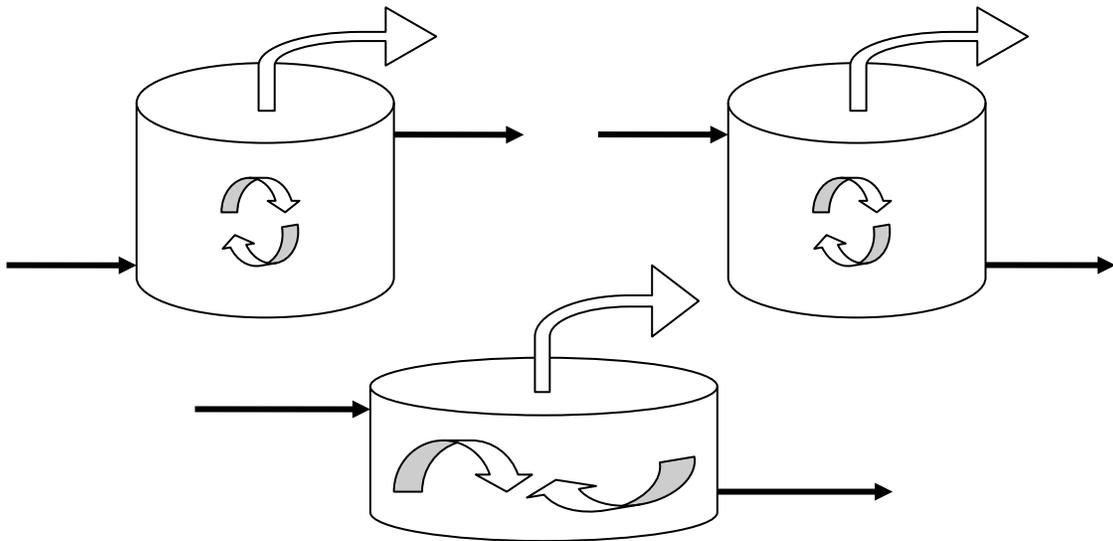


Figura 5 Ejemplos de sistema de mezclado parcial' Diseño propio Paulina Aspeitia.

En este grupo se encuentran los pequeños digestores rurales en los cuales los métodos de agitación son muy rudimentarios (agitadores del tipo manual o rotación de la campana gasométrica). Los que se realizan con el fin de evitar la formación de la perjudicial costra.³

En otros casos como los digestores del tipo horizontal la agitación se logra mediante la circulación del sustrato dentro de la cámara de digestión provista de una serie de tabiques.³

El flujo puede ser también ascendente o bien descendente, lo que dependerá de la ubicación de las cañerías de entrada y salida del sustrato.³

POR EL FLUJO BACTERIANO:

Contacto anaeróbico: En estos digestores la pileta de sedimentación a la salida de los mismos le da la posibilidad a las bacterias que han salido con el efluente a asentarse y decantar para luego ser reintroducidas en forma de lodo, mezclado con material de carga como inoculo (Figura 6).³

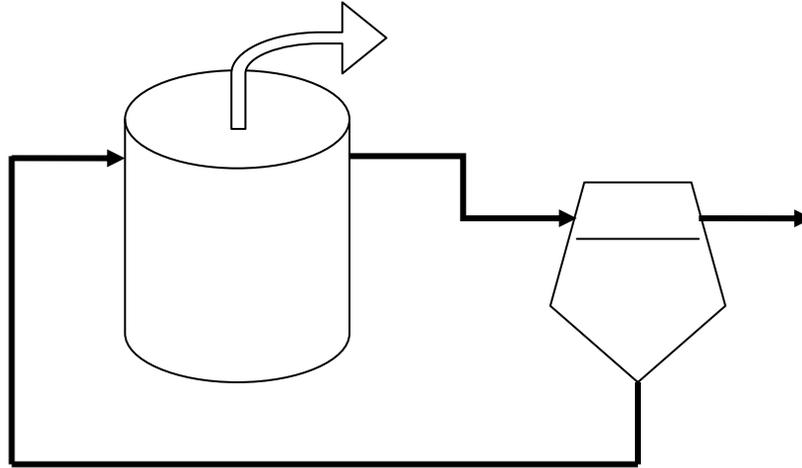


Figura 6 Sistema con fosa de sedimentación para el efluente. Diseño propio Paulina Aspeitia

U.A.S.B. (Digestor de Manto de Barros con Flujo Ascendente): En su interior posee separadores y mamparas estratégicamente ubicadas las que generan zonas de tranquilidad en las cuales las bacterias han conformado glomérulos (floculación) que sedimentan y así se evita que salgan con el efluente que es sacado por la parte superior de la cámara de carga. Este tipo de digestor es especialmente apto para el tratamiento de desechos agroindustriales como la vinaza, no admite partículas insolubles.³

Lecho fluidizado: En este tipo de reactor unas pequeñas partículas se mantienen en suspensión dentro de la cámara de digestión. Las bacterias se adhieren a estas partículas, que no son atacadas y salen con ellas. Mediante el filtrado del efluente se pueden recuperar estas partículas juntamente a las bacterias y se reintroducen en el digestor. Este tipo de reactor está poco difundido y las mayores referencias

son de plantas a nivel laboratorio o piloto. Los hay de flujo ascendente y descendente.³

Filtro anaeróbico: Estos digestores tienen la particularidad de ser alargados (relación alto/diámetro mayor a 1), últimamente se está experimentando con filtros horizontales, pero los verticales siguen siendo más eficientes, en su interior poseen un medio fijo que puede estar constituido por cañerías reticuladas, piedra caliza, formas plásticas de gran relación superficie/volumen, etc. Sobre estos materiales no atacables se adhieren las bacterias y así se evita su pérdida, que disminuye notablemente los tiempos de retención. Existen dos variantes: de flujo ascendente y de flujo descendente.³

Debido a estos elementos filtrantes ubicados dentro de la cámara de digestión, no admiten líquidos con material insoluble en suspensión ya que dichos sólidos bloquearían el pasaje del substrato. Este tipo de digestores está difundándose últimamente para determinados usos.³

Tanto este digestor, como los dos anteriores admiten tiempos de retención muy bajos (0,5 a 3 días) con muy altos niveles de eficiencia (se han llegado a valores de producción de biogas de 7 veces el volumen del reactor por día). Existen de flujo ascendente y descendente.³

POR NÚMERO DE ETAPAS:

Una etapa: Todos los tipos de digestores vistos hasta este momento se agrupan en esta categoría debido a que todas las etapas de la digestión anaeróbica se cumplen en una única cámara, en la cual todas las bacterias están sometidas a las mismas condiciones.³

Dos etapas: En estos reactores se ha dividido en dos cámaras de digestión separadas, donde en la primera se desarrolla la etapa acidogénica y en la segunda la acética y la metanogénica. Esto permite optimizar las condiciones de desarrollo de cada tipo de bacterias y extraer los sólidos indigeribles antes que pasen a la etapa metanogénica.³

Estos digestores no han sobrepasado la etapa experimental y de plantas piloto y aún resta solucionar una serie de problemas de funcionamiento a gran escala para llegar a una amplia difusión.³

Se ha dejado intencionalmente para comentar en esta última parte los Rellenos Sanitarios (Landfills), puesto que no son un tratamiento anaeróbico diferente o cámara de digestión especialmente construida para tal fin, sino que sólo se hacen excavaciones las cuales serán rellenas generalmente con residuos urbanos, en su mayoría sólidos, y de los cuales no se obtendrá ningún efluente tratado, sólo quedará la porción de sólidos que no se pudo degradar y el lixiviado. El biogas puede o no recolectarse, para hacerlo será menester instalar cañerías agujereadas en lechos de piedras. Generalmente tramos horizontales dispuestos en diferentes niveles que convergen a uno vertical, que llega a la superficie exterior.³

MODELOS MÁS DIFUNDIDOS:

Más del 80 % de las plantas de biogas difundidas en el mundo pertenecen a dos tipos de diseño, cuyos nombres derivan de los países en los cuales se realizaron los primeros modelos y posteriormente se les dio una difusión masiva. Estos modelos son el tipo Chino e Hindú.³

Modelo Chino: Este tipo de digestor fue concebido respetando las condiciones imperantes en su país de origen. Su diseño responde a una maximización del ahorro de material sin entrar en el cálculo de la demanda de la mano de obra.³

Su forma se asemeja a una esfera y el gas se almacena dentro de la campana fija a presión variable, la cuál se obtiene desplazando el líquido en digestión hacia una cámara llamada de hidropresión.³

Estos digestores se cargan en forma semicontinua realizándose una primera carga con material celulósico y estiércol, además del inóculo correspondiente, hasta un 70% de la capacidad luego se sigue cargando como un digestor continuo; a los 120 a 180 días se descarga en forma total y se reinicia el ciclo. Fuera de China generalmente se maneja estos digestores en forma continua.³

Modelo Hindú: Este tipo de digestor del cuál han derivado infinidad de variaciones, posee una cámara de digestión de forma cilíndrica sobre la cual flota la campana gasométrica generalmente construida en hierro. La salida del efluente se efectúa por rebalse.

Este digestor funciona en forma continua realizándose por lo general una carga diaria o cada dos o tres días. El vaciado completo sólo se realiza en el caso de requerir alguna reparación o limpieza. El gas gracias al gasómetro flotante se almacena a presión constante y volumen variable. Esta presión de salida puede ser incrementada con la adición de contrapesos.³

Este digestor demanda un mayor gasto de materiales y la campana gasométrica es generalmente lo más caro del equipo. Su funcionamiento es muy sencillo y no presenta serios inconvenientes en el área rural.³

SEGÚN SU FORMA:

Las formas de digestores pueden ser: ovoide, cilindro o paralelepípedo vertical, domo, cilindro o paralelepípedo horizontal.³

CALCULOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN

El volumen del digestor se calcula en función de:

$$V = \frac{C(R(1+D))}{Y_d} tF$$

Donde C es la capacidad deseada de la planta de gas, R es la relación estiércol húmedo/estiércol seco, D es el peso de agua añadida a cada unidad de peso de estiércol la cual será de 1L, tF es el tiempo de fermentación en 40 días el cual según la temperatura media que fue calculada de 40°C a 1m. de profundidad en el sitio donde se instalara el biodigestor, 500L es el gas producido por unidad de peso de estiércol seco (m³/kg), d es la densidad de la mezcla estiércol-agua. La relación producción de gas, volumen del digestor indicaría una temperatura de trabajo de alrededor de 35 °C para 20 días de retención.⁶

La velocidad de carga volumétrica se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$L=C/(Y*V)$$

Donde C es la capacidad deseada de la planta de gas, V es el volumen y Y es el gas producido por unidad de peso del estiércol seco.

Hay que recordar que hasta ahora se ha hablado en litros para los volúmenes, y que a partir de aquí los volúmenes se trabajan en metros cúbicos, o sea 1000 litros equivalen a un metro cúbico.

El volumen del gasómetro, indica el valor máximo de almacenamiento de biogas que puede contener este reservorio. Su capacidad dependerá de las necesidades particulares de cada proyecto en función de la distribución de los consumos diarios.²

Se calcula dividiendo el volumen del biodigestor por el volumen de carga diaria, en consecuencia se expresa el valor en días.²

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

La producción ganadera genera productos deseados, subproductos y efluentes. Los efluentes se denominan emisiones cuando son gaseosos; vertidos, si son líquidos y residuos sólidos a los restantes. La función receptora del entorno produce a través de los denominados vectores ambientales: aire, agua y suelo para evitar su pérdida son utilizados para alimentar al biodigestor, dejándolos un período de semanas o meses, a lo largo de los cuales, en condiciones ambientales y químicas favorables, el proceso bioquímico y la acción bacteriana se desarrollan simultánea y gradualmente, descomponiendo la materia orgánica hasta producir grandes burbujas que fuerzan su salida a la superficie donde se acumula el gas.^{2,7}

La localización del biodigestor en la granja porcícola de Jilotepec está próxima al vertedero de desechos, y cerca de los puntos de consumo del gas (Imagen 1). Se

ubica protegido de los vientos dominantes, con una separación de 10 a 15mts de los pozos de agua, y cerca a los puntos de consumo del efluente y de las aguas sobrenadantes. Ya que comúnmente el lavado de las instalaciones para el alojamiento de animales se realiza diariamente, de allí la conveniencia de que el desagüe de los pisos permita la conexión directa con el biodigestor y que dicho desagüe posea un interruptor manual, para desviar y evitar la entrada en exceso del agua de lavado mezclada con las excretas al biodigestor.^{4, 6}



Figura 7 Fotografía panorámica de la granja porcícola de Jilotepec

Se observa en primer plano el área de compostaje, en segundo plano los dormitorios de alumnos y los silos y al fondo las naves para los cerdos. Fotografía de Paulina Aspeitia

Con el fin de utilizarse como aislante térmico y protección para los materiales constituyentes del biodigestor, se excava una fosa sobre suelo firme y en forma tal que sus paredes de tierra no se derrumben y no queden con piedras cortantes o raíces salientes.⁴

En áreas con topografía quebrada, la fosa para alojar el biodigestor debe ser excavada a través de la pendiente (Imagen 2), para poder lograr que el piso del fondo de la fosa quede sin desnivel y permitir así el llenado y auto vaciado diarios por gravedad. ⁴



Figura 8 Lugar de colocación del biodigestor. Zona con condiciones topográficas adecuadas alejada del resto de la granja y próxima al área de desechos y a donde se utilizara el biogás.

Fotografía de Paulina Aspeitia

Son condicionantes del diseño, la inversión a realizar, la energía que se desea obtener, la biomasa disponible, el tamaño del digestor, profundidad, la simplicidad en el manejo, el uso del efluente, y la temperatura media del lugar. Según las condicionantes mencionadas. Donde la carga diaria de estiércol determinará la cantidad de biogás producido por día. Se puede esperar una producción diaria de biogás equivalente al 35% del volumen de la fase líquida. La carga de estiércol diaria, junto con el tiempo de retención (determinado por la temperatura) determinarán el volumen del biodigestor. ^{4, 6}

El biogas se desplaza fuera de la campana únicamente por efecto de la presión atmosférica, por lo que se requiere de una tubería amplia para disminuir el roce y favorecer su rápido y fácil desplazamiento hacia el quemador.⁴

Después de 30 días de haberse iniciado la alimentación diaria del biodigestor, el biogas ya se ha desplazado, atrapado inicialmente dentro de la campana (Figura7). Esto permite que al abrir la llave de paso hacia el extremo del niple de la tubería galvanizada el biogas pueda ser utilizado igualmente como combustible en quemadores para la calefacción de pollitos, cerdos y otros animales recién nacidos, para la iluminación mediante o lámparas incandescentes, que no requieren del gas a presión.⁴

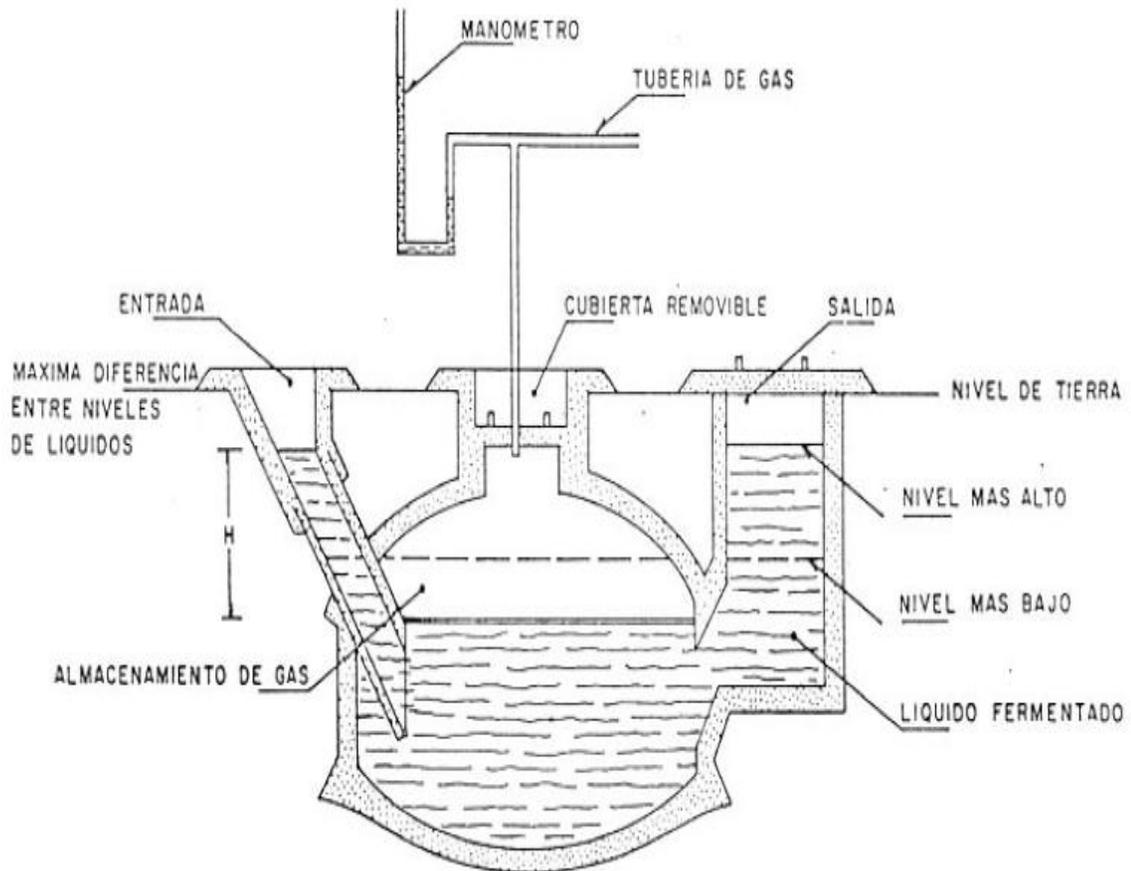


Figura 9 Esquema de un biodigestor y sus partes. Fuente Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas Manual para su instalación operación y utilización, Botero 1987

INTRODUCCIÓN AL USO DE ESTIERCOL EN GRANJAS PORCINAS

CARACTERÍSTICAS DE LAS EXCRETAS PORCINAS

Dentro de las excretas porcinas la orina representa aproximadamente el 45% de la porquinaza, y las heces, el 55%. El pH varía entre 6.0 y 8.0. Mientras más frescas sean las porquinazas, más neutro será su pH. La alcalinidad y conductividad son propiedades más del agua de lavado y de bebida, que propiamente de la porquinaza (Cuadro 2). La composición nutricional es afectada principalmente por estas variables: variaciones en la formulación de las dietas utilizadas, el método de procesamiento y manejo de la porquinaza, la etapa productiva, el ambiente y el manejo de los cerdos (Cuadro 3).⁸

ETAPA PRODUCTIVA	Humedad	Proteína Cruda	Extracto Etéreo	Cenizas	FND	FAD	CNE	Calcio	Fósforo	Cobre
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mg/Kg.
Inicio	80,51	26,92	7,1	14,28	28,42	7,96	23,26	2,51	0,19	1160,5
Desarrollo	78,67	26,27	9,83	15,97	30,89	9,81	17,02	3,36	0,21	445,04
Engorde	78,55	23,38	6,47d	16,44	37,04	11,35	18,24	2,96	0,22	427,64
Gestante	80,73	16,49	3,85	20,34	40,2	15,54	19,11	3,93	0,29	725,3
Lactante	72,52	15,8	8,64	20,08	30,65	11,79	16,22	5,01	0,27	920,6

TIPO DE PORQUINAZA	Humedad	Proteína Cruda	Extracto Etéreo	Cenizas	FND	FAD	CNE	Calcio	Fósforo	Cobre
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mg/Kg.
Compuesta	72,1	18,75	10,9	19,29	32,77	12,69	18,24	4,45	0,25	741,71
Separador	78,82	14,69	4,42	9,25	68,65	29,93	4,66	-	-	-

Cuadro 2 Composición de excretas porcinas. Comparación del contenido nutrimental de las excretas porcinas según la etapa productiva. Fuente Revista Lasallista de investigación Vol.1 No.1

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

Cuadro 3 Producción de material fecal y orina como proporción al peso vivo. Tabla comparativa del promedio en kg de producción de heces y orina en las diferentes etapas productivas

Fuente Revista Lasallista de investigación Vol.1 No.1

Pero al igual que nutrientes las excretas frescas también contienen patógenos de relevancia para el humano y otras especies. Las siguientes bacterias son de especial importancia como riesgo bacterial en el estiércol de cerdo: Salmonella, Mycobacterium, Brucella, Escherichia coli, Leptospira, Yersinia y Campilobacter. Estas bacterias no siempre están presentes, siendo más prevalentes en los cerdos infectados.⁸

EL USO DE LAS EXCRETAS DE CERDO PARA UN BIODIGESTOR

Bajo la presión de producir alimentos en sistemas que mantengan estables su producción y rentabilidad a largo plazo, sin generar inequidad social y preservando todos los recursos naturales, se ha considerado la digestión anaerobia de purines de cerdo como una buena opción para la valorización económica de estos residuos. Una clara opción para mejorar la producción de metano, y por tanto la viabilidad económica de las plantas de digestión anaerobia y como un insumo importante a ingresar en sistemas de producción. Conduciendo a establecer modelos para eficientar su uso como ingrediente alimenticio en la dieta de otras especies, ya que ofrecen un gran potencial para generar recursos adicionales al productor.^{5, 8, 9}

Así mismo, su reincorporación como un ingrediente importante en la calidad suelo-planta, representa una alternativa importante dentro de un programa pecuario, constituyéndose entonces en una propuesta tecnológica viable desde el punto de vista ecológico, biológico y económico, según diferentes factores, tales como la edad, el ambiente y la naturaleza de la dieta del cerdo entre otros. El tener en cuenta estos factores es importante, ya que las excretas y orina en cerdos puede devenir un problema insoluble en el deterioro del medio ya que pueden contener aparte de nutrimentos que los cultivos pueden utilizar, altas concentraciones de coliformes fecales que producen enfermedades infecciosas. Por ello, para utilizarlas como fertilizantes, es necesario darles un tratamiento que elimine estos agentes infecciosos. Una forma de hacerlo es mediante la biodigestión. Al usar un biodigestor se utilizan los nutrimentos contenidos en las excretas y, además, se reduce la contaminación ambiental, ya que convierte las excretas que contienen microorganismos patógenos como bacterias, protozoos, larvas, huevos, pupas de insectos, etc., en residuos útiles y sin riesgo de transmisión de enfermedades.^{7, 8, 9}

USO DE LOS PRODUCTOS FINALES DE LA BIODIGESTIÓN DE EXCRETAS DE CERDO

Además de generar gas combustible, la fermentación anaerobia de la materia orgánica produce un residuo orgánico de excelentes propiedades fertilizantes, evitando en esta forma la competencia que se podría presentar con el aprovechamiento tradicional de los residuos animales y agrícolas con fines fertilizantes o como combustibles. La composición del bioabono en promedio tiene 8.5% de materia orgánica, 2.6% de nitrógeno, 1.5% de fósforo, 1.0% de potasio y un pH de 7.5 en promedio.⁷

El bioabono sólido o líquido no posee mal olor, a diferencia del estiércol fresco, tampoco atrae moscas y puede aplicarse directamente al campo en forma líquida, en las cantidades recomendadas; o bien, el bioabono sólido puede deshidratarse y almacenarse para usarlo posteriormente en el entendido de que al deshidratarse puede haber pérdidas por volatilización hasta 60%, sobre todo de nitrógeno.⁷

El bioabono no deja residuos tóxicos en el suelo, eleva la calidad del mismo y puede considerarse como un buen fertilizante que puede competir o complementarse con los fertilizantes químicos.⁷

Con el objeto de dar utilidad a la excreta líquida de cerdo, en la producción de biofertilizante y tratar de eliminar a los patógenos (coliformes principalmente) que la excreta contiene, se evaluó el proceso de biodigestión anaerobia.⁷

REVISIÓN SISTEMÁTICA

En este trabajo se presenta el diseño de un biodigestor de una etapa semicontinuo con agitación parcial cuya materia orgánica consiste en estiércol fresco de cerdo, donde según la cantidad de dicha materia diaria disponible y el cálculo de la producción deseada de biogás se lo dimensiona. Se establece un punto de trabajo del mismo y se hace un análisis de costos tanto de la inversión necesaria como una proyección de su eficiencia.¹⁰

Fueron condicionantes del diseño, la inversión a realizar, la energía que se desea obtener, la biomasa disponible, el tamaño del digestor, profundidad, el uso del efluente, la temperatura media del lugar donde se instalará.⁶

Primeramente se dio un recorrido por las instalaciones de la granja porcícola de Jilotepec ubicando el área del biodigestor próximo al vertedero de desechos, y cerca de los puntos de consumo del gas en la periferia de la granja. Se ubicaría protegido de los vientos dominantes, enterrado, con una separación de 10 a 15mts de los pozos de agua, y cerca de los puntos de consumo del efluente aproximadamente a 18m. de la poza de desechos y a 5m en perpendicular de donde actualmente se encuentra el tanque de gas que proporciona combustible a los baños de estudiantes y las lechoneras.

Se busca producir 500L. de biogás al mes para reemplazar el tanque que surte las áreas antes mencionadas, por lo cual se hicieron los siguientes cálculos para dimensionar el biodigestor, su capacidad de carga y el tiempo entre la carga y el vaciado del efluente.

El volumen del digestor se calcula en función de:

$$V = \frac{(CR(1+D))}{Y_d} tF$$

Donde C es la capacidad deseada de la planta de gas la cual equivale a 500L.²

R es la relación estiércol húmedo/estiércol seco la cual se propone de 88:12.^{1,2, 8}

D es el peso de agua añadida a cada unidad de peso de estiércol siendo de 1.²

t_F es el tiempo de fermentación el cual es de 35 días tomando en cuenta la temperatura aproximada de 35 a 40°C.²

“Y” es el gas producido por unidad de peso de estiércol seco(m³/kg), tomando en cuenta una relación 67:1 entre el volumen del gas y volumen del sustrato .^{1,2}

d es la densidad de la mezcla estiércol-agua considerada de 1000.0 kg/m.^{2,8}

$$V = ((500 \times 88/12) \times (1+1)) / (67 \times 1000)) 35$$

$$V = ((500 \times 7.3) \times 2) / 67000) 35$$

$$V = (3666 \times 2) / 67000) 35$$

$$V = (7333.3 / 67000) 35$$

$$V = 3.8 \text{m}^3$$

De acuerdo a lo anterior se define que el biodigestor sería de una forma cilíndrica que ocupe el influente y la cúpula donde se almacene el biogás así como las cámaras de carga y de descarga, el cual deberá tener las medidas correspondientes a los cálculos siguientes:

Teniendo que para obtener las medidas de la parte cilíndrica se debe calcular en base a la fórmula de volumen y conociendo previamente que este volumen total será de 3.8m³ y considerando una altura de 1.50m. la fórmula quedaría de la siguiente manera:¹³

$$V = (\pi)(R^2)(h)$$

$$3.8 = (\pi)(R^2)(1.50)$$

Despejando donde R es igual al radio y D es el diámetro, para conocer las medidas exactas quedaría:

$$R^2 = 3.8 / (3.1416 \times 1.50)$$

$$R^2 = 0.8 \text{m}$$

$$R = \sqrt{0.8}$$

$$R = 0.9 \text{m}$$

D=1.80 m

Resultando la parte cilíndrica (Figura 8) con una altura de 1.50m. y la base de 1.80m. de diámetro.

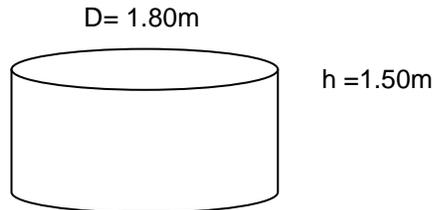


Figura 8 Medidas del cilindro. Diseño Paulina Aspeitia

Hay que recordar que hasta ahora se ha hablado en litros para los volúmenes de estiércol, y que a partir de aquí los volúmenes se trabajan en metros cúbicos, o sea 1000 litros equivalen a un metro cúbico hablando del biogás. Por lo tanto según esta referencia el volumen que debe contener la cúpula deberá ser de $.5m^3$.

El volumen del gasómetro, indica el valor máximo de almacenamiento de biogás que puede contener el reservorio lo cual hace referencia a la parte de la cúpula. La velocidad de carga volumétrica (Con este término se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor) se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$L=C/(Y*V)$$

$$L=500 / (67*3.8)$$

$$L=500 / 264.6$$

$$L= 1.96m^3$$

Y para obtener el resultado en kg de estiércol tomamos en cuenta la anterior referencia de "Y" que es el gas producido por unidad de peso de estiércol seco(m^3/kg), tomando en cuenta una relación 67:1 entre el volumen del gas y volumen del sustrato siendo que $1m^3$ equivale a 1000L. ^{1,2}

$$L= (1.96 (1000)) / 1$$

L=1960L.

Litros de estiércol= $(1960)(67) / 1000$

Estiércol= 113kg.

Para la parte de la cúpula se calcula en base a los $.5m^3$ resultantes de la biodigestión total pasados los 35 días. Tomando las anteriores mediciones de la base del cilindro.

$$V = (2/3\pi) (R^3)$$

$$0.5 = (2/3\pi) (R^3)$$

$$0.5 = (4.7) (R^3)$$

$$R^3 = 0.5 / 4.7$$

$$R = 0.47$$

Resultando así una cúpula con un diámetro de 0.94m y una altura máxima de 0.47m. (Figura 10).

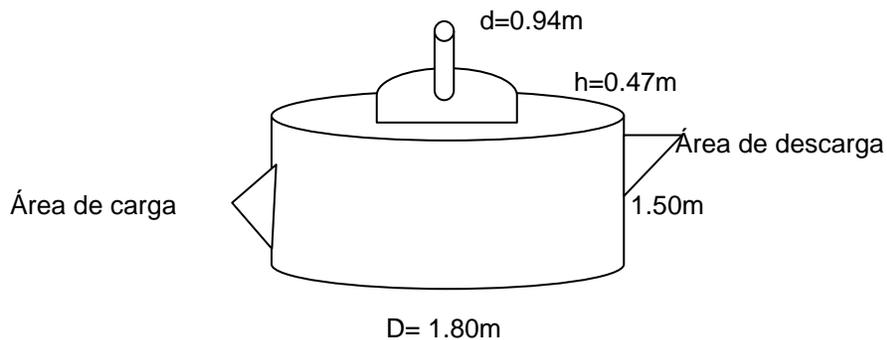


Figura 10 Medidas del cilindro. Diseño Paulina Aspeitia

De esta manera podemos definir que el biodigestor será cargado con 113 kg de estiércol fresco diario durante 35 días produciendo al día 35 la primera carga de 500L. de biogás en total y el primer efluente. Teniendo en cuenta siempre que el estiércol debe mantener a humedad adecuada, de lo contrario debe agregarse una unidad de liquido proporcional a los kilogramos de estiércol.(Figura11)

El costo de la inversión se definirá en relación a la cantidad de material a ocupar y los metros de tubería a considerar para el desplazamiento del biogás, el gasómetro y la mano de obra.

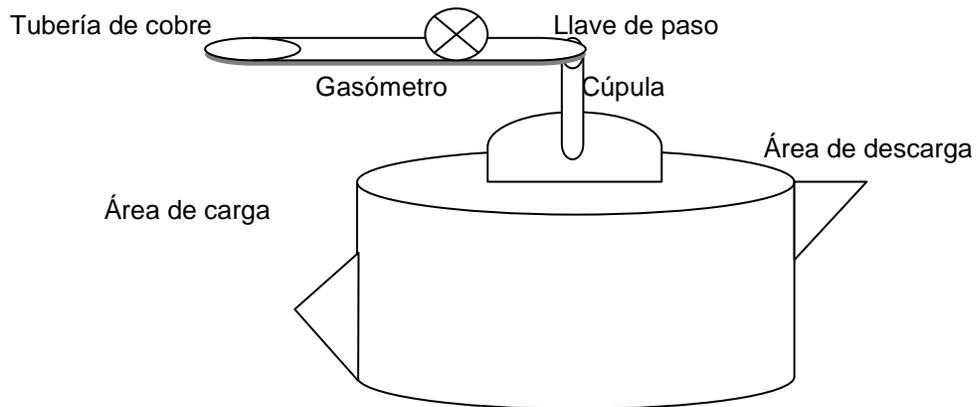


Figura 11 Prototipo de Biodigestor de tanque de fibrocemento. Diseño de Paulina Aspeitia

Se comprara para su construcción:

Un tanque de fibrocemento con áreas de carga y descarga con un costo de únicamente por concepto del material \$1000.00

5m. De tubería de cobre de 30mm. Con arqueta y llave de paso por un monto de \$600.00 para la transportación del biogás de la campana a el tanque.

Un gasómetro de baterías industrial de \$1800.00 para monitorear la presión dentro del biodigestor.

Cúpula de acero inoxidable de \$400.00 y accesorios para instalación con un costo de \$300.00.

Además de la mano de obra que implica un gasto de \$2000.00 por la construcción del tanque, acoplamiento de la tubería y colocación de la campana.

Haciendo un total de 6100\$ como inversión en el biodigestor.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los biodigestores son una fuente alternativa ecológica de producción de gas útil tanto en la ganadería como en el hogar y la industria siendo su producción muy simple ya que solo se requiere de la obtención de los parámetros ambientales y técnicos precisos y los cálculos correspondientes ya que el proceso de obtención es casi autónomo y constante. En cuanto a su implementación la inversión inicial dependerá del tipo y tamaño de biodigestor seleccionado (Imagen 12). E igualmente según la selección del proceso de biodigestión en cuanto a tiempo de carga y retención.



Figura 12 Fosa de recolección de residuos.. Fotografía de Paulina Aspeitia

Tomando en cuenta el sistema seleccionado y la capacidad del biodigestor para la granja porcícola de Jilotepec exclusivamente se calcula que el ahorro de gas será casi inmediato produciendo la cantidad de biogás deseado a partir de los 35 días

de la carga inicial donde las bacterias se han estabilizado y la producción será constante, teniendo variaciones en los meses donde desciende la temperatura promedio, por lo cual se vislumbra una compra de reserva de gas. Logrando así un ahorro sustancioso en la compra de gas, así como en la disposición de desechos y se podrá obtener un ingreso aparte de la venta del efluente a un precio de \$10.00 por kg. (Figura 13 y 14)

Esto se observa a detalle en el siguiente grafico en el cual se observa la diferencia entre el uso del biodigestor y continuar con la compra de gas, donde se tomo en cuenta el costo de \$10.00 promedio del gas en el estado de México:

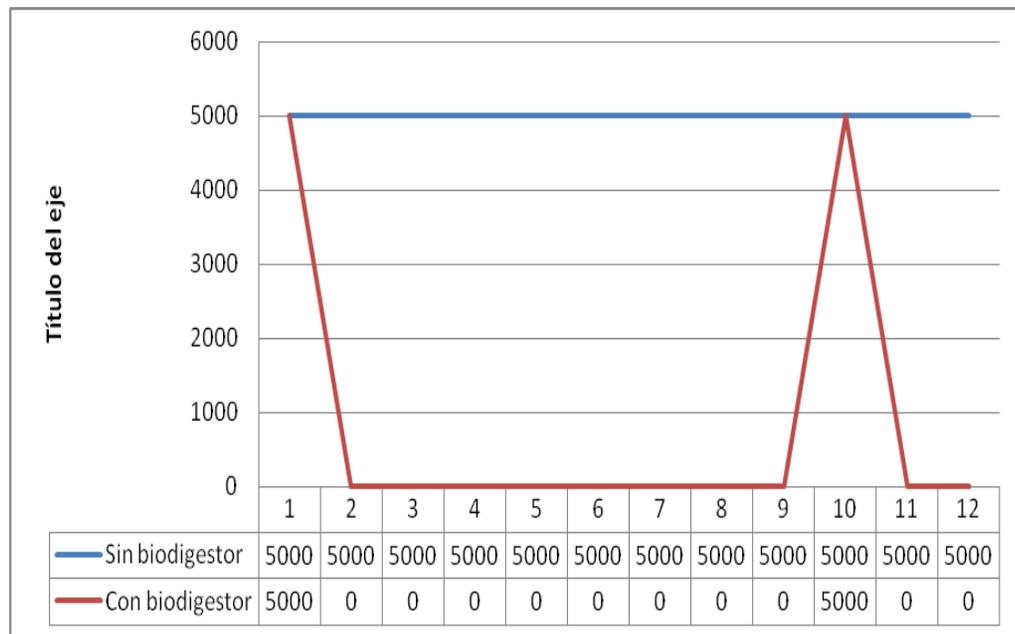


Figura 13 Análisis comparativo de los costos del gas con y sin biodigestor.

Al finalizar cada año se haría la descarga total del biodigestor conservando el volumen de carga inicial en condiciones anaerobias lo cual facilitara el proceso de arranque nuevamente.

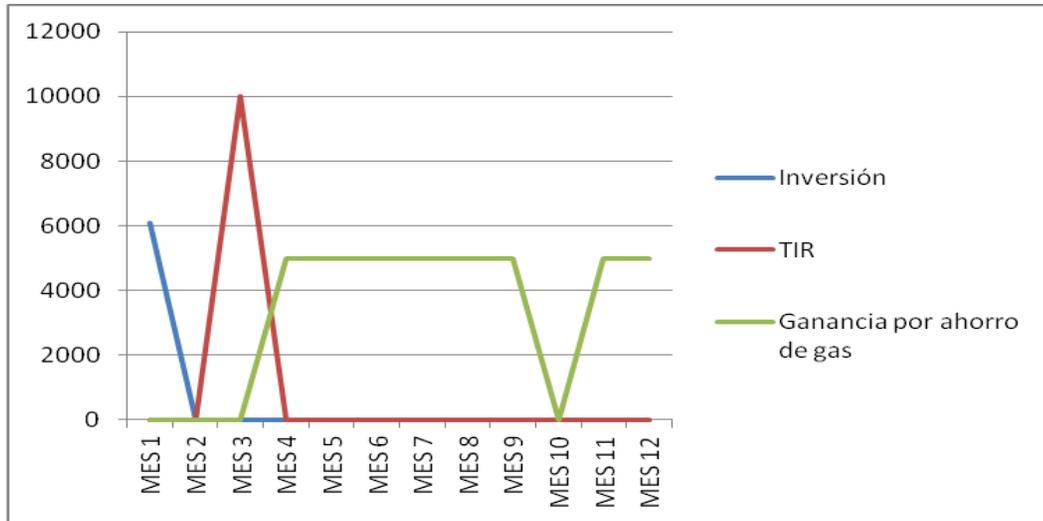


Figura 14 Visualización de la Tasa interna de retorno siendo del 100% en el mes 3 de acuerdo al ahorro del gas que es de \$5000 mensuales, donde la inversión inicial es de \$6100.

SIN BIODIGESTOR					CON BIODIGESTOR				
SERVICIOS	P. Venta	Costo	No.	ingreso	SERVICIOS	P. Venta	Costo	No.	ingreso
Ahorro de gas	0	0	0	0	Ahorro de gas	5,000	0	10	50,000
Fertilizante	0	0	0	0	Fertilizante	10	0	1,582	15,820
INGRESO TOTAL=				0	INGRESO TOTAL=				65,820
EGRESO TOTAL=	0				EGRESO TOTAL=	0			
Egresos por Servicios	0				Egresos por Servicios	0			
inversión				0	inversión				6100
Gasto de gas				60000	Gasto de gas				10000
Depreciación				0	Depreciación				244
TOTAL EGRESOS =				60000	TOTAL EGRESOS =				16344
UTILIDAD NETA =				-60,000	UTILIDAD NETA =				49,476

Cuadro 4 Comparación de gastos de un año con y sin uso del biodigestor.

Con lo anterior podemos completar el análisis económico de la implementación del biodigestor obteniendo el valor presente y el valor actual neto así como la tasa interna de retorno de la inversión la cual se calcula al 8% de interés y la relación beneficio costo acorde a los ingresos y egresos correspondientes a un periodo de seis años tomando en cuenta que el primer año es de instalación con una inversión de \$6100 por lo cual es considerado como año cero para el caso particular del modelo de biodigestor que se pretende colocar en la granja porcícola de Jilotepec.

El análisis hace referencia primeramente a los ingresos derivados del biodigestor los cuales corresponden a la venta del fertilizante obtenido de las descargas del biodigestor consideradas como el 40% del influente y el ahorro de gas.

Posteriormente se calcula el valor presente por cada año de dichos ingresos.

La siguiente parte corresponde a los egresos anuales siendo en el año cualificado como cero la inversión realizada más la depreciación correspondiente calculada a 25 años. Y los años consecutivos sería únicamente la depreciación.

Después de la misma manera que con los ingresos se calcula el valor presente anual de los egresos por el periodo descrito con un factor del 8% de inversión. (Cuadro 5).

Con los datos anteriores se obtiene la tasa interna de retorno con un valor actual neto mostrando que el primer año se obtiene el retorno total de la inversión y la relación beneficio costo la cual es de 270 unidades por cada unidad gastada.

SERVICIOS	AÑOS >		0		1		2		3		4		5	
	P. Venta	Costo	No.	ingreso	costo	No.	ingreso	costo	No.	ingreso	costo	No.	ingreso	costo
Ahorro de gas	5,000	0	10	50,000	0	10	50,000	0	10	50,000	0	10	50,000	0
Fertilizante	10	0	1,582	15,820	0	1,582	15,820	0	1,582	15,820	0	1,582	15,820	0
INGRESO TOTAL=				65,820			65,820			65,820			65,820	
EGRESO TOTAL=		0		0			0			0			0	
VP=		60,944		56,430			52,250			48,380			44,796	
VAN INGRESOS=	304,278													
Egresos por Servicios		0		0			0			0			0	
inversión		6100		0			0			0			0	
Gasto d gas		10000		10000			10000			10000			10000	
Depreciación		244		244			244			244			244	
TOTAL EGRESOS =		16344		10244			10244			10244			10244	
VP=		226		209			194			179			166	
VAN EGRESOS=	1,128													
UTILIDAD NETA =		49,476		55,576			55,576			55,576			55,576	
VP=		6,100		186,223			172,428			159,656			147,830	
VAN TOTAL AL 8%=	\$201,120.42													
TIR=	549%													
RELACION B/C=	270													

Cuadro 5 Análisis económico completo

Según lo anterior se puede concluir basado en los objetivos que para la instalación previa de un biodigestor el cual se busca sea tanto eficiente como rentable debemos definir en un inicio el por qué y para que se usara el biodigestor, la cantidad y composición de estiércol y espacio que se tiene disponible, el uso del efluente final y principalmente la inversión que se tiene para instalarlo y mantenerlo funcionando. De acuerdo a esto se realiza el correspondiente y muy específico análisis de costos y se define para cada caso en particular el dimensionamiento apropiado que cumplirá con las necesidades de la producción.

Y basado en los objetivos planteados sobre el uso de energías limpias en este caso un biodigestor para la granja porcícola de Jilotepec se muestra que es completamente rentable ya que su TIR es del 100% durante el primer año y siendo más exactos en los tres a cuatro primeros meses posteriores a la inversión al ahorrar los \$5000 pesos mensuales que se obtienen por la compra de gas. Y cuenta con una alta relación beneficio costo lo cual indica un beneficio económico directo relacionado con la venta del abono, además del uso del biogás que no es directamente considerado como un ingreso de manera administrativa pero si es un beneficio cuantitativo ya que significa un ahorro casi del 100% del gas considerado en la producción.

REFERENCIAS

1. NUÑEZ F, URRUTIA F, GONZÁLEZ Z, URCELAY S. Determinación química en excretas de cerdo sometidas a biodigestión anaeròbica en laboratorio. Avances ciencias Veterinarias Vol.2 No.1:42-46, 1987
2. DECARA L, SANDOVA G, FUNES C. El uso de biodigestores en sistemas caprinos de la providencia de Córdoba. Universidad nacional de Río Cuarto Córdoba Facultad de Agronomía y Veterinaria. 2004
3. HILBERT J. Manual para la producción de biogas. Instituto e Ingeniería Rural INTA Castelar.
4. BOTERO R, PRESTON T. Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas “Manual para su instalación, operación y utilización”. 1987
5. CAMPOS POZUELO E. Optimización de la digestión anaeróbica de purines de cerdo mediante co digestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria. Universitat de Lleida Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl Laboratori d’Enginyeria Ambiental. 2001
6. FILIPPIN C, FOLLARI J, VIRGIL J. Diseño de un biodigestor para obtener gas metano y fertilizante a partir de la fermentación de excrementos de vacas lecheras en la facultad de agronomía de la universidad Nacional de Pampa. Universidad Nacional de San Luis Argentina Laboratorio e Energía Solar
7. FREGOSO, M de J, FERRERA-CERRATO, ETCHEVERS J, ALCANTAR G, TRINIDAD J, BORGES L, PEREYDA G. Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de cerdo. Terra 19:353-362, 2001
8. CASTRILLÓN O, JIMÉNEZ R, BEDOYA O. Porquinaza en la alimentación animal. Revista Lasallista de Investigación Vol. 1 No. 1

9. MARTINEZ V, GARCIA MD. Estimados de excreción fecal de cerdos como material de ingreso en biodigestores para composta. Revista Computarizada de Producción porcina Vol. 11 No. 2 2004
10. DELUIGI M, FOLARI J. Un biodigestor de boñigas de cabra calefaccionado con colectores planos. Laboratorio de Energía Solar.
11. SAGARPA Y CAMBIO CLIMÁTICO, Tecnologías de mitigación
12. <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/cambioclimatico>
13. <http://www.textoscientificos.com/energia/biogas/factores>
14. <http://ticmatec.blogspot.com>