

106  
2eje



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

MANEJO DE EXCRETAS EN GRANJAS PORCINAS:  
ESTUDIO RECAPITULATIVO.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MEDICO VETERINARIO ZOOTECNISTA

P R E S E N T A :

MIGUEL LICEAGA MARTINEZ



ASESORES: ROBERTO MARTINEZ GAMBA  
MARIO ENRIQUE HARO TIRADO

MEXICO, D. F.

1994

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

ESTE TRABAJO LO DEDICO A MIS  
PADRES, POR DARME LA OPORTUNIDAD  
DE REALIZAR MI ANHELO DE SER  
VETERINARIO, POR EL APOYO, LA  
CONFIANZA Y SOBRE TODO POR EL GRAN  
AMOR QUE ME HAN BRINDADO. A MI  
HERMANA POR SU CARINO Y COMPRESION.

GRACIAS.

A LALO (+) POR HABER SIDO UN EJEMPLO COMO AMIGO Y COMPANERO

A TERE POR SU CARINO Y APOYO

A JESUS C. Y MIGUEL R. QUE SIEMPRE ME HAN AYUDADO  
INCONDICIONALMENTE

A TODOS MIS AMIGOS Y COMPANEROS QUE HAN HECHO MI VIDA MAS  
AGRADABLE Y FELIZ

A MIS ASESORES POR LOS CONSEJOS Y LA AYUDA QUE SIEMPRE ME  
BRINDAN

A LOS INTEGRANTES DE MI JURADO POR SUS COMENTARIOS Y  
SUGERENCIAS

A TODOS MIS FAMILIARES QUE SIEMPRE ME HAN APOYADO Y ALENTADO  
PARA SEGUIR ADELANTE

DE FORMA ESPECIAL, AGRADEZCO A LAS SIGUIENTES INSTITUCIONES Y  
AL PERSONAL QUE LABORA EN ELLAS, POR SU ATENCION Y COOPERACION  
PARA CONMIGO Y EN CONSECUENCIA, PARA LA REALIZACION DE ESTE  
TRABAJO.

BIBLIOTECA DEL CENTRO DE INFORMACION CIENTIFICA Y HUMANISTICA  
(CICH)

BIBLIOTECA DEL DEPARTAMENTO DE BIOTECNOLOGIA Y BIOINGENIERIA  
DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N.

BIBLIOTECA CENTRAL (U.N.A.M.)

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIONES BIOMEDICAS

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE GEOFISICA

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE GEOGRAFIA

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE GEOLOGIA

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE INGENIERIA

BIBLIOTECA DE LA UNIVESRIDAD AUTONOMA DE CHAPINGO

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE BIOLOGIA

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMOSFERA

CENTRO DE INFORMACION DE SEDUE (ACTUALMENTE SEDESOL)

COMISION NACIONAL DEL AGUA

HEMEROTECA NACIONAL

BIBLIOTECA DE LA S.A.R.H. (SAN JERONIMO)

BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

DEPARTAMENTO DE PRODUCCION ANIMAL: CERDOS DE LA F.M.V.Z.

Y A TODAS AQUELLAS PERSONAS QUE DIRECTA O INDIRECTAMENTE  
COLABORARON PARA LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

## CONTENIDO

	<u>Página</u>
RESUMEN.....	1
INTRODUCCION.....	3
CAPITULO 1 IMPLICACIONES AMBIENTALES Y DE SALUD.....	7
1.1 - Impacto ambiental de las granjas porcinas.....	7
1.2 - Características físicas, químicas y biológicas de las excretas.....	9
1.3 - Indicadores de olores ofensivos.....	11
1.4 - Producción de gases tóxicos.....	15
1.5 - Enfermedades transmisibles a humanos y animales.....	17
1.6 - Problemas en algunas zonas productoras del país y sus posibles alternativas.....	18
CAPITULO 2 DIGESTION ANAEROBICA.....	24
2.1 - Procesos microbiológicos y bioquímicos fundamento del tratamiento anaeróbico.....	26
2.2 - Fases secuenciales en la digestión anaeróbica.	28
2.3 - Efecto de diferentes concentraciones de sólidos.....	31
2.4 - Efecto de cambios de temperatura.....	35
2.5 - Efecto de aditivos .....	39
2.6 - Comportamiento de los ácidos grasos volátiles.	40
2.7 - Subproductos de la digestión anaeróbica y usos.	45

2.8 - Biotratamiento con microalgas.....	46
CAPITULO 3 PRODUCCION DE BIOGAS.....	50
3.1 - Qué es el biogas.....	51
3.2 - Cómo se produce el biogas.....	52
3.3 - Características y tipos de plantas de biogas..	54
3.4 - Efecto de la temperatura y concentración en la producción de biogas.....	57
3.5 - Efecto de desinfectantes y antibióticos.....	58
3.6 - Cómo se puede optimizar la producción de biogas.....	61
3.7 - Diseño de plantas de biogas.....	62
3.8 - Utilización de biogas y bioabono.....	67
CAPITULO 4 TRATAMIENTO AEROBICO.....	71
4.1 - Fundamento del tratamiento aeróbico.....	71
4.2 - Aspectos microbiológicos del tratamiento termofílico.....	73
4.3 - Aspectos físico-químicos.....	73
4.4 - Biodegradación de materia orgánica.....	74
4.5 - Degradación microbiológica de sustancias mal olientes.....	76
CAPITULO 5 OTRAS ALTERNATIVAS PARA EL USO DE EXCRETAS PORCINAS.....	78
5.1 - Alimentación de borregos.....	85
5.2 - Alimentación de cerdos.....	86
5.3 - Alimentación de bovinos.....	87
5.4 - Crianza artificial de ranas.....	88

5.5 - Utilización como abono.....	93
ANALISIS DE LA INFORMACION.....	95
LITERATURA CITADA.....	97
CUADROS.....	106
FIGURAS.....	122
ANEXO.....	137

**RESUMEN**

LICEAGA MARTINEZ MIGUEL. MANEJO DE EXCRETAS EN GRANJAS PORCINAS: ESTUDIO RECAPITULATIVO (bajo la dirección de: MVZ. Roberto Martínez Gamba y el MVZ. Mario Enrique Haro Tirado).

En los últimos años ha existido una preocupación que va en aumento por los problemas que se generan de las excretas porcinas, tanto por sus características físicas, químicas y biológicas, así como por las cantidades producidas. Esta preocupación se acentúa por el hecho de que en nuestro país existe muy poca información sobre el tema y la que existe, es de difícil acceso ya que ésta proviene de Estados Unidos y la mayor parte en inglés. Por esto, en el presente trabajo se realizó una recopilación, análisis y síntesis de los trabajos relacionados con el tema existentes en libros, reportes científicos, revistas, memorias de congresos, conferencias y convenciones, tesis etc. tanto del país como del extranjero, y así poder brindar la información con bases científicas y de forma accesible a las personas interesadas. La información recopilada se estructura de la siguiente forma:

Capítulo 1 Implicaciones ambientales y de salud

Capítulo 2 Digestión anaeróbica

Capítulo 3 Producción de biogas

Capítulo 4 Tratamiento aeróbico

Capítulo 5 Otras alternativas para el uso de las excretas porcinas.

Se analizan los fundamentos de los tratamientos, así como las condiciones necesarias para su arranque y funcionamiento.

### INTRODUCCION

La degradación ecológica y la contaminación ambiental se genera por causas naturales y descuido o falta de atención al obtener, utilizar, transformar o consumir los recursos que nos brinda el medio en que habitamos, y con el simple uso y los procesos de producción se deterioran, merman o agotan esos recursos que el ser humano, en su existencia y quehacer, va requiriendo en mayor cantidad conforme a su desenvolvimiento económico, social y cultural. Las comunidades "evolucionan" y crecen, exploran y explotan los suelos, el subsuelo, las aguas terrestres y marinas, la flora y la fauna, para allegarse materiales, alimentos, vestido, vivienda, transporte y servicios, que les dan bienestar y facilidad para desarrollarse y preservarse; sin embargo, las múltiples actividades de transformación de materias en sus fases de producción al consumo, por circunstancias de desconocimiento, negligencia, mala fé o imponderables, dan lugar a desperdicio, errores, accidentes, omisiones que repercuten en alteraciones o modificaciones nocivas a los elementos naturales vulnerables a las acciones y reacciones de sustancias y componentes físicos, químicos y biológicos, lo que ha despertado preocupación creciente de los gobiernos nacionales, de agrupaciones científicas y de la población que tiene conciencia del valor e importancia del medio ambiente y la ecología para la vida humana y para su preservación. (57)

Con el crecimiento excesivo de la población en las últimas décadas, se han agudizado los problemas económicos y sociales de los países en desarrollo, debido a la pobreza, ignorancia,

e insalubridad.

Las descargas de aguas residuales, desechos municipales e industriales provenientes de las áreas urbanas y rurales, conteniendo plaguicidas, metales pesados, fenoles, y otras sustancias agresivas y nocivas, por falta de prevención y tratamiento contaminan alarmantemente los suelos, ríos, lagos y mares y en consecuencia se pueden contaminar los alimentos, el aire, el agua en forma cada vez más riesgosa para las condiciones ambientales y procesos ecológicos. (57) La forma en que se transportan los diversos tipos de contaminantes y su comportamiento en los distintos tipos de suelos y acuíferos dependen de diversas características y relaciones físicas, químicas y biológicas. Un contaminante principal del suelo y de aguas subterráneas son los microorganismos patógenos, los cuales pueden introducirse al subsuelo a través de: fosas sépticas, irrigación con aguas negras, rellenos sanitarios, disposición de lodos de desecho, etc.

Los microorganismos patógenos -bacterias, virus, protozoarios, y lombrices parásitas- constituyen uno de los problemas más serios de salud pública y animal en México, ya que 'los padecimientos gastrointestinales ocupan el primer lugar de las enfermedades endémicas y la principal fuente de estos microorganismos son las aguas residuales. (51,76)

Una de las fuentes de mayor contaminación en el sector agropecuario, es la porcicultura. A tal grado que actualmente, el problema de la contaminación ambiental condiciona, la posibilidad de la instalación de unidades pecuarias porcinas, por ejemplo: Las deyecciones porcinas tienen, en relación con

la contaminación de las aguas, una importancia comparable a las de origen urbano. (34)

Las necesidades de producción de carne ha conducido a la actividad porcícola a un cambio de sistema de producción de traspatio por intensivo, lo que ha originado muchos problemas de contaminación ambiental, debido a las grandes cantidades de estiércol generado, las cuales no son manejadas en México de una forma adecuada, afectando al medio ambiente (47). Como sucede en los países del norte de Europa (95).

El volumen de deyecciones producidas, su poder de contaminación y las posibilidades de recuperación de sus nutrientes hacen necesario adoptar medidas para proteger el ambiente y para obtener productos de posible reutilización (34).

El estiércol de cerdo, esta constituido de ingredientes alimenticios no absorbidos y no digeridos, de productos catabólicos del metabolismo, de secreciones, de células microbianas y de tejido que después de la excreción, continúan su degradación debido a la acción microbiana, produciéndose gases, olores y contaminación del suelo y agua (47). Entre los residuos animales, el del cerdo es uno de los "más contaminantes" por su alto contenido de material orgánico e inorgánico, además se ha visto que cerca del 50% de la microflora del estiércol y de las aguas residuales de granjas porcinas está constituido de especies potencialmente patógenas capaces de causar enfermedades como: colibacilosis, disenteria, "abscesos", enteritis aguda y crónica, tuberculosis, erisipelas de cerdo, etc. (45,62).

Afortunadamente el estiércol de cerdo a diferencia de residuos industriales como el plástico, puede ser incorporado a los ciclos biológicos naturales. Por otro lado, el estiércol de cerdo representa uno de los recursos menos aprovechados en México, que puede utilizarse como fuente de nitrógeno y minerales en la alimentación animal, lo que ayudaría en forma significativa a solucionar los problemas de contaminación ambiental, una vez establecidas las condiciones ideales para el reciclaje (47).

## CAPITULO 1

## IMPLICACIONES AMBIENTALES Y DE SALUD

## 1.1 Impacto ambiental de las granjas porcinas

Los desechos biodegradables no causaron problemas a las primeras civilizaciones debido a su posibilidad de transformación y reincorporación al medio, sin embargo, en la actualidad los desechos sólidos provocan alteraciones a los sistemas ecológicos. La disposición final, común en la gran mayoría de las ciudades y municipios del país, es la de depositar los desechos sólidos a cielo abierto, lo que ha originado que cientos de hectáreas de tierra fértil para la actividad agrícola se hayan perdido y se sigan perdiendo mientras se continúe con el uso de esta práctica inadecuada de desecho (2,58). Cabe señalar que dentro de los residuos pecuarios está el aporte del estiércol de las explotaciones porcinas, estiércol con características similares a las excretas humanas por lo que, su manejo, tratamiento y disposición final debe ser motivo de control especial (82). El estiércol de cerdo está constituido de ingredientes alimenticios no absorbidos y no digeridos, de productos catabólicos del metabolismo, de secreciones, células microbianas y tejidos (Day & Harmon, 1975), que después de la excreción, continúan su degradación debido a la acción microbiana, produciendo gases, olores y consecuentemente contaminación de suelo y agua. Entre los residuos animales, el del cerdo es de los más contaminantes por su alto contenido de material orgánico e inorgánico (94). Además de que cerca del 50% de la microflora del estiércol y

de las aguas residuales de granjas porcinas está constituida de especies patógenas capaces de causar colibacilosis, disenteria, "abscesos", enteritis aguda y crónica, tuberculosis, erisipela de cerdo, etc (47). Cuando la descarga se efectúa libremente en un cuerpo receptor, ya sea río, lago o el mar puede producir abatimiento en el contenido normal de oxígeno disuelto debido a la gran cantidad de materia orgánica que contiene esa agua de desecho, la cual tiende a oxidarse hasta bióxido de carbono y metano. Si el abatimiento en la concentración de oxígeno disuelto es alta puede llegar a causar la muerte de cierto tipo de vida acuática (75).

Las aguas usadas que se descargan sin tratar en los ríos, lagos y embalses son uno de los vehículos más activos de la degradación ambiental. En un principio, suelen corromper las corrientes y cuerpos de agua receptores, llegando incluso a invalidarlos para usos posteriores, como son la producción agrícola e industrial; enseguida, agotan la flora y la fauna acuática al envenenar los cauces y los suelos aledaños, provocan la destrucción de la vegetación, los cultivos y la fauna terrestre e inficionan la atmósfera; finalmente los detritus y gérmenes patógenos que arrastran, pueden provocar epidemias o padecimientos endémicos graves en las poblaciones ribereñas. Se estima que más del 70% de éstos males se originan por el agua contaminada (15). Los cerdos producen desechos con un 92% de agua y altamente corrosivos, lo que hace antieconómico transportarlos para ser usados como fertilizantes(83).

Adicionalmente, el aumento de excretas almacenadas o

vertidas a las tierras de cultivo envían efluvios de amoníaco a la atmósfera, contribuyendo en gran medida a la lluvia ácida. Científicos estudiosos del medio ambiente, estiman que más del 30 por ciento de la lluvia ácida que cae en la zona meridional de Holanda, es el resultado precisamente de las excretas. (83)

Otro peligro, que no es tan notorio, porque no se produce como un accidente de trabajo, es el de las variaciones climáticas mundiales producidas paulatinamente por el hombre. Este peligro está en estrecha relación con el aumento de la población mundial, el creciente consumo energético y el incremento de la producción agropecuaria e industrial que han provocado un aumento en la concentración de determinadas trazas de gases en la atmósfera. La influencia de estas trazas sobre el clima se producen por las siguientes causas: dejan pasar los rayos solares, casi sin debilitarlos, a la superficie de la tierra; por otra parte, reducen considerablemente la irradiación térmica de la tierra por la absorción en la gama infrarroja del espectro, lo que provoca un aumento de la temperatura de las capas bajas de la atmósfera (con el simultáneo enfriamiento de la estratosfera). Esto se conoce como "efecto invernadero", los principales gases que lo producen son: Bióxido de carbono, ozono, compuestos clorofluorocarbonados, óxido nitroso, metano, amoníaco y tetracloruro de carbono (Cuadro 1)(81).

La evaluación del impacto ambiental incluye, además de los efectos de desperdicios en los recursos de agua y suelo, los factores considerados como molestias, que son más sociales y políticos, y que no siempre pueden ser cuantificables (96).

## 1.2 Características físicas, químicas y biológicas de las excretas.

En función de las modalidades de unidad pecuaria se pueden obtener dos clases de estiércol de ganado porcino:

a) Estiércol sólido o semisólido, constituido por una mezcla de heces y orina con otros materiales de desecho. Considerando como desecho cualquier otro material propio del lavado de una granja (29).

b) Estiércol líquido, constituido exclusivamente por heces y orina (34).

Las excretas generadas en una granja de cerdos se componen de 85% de orina y un 35% de heces (Cuadro 2) (19). La cantidad producida diariamente es aproximadamente el 8 % del peso vivo; como promedio se admite una producción diaria de orina en litros equivalente al 4 % del peso vivo de los animales (34). En algunas unidades de producción la dilución de las deyecciones da lugar a volúmenes de aguas residuales que pueden alcanzar cifras de 40-50 litros por animal/día, aunque esto parece deberse al empleo de cantidades excesivas y no necesarias de agua en la limpieza de los locales (34). Considerando un inventario porcino nacional de 14.4 millones de cabezas como reporta la SARH, la porcicultura nacional produce cerca de 80 mil toneladas diarias de desechos (19).

Otro criterio que se utiliza en algunas investigaciones para cuantificar la producción de estiércol de cerdo es la que se muestra en el cuadro 3. La composición de las excretas varía dependiendo del tipo de alimentación que reciban los animales, y según Blouin *et al.*, también varía dentro de la misma granja

dependiendo del periodo del año en que se encuentre (Cuadro 4)(6). Otro análisis de la composición del estiércol de cerdo fue citado por Muller 1980, se muestra en el cuadro 5. La composición de aminoácidos de las heces porcinas se muestra en el cuadro 6. Otras características del estiércol porcino se muestran en el cuadro 7.

### 1.3 Indicadores de olores ofensivos.

Los olores indeseables que emanan a partir de las instalaciones porcinas tienen su origen en la descomposición de las excreciones porcinas.

Pueden considerarse como contaminantes molestos, y los productores porcinos tienen la responsabilidad moral y social de adoptar una actitud de entendimiento y cooperación a cualquier queja del público en general (28). Por ejemplo, la cantidad de quejas acerca de olores agrícolas recibidos por las autoridades locales en el Reino Unido aumento de 660 en los años 60's a 2,478 en los años 70's y a 3,828 entre Abril de 1980 y Marzo de 1981. El almacenar y expandir en tierra las excretas de cerdo fue la mayor causa de estas quejas (101). Se han hecho algunos intentos para relacionar las características químicas, con los olores de las excretas. Bell (1970) encontró una relación cercana entre los ácidos grasos volátiles y el mal olor en el almacenamiento anaeróbico y aeróbico de la pollinaza. La relación no fué cuantificada pero aparentemente es estrecha y lineal. Sobel (1972) midió la ofensividad de la pollinaza en varias condiciones de almacenamiento. El estiércol

fué acumulado anaeróbicamente (No diluido y diluido con agua), el abono secado o ventilado. Fué encontrado un logaritmo inverso (pH) entre el total de sólidos y la ofensividad. Barth et al (1974) correlacionaron la concentración de ácidos grasos volátiles, sulfuro de hidrógeno y amoníaco en el estiércol de vacas almacenado aeróbica y anaeróbicamente, con la intensidad del olor, se midió la dilución líquida (101). Kowalesky et al. (1980) midieron la fuerza de los olores con una escala sin citar, de los vientos bajos en los edificios de confinamiento, de las suspensiones almacenadas y en los campos donde la suspensión fué esparcida sin tratamiento. La correlación del amoníaco con la fuerza del olor ( $R=0.85$ ,  $P=0.001$ ) en una relación curvilínea. En una revisión de los componentes potencialmente apropiados para utilizar como indicadores de olores, Spoelstra (1980) notó cinco criterios que debieran ser cumplidos:

- 1.- Los componentes de degradación tienen que ser producidos a partir de proteínas (o posiblemente de carbohidratos).
- 2.- Los componentes deberían ser productos-finales estables bajo condiciones normales de almacenamiento del estiércol (por ejemplo la práctica de granjas) la acumulación temporal de los compuestos no es apropiada.
- 3.- La fermentación de los componentes tiene que reflejar la degradación cinética del estiércol.
- 4.- Los componentes tienen que responder de un modo representativo a los cambios ambientales, por ejemplo aereación y formación de metano.

5.- Las concentraciones tienen que ser adecuadamente grandes para facilitar las mediciones, rastrear los componentes que no son apropiados (101).

Los principales componentes que se producen de la descomposición del estiércol y que tienen un olor cuestionable para ciertas personas incluyen amoniaco, sulfuro de hidrógeno, escatol e indol, además de aminas y mercaptanos (28).

Las medidas para el control de los olores incluyen por una parte la reducción de contenidos húmedos en el estiércol ya que la descomposición biológica anaerobia se detiene cuando el contenido de humedad en el estiércol es menor a 40%, y por otra cubriendo los tanques de fermentación en el proceso de la digestión aerobia. Las lagunas anaerobias diseñadas y manejadas apropiadamente no están libres de olores, en ocasiones tienen problemas de este tipo. Otros métodos que permiten la reducción de la presencia de olores desagradables incluyen una cuidadosa selección de los sitios para nuevas unidades porcícolas, la selección de terreno con bajas corrientes de aire hacia centros de población humana cuando se disemine el estiércol y de preferencia por la mañana que por la tarde (puesto que las personas son más sensibles a los olores por la mañana que por la tarde) y aplicación directa del estiércol sobre el terreno o cubrir inmediatamente el material después de su aplicación a la tierra (28).

Los procedimientos para controlar los contaminantes del aire incluyen el diseño mismo de las instalaciones y ubicación, tratamiento biológico y aditivos químicos. En relación a mejorar el aire se requiere una buena ventilación y el manejo

de los desechos, al igual que los ingredientes nutricionales y aditivos. La ventilación, la composición de la ración y el sistema de drenaje afectan la calidad del aire (43).

El diseño de las instalaciones y su evaluación es la técnica de control de emisión de olores más importante. Las lagunas de fermentación deben ser diseñadas con base a las indicaciones de la máxima carga indicada en función de dicho control. Su adecuado tamaño permitirá que la población microbiana mantenga su radio de digestión y por ende la emisión de olores. La sobrecarga aumenta la concentración de sólidos suspendidos en las capas superficiales de la laguna, limitando la luz necesaria que permite el crecimiento de bacterias que utilizan azufre. Dichas bacterias previenen la liberación de ácido sulfhídrico, deteniéndolo en su estructura celular. La estimulación de la actividad de estas bacterias explica la reducción del olor a "huevo podrido" que se observa al incluir el extracto de yuca en una laguna anaeróbica problema. En la actualidad los sistemas de manejo de los desechos anaeróbicos industriales y agrícolas utilizan el extracto de Yuca ghidigera, enzimas e inoculantes bacterianos en el control de olores. La aplicación de estos materiales estimula la actividad bacteriana durante la fase de cupo máximo, de sobrecarga rápida o cambio de pH. Su propósito es estimular el crecimiento bacteriano, ya que estimulan la fermentación anaeróbica, lo cual explica el incremento en la actividad de la laguna (burbujeo) y disminuyen el tiempo de bombeo de los desechos porcinos.

Aunque el extracto de yuca se puede agregar a la laguna en su forma líquida, su inclusión en el alimento es mucho más simple, y esta medida es la que permite la mejor ruta de incorporación a la laguna. En múltiples ocasiones se ha demostrado el incremento en la productividad en la conversión alimenticia en aves (Johnsten *et al.*, 1981,1982) y en cerdos en crecimiento y finalización (Cromwell *et al.*, 1985, Mader y Brumm 1987) (52).

La respuesta integral a una serie de ensayos donde se adiciona el extracto, a razón de 56 g/tonelada de alimento dió un incremento del 5% en ganancia de peso y una mejoría en la conversión alimenticia del 2%. Una ventaja más del uso de este compuesto -el cual fácilmente se adapta a cualquier programa de alimentación- es que su efecto es comparable o sinérgico al de varios promotores del crecimiento (52).

#### 1.4 Producción de gases tóxicos.

En países de Norteamérica, y otros países, muchos de los edificios de confinamiento para cerdos incorporaron las estructuras de almacenamiento de estiércol con características de los 70's localizándolas bajo los pisos de rejilla. El estiércol es almacenado en forma líquida (aproximadamente con 10% de sólidos) para facilitar el manipuleo por medio de fuerza hidráulica. El estiércol se almacena típicamente de 3 a 9 meses después se remueve para su aplicación en la tierra.

El estiércol líquido presente dentro de un espacio cerrado, presenta peligros ocupacionales y peligros de salud animal (20,22). A menos que un tratamiento aeróbico especial sea

llevado a cabo el estiércol sufre una digestión anaeróbica resultando en la liberación de al menos 40 diferentes gases y vapores, muchos de los cuales son irritantes o tóxicos (Muehling, 1969; Donham *et al.* 1977)(23).

Estos gases generalmente son altas concentraciones de dióxido de carbono, amoniaco, ácido sulfhídrico, y metano (91). El peligro ocupacional que tienen estos gases ha sido mencionado en diferentes trabajos. Los problemas asociados con la salud animal y humana con los gases dentro de los edificios de confinamiento ganadero se muestran en el cuadro 8 (20,22).

O'Donoghue y Graesser (1962) observaron irritación de ojos, secreción nasal, salivación y alteraciones respiratorias en cerdos jóvenes expuestos de 5 a 40 ppm de Dióxido de azufre ( $SO_2$ ) continuamente por 8 hrs. Los efectos fueron ligeros a 5 ppm y más pronunciados por encima de 10 ppm. A 158 días después de la exposición, dos cerdos expuestos a 40 ppm y uno a 20 ppm mostraron endurecimiento pulmonar y fibrosis. Los cobayos (*Cavia cobaya*) expuestos a concentraciones de 10 y 18 ppm de  $SO_2$  por periodos de 96 horas o más, también mostraron un deterioro significativo en la ganancia de peso. Martin y Willoughby (1971) observaron la pérdida de cilios, desaparición de las células de la copa y diversos grados de metaplasia del epitelio traqueal y de las turbinas de cerdos jóvenes libres de patógenos específicos (SPF) expuestos continuamente aproximadamente a 35 ppm de  $SO_2$  por períodos de 1 a 6 semanas. Roger y Ferin (1981) encontraron que la exposición de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) a concentraciones de 45 ppm afectan el sistema de defensa antibacterial (21).

### 1.5 Enfermedades transmisibles a humanos y animales.

Aunque existen alrededor de cien zoonosis que pueden ser transmitidas a través de las heces de animales. Pocas son de importancia, las siguientes bacterias implican un peligro potencial asociado al estiércol de cerdos: Salmonella, Mycobacterium, Brucella, Escherichia coli patógena, Leptospira, Yersinia, y Campilabacter (Cuadro 9). Estas bacterias no siempre se encuentran en los desperdicios de cerdos, pero son comunes en desperdicios de cerdos infectados (61).

Donham *et al.* (1984) realizaron experimentos en donde trataron de evaluar los daños pulmonares que sufrirían los animales de laboratorio (ratones y cuyos), en edificios de confinamiento de cerdos, para predecir los efectos potenciales en enfermedades crónicas en humanos. La causa principal de estos daños pulmonares son algunos gases tóxicos que se encuentran en los edificios de confinamiento de los cerdos. Estos gases en concentraciones mayores a las recomendadas pueden tener efectos adversos para la salud de los animales y los trabajadores (Cuadro 10). Los gases más importantes son: amoníaco, ácido sulfhídrico, monóxido de carbono, bióxido de carbono y metano; también partículas en aerosoles, que generalmente son iguales o menores a 5  $\mu\text{m}$ . En conclusión, los animales de prueba resultaron con serias lesiones en los tejidos del tracto respiratorio, al estar en contacto con la atmósfera de los edificios de confinamiento de cerdos. Los cambios vistos en estos animales fueron: neumonía intersticial difusa, lesiones en la tráquea y turbinas nasales que incluían hiperplasia y metaplasia epitelial con infiltración de células

plasmáticas, algunas de las bacterias aisladas en las lesiones de estos animales fueron Escherichia coli, Streptococcus sp. y otros organismos fecales. Estas lesiones combinadas con el hecho de que del 10% al 15 % de los trabajadores se quejan de síntomas de neumonitis e hipersensibilidad, esto indica que estas condiciones pueden ser componentes de un síndrome que experimentan los trabajadores que laboran en confinamientos cerrados.

Adicionalmente, esto indica el riesgo de desarrollar fibrosis intersticial crónica, que es una secuela de múltiples episodios de una neumonitis por hipersensibilidad. Lo anterior realza la suposición que la exposición por largos periodos en la atmósfera de los edificios de confinamiento de cerdos, puede guiar a enfermedades pulmonares crónicas en los trabajadores (21).

#### **1.6 Problemas en algunas zonas productoras del país y sus posibles alternativas**

**Impacto ambiental de las granjas porcinas de la península de Yucatán.**

La porcicultura en Yucatán se ha venido transformando en una de las actividades más productivas de la región, sin embargo, la generación de desechos producidos también va en aumento, lo que conlleva un riesgo ecológico creciente. Las granjas porcícolas en Yucatán, generalmente se ubican dentro y a los alrededores de las poblaciones y en virtud de que el manejo de sus desechos no se encuentra organizado, cada granja se ha

convertido en un foco de contaminación. A la par del beneficio económico y social que representa el desarrollo de la crianza de cerdos se encuentra su efecto sobre el medio ambiente, ya que esta actividad es una gran productora de desechos, principalmente las excretas de los animales. La porcicultura se realice en corrales, hace que se requiera de extensiones relativamente pequeñas de terreno, lo que contribuye a la localización precisa de los centros de generación de contaminantes. En el estado de Yucatán la porcicultura se encuentra clasificada en tres sistemas administrativos diferentes, entre ellos manejan un total de 185 granjas con capacidades que varían de 20 hasta 6,000 cerdos por granja, siendo una proporción muy elevada las de menos de 1,000 animales. Estas granjas se encuentran localizadas, en su mayoría, en la parte norte del estado, donde por las características pedregosas del suelo, no permite el desarrollo agrícola en forma "ordenada", esta parte del Estado como casi toda la península es una planicie con casi nulos accidentes de terreno y de suelo muy permeable; las aguas subterráneas, única fuente del líquido en la zona, se encuentra a muy poca profundidad la cual no es mayor de 8 metros. Esta poca profundidad del manto freático y las características del suelo, hacen que las aguas reciban, en muy corto tiempo, una cantidad notable de los contaminantes que sean depositados en el suelo. Otra característica notable de la ubicación de las granjas porcícolas en Yucatán es que la mayoría de ellas se encuentran dentro o muy cerca de las poblaciones y en algunos casos las mismas granjas son casas habitación de las familias de los

granjeros. La zona rural de Yucatán es carente de servicios de saneamiento adecuado y en el caso del agua potable no se cuenta con una cobertura suficiente de agua potable por lo que es muy común que la población satisfaga sus necesidades utilizando el agua de los pozos superficiales que normalmente tienen en las casas; esta misma forma de abastecimiento es la empleada en la totalidad de las granjas cuyos pozos se localizan dentro de sus instalaciones y muy cerca de los corrales.

La cantidad de desechos generados en las granjas es muy elevada y aún las más pequeñas (< de 60 animales) producen cerca de 4 m<sup>3</sup> de lodo diariamente, lo que ocasiona que la fosa se llene en poco tiempo de entrar en operación y empieza a rebosar, ya que por lo general las fosas (que se construyeron) no exceden de los 50 m<sup>3</sup>, lo cual origina que los desechos sean dispersados directamente sobre el suelo, "transformando" los terrenos de la unidad pecuaria en verdaderos pantanos (97).

De éstos se desprenden malos olores y se generan miles de insectos y microorganismos que se dispersan en el aire, en el suelo y lo más grave se infiltran hasta alcanzar el manto freático. Este problema se agrava en las poblaciones aledañas a las granjas, ya que pocos disponen de agua potable, por lo que la gente que vive en las granjas se ve en la necesidad de tomar el agua de pozos para satisfacer sus necesidades.

Esta agua también es utilizada para las labores de higiene de los corrales, para alimentar a los cerdos, para riego agrícola, y debido a la carga contaminante que tiene el agua<sup>1</sup>, se

presentan casos de colibacilosis, principalmente en los cerdos recién nacidos, en los cuales se reportan índices de mortalidad de 20-25%.

#### ALTERNATIVAS

El manejo adecuado de los desechos generados en la actividad porcícola es una labor técnicamente factible y en condiciones económicas que pueden resultar favorables.

El composteo de las excretas es una operación que ha sido probada con resultados positivos (Mejía y Alonso; 1986) y el caso de las aguas residuales generadas en las operaciones de limpieza de los corrales también se ha ensayado con éxito (Mejía y Magaña; 1986); sin embargo, en el momento actual no se tiene en operación algún sistema de manejo de estos desechos.

#### RECOMENDACIONES

La problemática de las granjas porcícolas en el Estado de Yucatán, es una muestra palpable del escaso desarrollo y aplicación de la tecnología factible de ser aplicada para disminuir el riesgo que representan los desechos generados en estos lugares. La contaminación originada es cada día más grave; y su manejo adecuado redundaría en el mejoramiento de las condiciones ambientales de las explotaciones y se reflejaría también en un beneficio a la misma actividad al verse disminuidos los brotes de enfermedades, principalmente en los cerdos recién nacidos. Este llamado de alerta está dirigido, principalmente, a aquellos que laboran en esta actividad o tienen alguna autoridad sobre los mismos, desempeñan en las granjas para tratar de evitar que el problema continúe con el deterioro ecológico, lo cual se manifestaría en

desempeñan en las granjas para tratar de evitar que el problema continúe con el deterioro ecológico, lo cual se manifestaría en brotes de enfermedades y epidemias entre las personas que habitan dentro o alrededor de las granjas. El problema de los desechos de las granjas porcícolas permanecerá mientras no se tenga la determinación de aprovecharlos y convertir estos desperdicios en productos útiles a la misma actividad porcícola y al mismo tiempo detener la contaminación que están ocasionando (97).

Impacto ambiental en la zona centro del país.

La explotación porcícola a nivel nacional, genera anualmente ± 31 millones de toneladas de excremento. Este residuo no es manejado en forma adecuada ni sometido a ningún tratamiento, es seguramente uno de los productos que mayormente daña a los ecosistemas y consecuentemente a la salud pública (82).

En el centro del país existe una cadena de ciudades, en las que tradicionalmente se dedican a la explotación porcícola. En reciente exploración en la ciudad de Pénjamo del estado de Guanajuato se obtuvo la siguiente información:

- \* Población media 30,000 habitantes
- \* Predios urbanos 6,000 cuentas registradas
- \* Ganado porcino 90,000 cabezas semestrales
- \* Extensión de la mancha urbana 179.5 Has.
- \* La población humana-cerdos es de 668.5 cabezas por hectárea incluyendo vías publicas.

Las viviendas no sólo son habitaciones humanas, se han convertido además en zahurdas ya que su uso está en relación de 1:3 es decir un humano por tres cerdos. En esta ciudad, convertida de hecho en una gran zahurda, se generan aproximadamente 157.5 toneladas de estiércol y 180,000 litros de orina de cerdo por día, residuo que por carecer del tratamiento adecuado para su disposición final, están contaminando severamente el suelo, mantos acuíferos y contribuyendo poderosamente a la eutroficación del río Lerma cuyo curso esta próximo a dicha ciudad (82).

## CAPITULO 2

## DIGESTION ANAEROBICA

El sistema más utilizado a escala mundial para depurar los lodos de carácter orgánico es el llamado de digestión anaeróbica. Este proceso tiene entre sus ventajas fundamentales las siguientes: reducción de volumen del material digerido; mejora la capacidad de deshidratación del lodo; elimina microorganismos patógenos y parásitos; y se obtiene un gas de alto valor combustible (69).

El tratamiento del residual porcino por digestión anaeróbica ha sido objeto de estudio por gran número de autores (3,80). Para optimizar el diseño, la proyección y la construcción de los llamados digestores anaeróbicos es necesario conocer y dominar los aspectos teóricos de este proceso. Los principales parámetros que sirven de base para el cálculo de la mejor ejecución de las obras referentes a la proyección y construcción de los tanques digestores son los siguientes: (67)

**Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es uno de los parámetros empleados para definir la fracción orgánica. Esta prueba estima la cantidad de oxígeno que se requiere para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua por medio de una población bacteriana heterogénea. La información que se obtiene con este análisis es de la materia orgánica biodegradable que contiene la muestra (78). Otra forma de definir a la DBO es: Se satura una muestra de agua con oxígeno a 20°C y se mide cuánto oxígeno se ha consumido después de cinco días. La cantidad consumida en litros se

designa DBO (43).

**Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Este método determina la cantidad de oxígeno necesario para oxidar a la materia orgánica de un desecho por medio de un agente oxidante, bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura y tiempo, transformando la materia orgánica en bióxido de carbono y agua (78).

**Tiempo de Retención (TR) :** Las bacterias requieren de cierto tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura, ya que a mayor temperatura el tiempo de retención requerido para obtener una buena producción de gas es menor (hasta un límite)(59).

**Temperatura :** Como en estas áreas evidentemente los requerimientos de energía del proceso, dependen principalmente de la temperatura aplicada a la digestión, el conocimiento de la influencia de la temperatura en la producción de gas, es indispensable para determinar la temperatura óptima del proceso (98). El proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15 hasta 60 °C. Sin embargo, para que las bacterias formadoras de metano trabajen en forma óptima se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilan entre 30 y 60 °C, dependiendo el tipo de bacterias que se adapten y desarrollen.

Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen dos rangos de temperatura, el mesofílico que va de  $\pm$  30 a 40 °C (39,59,67) y el rango termofílico que va de  $\pm$  50 a 60 °C (9,39,59,67). Estos rangos se plantean de forma muy general, ya que algunos autores aumentan o restringen la amplitud de los mismos según su criterio. La temperatura óptima del proceso para cada uno de

estos rangos, en condiciones ambientales dadas, dependerá de las características de la suspensión a digerir y de otros factores (67).

**Sólidos Totales** : Toda la materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida; a esta última se le llama "sólidos totales". El porcentaje de sólidos totales contenidos en la mezcla con que se carga al digestor, es también un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se lleve a cabo en forma satisfactoria (59).

**Sólidos Volátiles** : Fracción orgánica de una muestra de material biológico que se determina midiendo la diferencia entre el peso seco (sólidos totales) y el contenido de ceniza. Es decir, es el peso después de incinerar los residuos a 450 o 600 °C.

**Ácidos Grasos Volátiles**: La descomposición microbiana en condiciones anaeróbicas da como resultados un rango de compuestos orgánicos, incluyendo los ácidos grasos volátiles (14). El proceso de digestión anaerobia puede retardarse o detenerse si la etapa ácida se acentúa, lo cual ocurre cuando existe una elevada concentración de ácidos volátiles.

## **2.1 Proceso microbiológico y bioquímico fundamento del tratamiento anaeróbico.**

Es bien conocido de todos, que el proceso de digestión anaerobia técnicamente ofrece grandes ventajas, entre las cuales cabe mencionar su uso como una fuente alterna de producción de energía y como un excelente estabilizador de los lodos de desecho.

En la naturaleza, por la acción microbiana, cualquier desecho, agua residual o tipo de materia orgánica sufre una transformación o degradación biológica espontánea, ya sea en condiciones aeróbicas o anaeróbicas. La población microbiana que se denomina biomasa utiliza lo antes mencionado, como sustrato para producir la energía que requieren. El uso de microorganismos como herramienta, haciendo uso de sus capacidades metabólicas ha creado una ciencia denominada biotecnología (66).

Durante la fermentación anaeróbica el sustrato es degradado a productos finales como  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ . Cuatro grupos metabólicos de bacterias pueden operar en esta degradación. Grupo I: bacterias hidrolíticas y fermentativas, que fermentan los productos de polímeros hidrolíticos a ácidos grasos,  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ . El grupo II: bacterias que convierten ácidos grasos o alcoholes en  $\text{H}_2$  y acetato. El grupo III: son bacterias que oxidan el  $\text{H}_2$ , con la reducción de  $\text{CO}_2$ , a acetato. El grupo IV: de bacterias metanogénicas (92). Las figuras 1 y 2 presentan el proceso global de la digestión anaerobia.

En un digestor anaerobio se identifican los siguientes procesos: (66)

- 1.- Hidrólisis de biopolímeros
  - 1a - hidrólisis de proteínas
  - 1b - hidrólisis de carbohidratos
  - 1c - hidrólisis de lípidos
- 2.- Fermentación de aminoácidos y azúcares
- 3.- Oxidación anaeróbica de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes

- 4.- Oxidación anaeróbica de productos intermediarios tales como ácidos volátiles (con excepción del acetato)
- 5.- Conversión del acetato en metano
- 6.- Conversión del hidrógeno a metano (66).

## 2.2 Fases secuenciales de la digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica de materia orgánica líquida envuelve un balance entre tres reacciones biológicas: la fase ácida, la fase intermedia y la fase metanogénica. Estas reacciones son independientes y ocurren simultáneamente. La del metano ( $\text{CH}_4$ ) es la fase predominante, los productos gaseosos finales principales son  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ , que tienen niveles tóxicos relativamente muy bajos (22).

### FASE I

Esta fase es caracterizada por una disminución en la producción de metano, acompañada de un incremento en la producción de ácidos grasos de cadena corta. Esto es congruente con la presencia de bacterias que degradan primeramente substratos de ácidos grasos y de condiciones desfavorables para las bacterias metanogénicas.

El crecimiento de las bacterias metanogénicas pudo haber sido inhibido por el bajo potencial de óxido-reducción [Redox ( $E_h$ ) ( $>-220$  mV hasta el día 7)]; los requerimientos metanogénicos del potencial Redox son cercanos a  $-360$  mV para el crecimiento. En el comienzo de la fase I, existe una tasa alta en la degradación del substrato principal, y esta tasa disminuye con el tiempo de incubación. Se encontraron dos posibles explica-

ciones para la disminución en la tasa de degradación del sustrato principal (Compuestos de carbón orgánico, excluyendo al acetato, propionato y butirato). La primera por la inhibición en el crecimiento debido a un incremento en la concentración de ácido acético y/o etanol. La segunda explicación es por que algunos sustratos son degradados más fácilmente, por ejemplo las proteínas o hemicelulosa, que fueron consumidas al final de la fase I.

La alta proporción es explicable por la alta producción de  $H_2$ , asociada con la producción de acetato, pero una baja conversión de acetato a metano (acetato acumulado). El principal factor limitante en la tasa de producción de metano en la fase I parece ser una pequeña población metanogénica que utiliza acetato (92).

## FASE II

Esta fase fue caracterizada por un incremento exponencial en la tasa de producción de metano, que presumiblemente es debido a un crecimiento exponencial de bacterias metanogénicas duplicando el tiempo de 4.4 - 7.9 días, doblando el tiempo en 1-9 días para el crecimiento de bacterias en acetato (a 39°C) que fueron medidos.

La razón para que inicie el incremento exponencial con la fase II es desconocida. Pero se sugiere que puede deberse a una baja en el potencial Redox durante la fase I, a un valor que permitió el crecimiento de las bacterias metanogénicas. Paralelo al crecimiento exponencial en la producción de metano, provocó una disminución en el acetato seguido de una baja en el butirato, mientras que la concentración del propionato

permaneció constante. La caída del butirato puede ser explicada por la baja en la concentración del acetato, ya que se ha mostrado que el butirato es degradado a acetato e hidrógeno, y que la tasa de degradación depende de la concentración de los productos. Se encontraron dos posibles explicaciones para la baja tasa de degradación del substrato principal a través de la mayoría de la fase II. Una explicación es que había una inhibición debida al ácido acético o al etanol, como se sugirió para la fase I. La otra explicación es que allí hay un aumento gradual en la población de bacterias capaces de degradar los componentes del estiércol de cerdo (por ejemplo celulosa) que es diferente la degradación del substrato de la fase I. La mayoría del metano fue producido del acetato. Por ejemplo en el período de los días 18 a 34 disminuyó la concentración de acetato correspondiente al 70 % de la producción de metano. Esto fue corroborado por la baja contribución de  $\text{CO}_2$  a la metanogénesis (11%) en el medio de la fase II. Los cambios en la contribución de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  a metano ha estado generalmente atribuido a la acetogénesis de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ , o los cambios en la composición del substrato orgánico que se degrada primeramente a diferentes proporciones de  $\text{H}_2$  a acetato. Una alta contribución de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$  (a metano) fue asociada con la producción de metano, pero no se utiliza el acetato (como en la fase I) mientras que una baja contribución de  $\text{CO}_2$  fue debido a una baja producción de  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ , pero una alta utilización de acetato.

### FASE III

La tasa de producción de metano fue máxima para el período del

comienzo de la fase III, que después declinaria. Cuando disminuyó el acetato, el butirato estuvo ausente, pero aumento el propionato en el lote de fermentación. El incremento del propionato es usualmente asociado con un exceso en la producción de hidrógeno. El propionato acumulado es sin duda un punto para profundizar en su estudio. La tasa de degradación del substrato primario fue paralela a la tasa de producción de metano, inicialmente alta y después disminuyo durante la fase III. La baja concentración de ácidos grasos sugiere que la hidrólisis y la fermentación del substrato primario fue el principal factor, en la tasa de producción de metano.

La producción neta de ácidos grasos esta asociados con la producción de hidrógeno o con el consumo de hidrógeno. La degradación neta de ácidos grasos esta asociada con la producción hidrógeno y/o con la producción de metano de el acetato. La cantidad de metano producida a través de la degradación completa del substrato primario fue calculado de la producción total de metano menos la producción de metano asociada con los cambios en la concentración de ácidos grasos. Un tercio del metano producido a través de la degradación completa del substrato principal es siempre de  $H_2$  y  $CO_2$ . La cantidad de metano producido del  $H_2$  y de  $CO_2$  asociados con los cambios en la concentración de ácidos grasos, más las cantidades de metano producido de  $H_2$  y  $CO_2$  a través de la degradación completa del substrato principal, dará la cantidad total de metano producido del  $H_2$  y  $CO_2$  en un periodo dado (92).

### 2.3 Efectos de diferentes concentraciones de sólidos.

El proceso de digestión anaeróbica ha sido ampliamente estudiado tanto en sus aspectos bioquímicos como cinéticos, pudiendo decirse que los mecanismos que en él ocurren son perfectamente conocidos. La heterogeneidad de las bacterias que realizan la fermentación (Toerien and Hattingh; 1969) da lugar a una serie de reacciones sucesivas que hacen muy complejo el sistema. Para el funcionamiento correcto de un digestor anaeróbico se requiere de alcanzar el equilibrio entre todos los componentes del sistema y de éstos con las condiciones del influente y efluente del reactor. Cada uno de los componentes de la materia orgánica son atacados por diferentes bacterias y vías y por lo tanto su degradación ocurre con velocidad diferente; de estos procesos metabólicos se generan los más variados productos que pueden ser intermediarios del proceso, productos finales o bien inhibidores del mismo proceso (64). La cantidad de materia orgánica por unidad de volumen que se suministre a un digestor puede ser degradada por las bacterias, si éstas se encuentran en la cantidad adecuada para poder hacerlo; concentraciones elevadas y concentraciones bajas pueden tener el mismo efecto, es decir que tanto un aumento en la concentración como una baja pueden provocar una baja en la eficiencia del proceso.

Una elevada concentración de sustrato permite a las bacterias un menor gasto de energía y podrán actuar más fácilmente, pero si la concentración se eleva sin control puede llegarse a alcanzar condiciones de saturación, lo que se manifiesta como una baja en la eficiencia del proceso. Por otro lado, las

concentraciones bajas del sustrato hacen que el material orgánico se encuentre menos disponible para las bacterias lo que puede hacer difícil la digestión anaeróbica por lo que se necesitarán condiciones de biomasa adecuadas para ello. La influencia de la concentración del sustrato es determinante y debe estar equilibrada con la cantidad de microorganismos en el sistema y no necesariamente se incrementará la eficiencia de un digestor con aumentar la concentración de sólidos en el interior del mismo (64). En experimentos realizados por Fischer *et al.* (30) en donde se evaluó la digestión anaeróbica de estiércol de cerdos con diversas concentraciones de sólidos, bajo las siguientes condiciones de equipo y métodos, se encontraron los siguientes resultados.

Un digestor anaeróbico de  $0.43\text{m}^3$  fue operado para 773 días a  $35^\circ\text{C}$  y a un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 15 días. El digestor fue cargado diariamente con una mezcla de estiércol y agua del grifo. El estiércol usado para el experimento fue colectado de un alimentador de piso de concreto, de cerdos de finalización con alimentación de una ración de maíz/milo (14% de proteína). El estiércol fue colectado semanalmente y refrigerado hasta su uso. El contenido del digestor fue agitado para la recirculación de gas dos veces diariamente por una hora, excepto para la concentración más allá de 80 g de sólidos volátiles por litro, cuando la mezcla fue aumentada a 3 veces por día. El plan experimental fue comenzar en una concentración de 60g de sólidos volátiles por litro y aumentar ésta concentración por incremento de 12g de sólidos volátiles por litro. El digestor estuvo operando a cada concentración a

4 TRHs y muestreado, y la información del gas fue tomada durante los siguientes 20 días. El total del tiempo por cada concentración fue más de 80 días.

Algunos de los resultados que se obtuvieron bajo estas condiciones fueron las siguientes: El porcentaje de Sólidos Volátiles (SV) convertidos a biogas disminuyó significativamente a medida que la concentración aumentaba (cuadro 11). El rendimiento de metano (RM) es una medida del alcance de la conversión de SV a metano. El RM disminuyó a medida que la concentración se incrementó (cuadro 11). Aproximadamente 0.43 litros de  $\text{CH}_4$  por gramo de SV añadidos fue producido en concentraciones menores que 40 gr. de SV por litro. La total producción de metano (TPM) aumento hasta que la concentración alcanzó 97 g de SV por litro, entonces disminuyó (cuadro 11). Los datos para Estados Unidos (Datos de este documento; Fischer et al., 1975; Hashimoto, 1982) indican una alza significativa en RM que los resultados para las investigaciones de Europa (Van Velsen 1977; Summers & Bousfield, 1980)(Cuadro 12). Estos resultados pueden ser por que la ración de los cerdos americanos consiste principalmente de maíz, pero las raciones europeas están hechas de granos pequeños, tales como la cebada. Todos los datos se colocaron en esta muestra, como la tasa de carga aumento ( o la concentración aumentó), la eficiencia del digestor en convertir S.V. a metano hasta disminuyó gradualmente, en tasas altamente cargadas, la eficiencia disminuyó rápidamente. Los datos del cuadro 12 fueron obtenidos de digestores operando a 35 °C. La máxima eficiencia de los digestores en convertir SV a metano para este estiércol

y condiciones operacionales es en el rango de 0.42 a 0.43 litros de  $\text{CH}_4$  por gramo de S.V. agregados (cuadro 12). La concentración de varios parámetros químicos medidos en el efluente e influente del digestor a diferentes concentraciones están dados en el cuadro 12. Mientras la concentración aumenta, todos los parámetros aumentan. Los datos indican que el proceso de digestión fue estable (con respecto a la concentración baja de AGV) concentraciones arriba de 87.8 g por litro. A concentraciones de 97.1 por litro, el digestor comenzó a mostrar signos de inestabilidad, como indica el incremento en la concentración de AGV y especialmente el aumento de ácido propiónico (914 mg por litro) que es una medida de inestabilidad (Georgacakis, 1980) a concentraciones de 108 g por litro, el digestor fue inestable, como indica la alta concentración de  $\text{NH}_3\text{-N}$ , alcalinidad, concentración de AGV y baja producción de gas. El cuadro 12 muestra la concentración de AGV en el digestor durante 105 días de operación comprobada a una concentración de 108 g por litro. La concentración del digestor fue reducida a 48 g por litro en el día 39 por la alta concentración de AGV y la espuma en el digestor. La espuma fue muy intensa, y lleno el cepo de gas condensado y fluyo a través del medidor de gas. Es interesante notar un aumento de casi el doble de ácido propiónico en el día 54 después de que la concentración fue disminuyendo (30).

#### 2.4 - Efecto de cambios de temperatura.

La digestión anaeróbica de desechos animales puede ser conducida a temperaturas mesofílicas y a temperaturas

termofílicas. Aunque la digestión termofílica de estiércol puede tener beneficios sobre la digestión mesofílica, tales como altas tasas de digestión, gran conversión de desechos orgánicos a gas, rápida separación de sólidos y líquidos y disminución de bacterias y virus patógenos, el rango de temperatura mesofílica debe ser preferentemente para la digestión de desechos animales de grandes granjas, por razones prácticas. Originalmente éstas temperaturas se practicaban para la digestión de lodos y aguas sucias (98). Las opiniones expresadas en la literatura de los efectos en los cambios de temperatura en el desempeño del digestor son variadas (13). La mayor desventaja de la digestión termofílica cuando se compara con la mesofílica es la estabilidad del proceso. Porque a temperaturas elevadas, el número de especies bacterianas funcionales ha sido considerablemente reducido (Smith, 1980; Wolfe, 1979; Ziekus, 1977) y muy pocas especies están presentes en el desempeño de la conversión metabólica de la materia orgánica a metano y bióxido de carbono. Debido a esta selección del medio, a los cortos tiempos de retención hidráulica y al pesado proceso de los lodos que usualmente acompaña a la operación termofílica, el digestor opera en estados de tensión muy altos y con susceptibilidad a trastornos (41). Sin embargo, hay evidencias que los problemas no son insuperables. La estabilidad de la temperatura puede ser realizada por la provisión de controles automáticos (9). Un sentimiento muy extendido es el que el proceso de digestión mesofílico es muy sensible a los cambios repentinos en la temperatura y que el proceso termofílico puede aún ser mayor. Sin embargo, los

resultados reportados en la literatura sobre este punto son contradictorios.

Speece y Kem (1970) estudiaron los efectos de las variaciones de la temperatura en periodos cortos en la producción de metano usando un digester de lote mesofilico a escala (35 °C). Los tiempos de retención fueron de 20 dias y el digester fue alimentado con lodo crudo diariamente. Ellos notaron que la tasa de producción de metano fue particularmente sensible a la disminución de la temperatura y prácticamente ceso cuando la temperatura cayó a 20 °C. Sin embargo, la gasificación se reanudo rápidamente cuando la temperatura regreso a su nivel original de 35 °C. También condujeron un experimento en el que los ácidos volátiles fueron incrementados artificialmente las mismas veces que la temperatura fue aumentada desde 35 °C a 45 °C. El aumento de la temperatura resultó en una rápida reducción en la concentración de ácidos volátiles y por lo tanto sugirieron que un aumento temporal en la temperatura del digester puede servir para restaurar el balance en el digester (9). Trabajos de Varel *et al.* (1977) con desperdicios de vaca reportaron un incremento en la producción de biogas de cerca del 15 % cuando la temperatura fue abruptamente cambiada de 55 °C a 60 °C. Sin embargo, ya que el tiempo de muestreo fue relativamente corto (seis dias consecutivos inmediatamente después del cambio) el aumento pudiera haber sido solamente un fenómeno transitorio. Porque el tiempo de retención hidráulica involucrado es completamente variado, los sistemas continuos, deberán de estar permitidos tiempos más largos para establecer la respuesta de los cambios de temperatura (92).

Chen *et* (1986) realizaron investigaciones del estiércol de cerdo en fermentación termofílica elevando la temperatura. El cuadro 13 muestra los efectos del incremento de temperatura de 55°C a 60°C, 1°C por día en las características operacionales del digestor. A concentraciones de 30 kg de sólidos volátiles por metro cúbico y examinando los tiempos de retención hidráulica de 4, 5, 8 y 13 días. En todos los tiempos de retención hidráulica estudiados, la tasa de producción volumétrica de metano ( $\tau$ ) y la calidad de metano ( $\beta$ ) decrecieron cuando la temperatura fue incrementada de 55°C a 60°C. La producción de biogas a 60 °C tuvo un % de metano mas bajo que cuando este se producía a 55°C. Altos niveles de amoniaco y alcalinidad fueron observados a 60°C. Altos niveles de todos los ácidos grasos volátiles fueron notados en todo el experimento, pero a los 5 días de tiempo de retención la concentración del propionato se alargo más allá de 1-2 kg por m<sup>3</sup>. Sobre concentraciones diez veces más altas de los ácidos grasos de cadena larga fueron observados a 60°C.

La reducción de sólidos volátiles disminuyó como se fue incrementando la temperatura de 55°C a 60°C. Las bacterias metanogénicas fueron aparentemente las primeras en afectarse adversamente por este incremento de temperatura, resultando en la acumulación de ácidos y disminuyendo la reducción de sólidos volátiles. Claramente, el incremento de la temperatura de 55°C a 60°C altero el sistema y resultó en una disminución en  $\tau$ . Estos resultados difieren de los estudios realizados por Varel *et al.* (1977) que muestran un incremento en  $\tau$ , cuando la temperatura de fermentación fue de 55°C a 60°C. Esto no es

sorprendente en la digestión termofílica de estiércol de cerdo, aparentemente no es estable como el estiércol de bovinos de carne (13). El conocimiento de la influencia de la temperatura en la producción de gas es indispensable para determinar la temperatura óptima del proceso con respecto a la recuperación de energía neta (98). El buen control del proceso y una adecuada comprensión de la influencia de las variables operacionales, particularmente la temperatura en el proceso biológico, serán factores importantes en el éxito del uso del proceso termofílico de un digestor anaeróbico (9).

## 2.5 Efecto de aditivos.

Los aditivos del alimento tales como los antibióticos y compuestos químicos seleccionados han aumentado su uso como promotores del crecimiento y como agentes para prevenir enfermedades en las granjas de cerdos (cuadro 14).

Considerables investigaciones han sido conducidas para determinar las cantidades de aditivos que provocaran fallas en la operación y desarrollo del sistema de digestión anaeróbica (84).

Taiganides (1963) sugirió que el tratamiento biológico del estiércol de cerdo fué limitado cuando se le agregaron a la ración 36mg/kg de cobre, el autor cree que el cobre excretado en cerdos de crecimiento y finalización alimentados con 250 mg/kg de cobre suplementado en la ración, fue la substancia que causó las fallas en el digestor anaeróbico, que presentó una concentración de 60-80 mg/litro (base seca) en el desperdicio. Hobson y Shaw (1973) concluyeron que el cobre excretado a

niveles menores de 50 mg/litro, no fueron inhibitorios en la digestión anaeróbica del estiércol de cerdos. Brumm y Sutton (1979) encontraron una reducción en la degradación de los sólidos totales y sólidos volátiles del estiércol en pozos anaeróbicos de cerdos alimentados con 125 a 250mg/kg de sulfato de cobre. En apariencia, la presencia de avilamicina en el estiércol alteró el metabolismo de la microflora e incremento la eficiencia de convertir los ácidos grasos de cadena corta en metano, o de producir las condiciones en el digestor para que la metanogénesis aumentara, incrementando la actividad metabólica. Sin embargo, en un estudio de Brumm *et al.* (1980) sólo la producción de ácidos grasos volátiles fue incrementada. Aparentemente, la presencia de avilamicina mejoró las condiciones en la mezcla del cultivo del digestor para degradar los sólidos volátiles y convertir los AGV a metano con una eficiencia máxima de energía (90).

## 2.6 - Comportamiento de los ácidos grasos volátiles.

En el pasado, los ácidos grasos volátiles (AGV) fueron usados constantemente como indicadores del desempeño de la digestión anaeróbica del estiércol de animales. Especialmente, la concentración de ácido acético y la relación de ácido propionico y acético, han sido utilizados como indicadores para monitorear el estrés en el digestor. Otros ácidos grasos volátiles existentes en el ambiente anaeróbico incluyen el butírico, iso-butírico, valérico e iso-valérico, pero existe muy poca información disponible concerniente a estos ácidos en

la producción de metano de los estiércoles animales. Los términos "salud" del digestor y producción de metano son correlacionadas con los niveles de ácidos grasos volátiles. Fischer *et al.* (1983) relacionó la estabilidad de la digestión anaeróbica de desperdicios de cerdo con la baja concentración de ácidos grasos volátiles (40). Debido a que durante la digestión existen tres reacciones biológicas: la fase ácida, la fase intermedia y la fase metanogénica. En la primera fase, se producen una cantidad de ácidos orgánicos, se denomina "acidogénesis".

Los ácidos orgánicos aparecen en el licor mezclado en forma de aniones y se originan de moléculas neutras del substrato.

Varios grupos sirven como unión entre la etapa fermentativa y la metanogénica, algunas de ellas, inclusive compiten con las bacterias fermentativas por los substratos monoméricos, otras compiten con las Archae-bacterias metanogénicas por el acetato,  $H_2$  y  $CO_2$ . Los ácidos grasos volátiles son metabolizados a acetato,  $H_2$  y  $CO_2$  por especies microbianas pertenecientes al grupo de las bacterias acetogénicas obligadas productoras de  $H_2$  denominadas bacterias obligadas productoras de protones (proceso 3 y 4 del punto 2.2) Estas bacterias por razones termodinámicas pueden vivir solamente en sintrofia no en simbiosis con bacterias hidrogenotróficas (66).

Con relación a la influencia que puede tener la forma en que están los ácidos en el medio donde se efectúa la digestión, ha sido planteado que el agente inhibitorio, es la fracción no ionizada de los ácidos volátiles. De acuerdo con este criterio, la disyuntiva planteada por innumerables investigadores con

respecto a si el factor inhibitorio de la digestión es el pH o la concentración de ácidos volátiles, queda resuelta, ya que la concentración de ácidos volátiles en forma no ionizada es una función del pH y de la concentración total de estos ácidos, o lo que es lo mismo, que ambos parámetros influyen en el proceso. Esta conclusión también fue planteada por Reid (1932), Cowles (1941), Rahn (1945), etc. La hipótesis más aceptada es que la membrana celular es mucho más permeable a la molécula no ionizada (Neal y col. 1965).

Cualquier factor que afecte a la permeabilidad de la célula, tal como la composición iónica del medio, podría por lo tanto influir también en la inhibición por ácidos volátiles. Se ha sugerido en diversas ocasiones que la concentración de ácidos volátiles puede ser utilizada como medida de control del proceso anaeróbico, ya que este parámetro indica los productos intermedios producidos en éste. Cuando se ha alcanzado una condición estable del proceso, cualquier variación de los ácidos puede ser interpretada como un cambio en el equilibrio entre las bacterias ácidas y las metánicas. Como ejemplo de esto podemos citar que en estudios realizados sobre digestión mesofílica y termofílica, pudo determinarse que, en general, la digestión en el rango mesofílico era menos eficiente, y se notó por otra parte un incremento mayor en los ácidos volátiles que lo ocurrido en el rango termofílico (67).

El proceso de digestión anaeróbica puede retardarse o detenerse si la etapa ácida se acentúa, lo cual ocurre cuando existe una elevada concentración de ácidos volátiles. Muchos especialistas consideran que la concentración de ácidos volátiles en un

digestor no debe sobrepasar de 2,000 mg por litro; pero en algunos casos puede llegar a 3,000 mg por litro. Se plantea que una concentración de 300 mg por litro en el digestor puede considerarse excelente para el proceso. Sin embargo, existen evidencias de que las concentraciones de estos ácidos, inhibitorias de la digestión, dependen en gran medida del tipo de ácido presente en la misma, es decir, si está ionizado o no y hasta qué grado, etc (67).

Schulze y Raju (1958) reportaron que la concentración total de ácidos grasos volátiles en el digestor que contenían más de 2000 a 3000 ppm fueron inhibitorias para la digestión de lodos municipales. En más recientes trabajos con desperdicios animales, Varel *et al.* (1977) sugieren que las concentraciones totales de ácidos grasos menores de 2,000 mg por litro no inhiben la producción de metano. Hill *et al.* (1987) usaron sólo los niveles de ácido acético para predecir una amenaza de falla, plantearon que cuando el ácido acético es igual o mayor a 800 mg por litro, el fallo es inminente. Otra tendencia en la concentración de ácidos grasos volátiles es que también son de gran utilidad para los reportes. Recientemente, una combinación entre la relación de la concentración de ácido acético y propiónico ha sido propuesta por Nordestedt y Thomas (1985) la proporción en la concentración de ácido acético y ácido propiónico (A/P) fue sugerida como un indicador del aprovechamiento y/o presencia de problemas en la digestión (40).

En experimentos realizados por Hill y Holmberg (1988) sugieren que para monitorear la "salud" del digestor se puede utilizar por ejemplo: Cantidades mayores a 2,000 mg por litro del total

de AGV; la relación entre el ácido acético y el ácido propiónico debe ser de 4:1 (A/P); cantidades mayores de 800mg de ácido acético, son efectivos métodos para determinar fallas en el sistema. Las concentraciones de AGV de cadenas largas son usadas para monitorear el estres y las fallas, particularmente las iso-formas de los ácidos butírico y valérico.

Concentraciones menores de 5 mg/l de ácido iso-butírico e iso-valérico indican ausencia o mínimo estres en el digestor; cantidades de entre 5 y 15 mg/l de éstos ácidos indican un incremento en la cantidad de estres y una aproximación a fallas. Cantidades mayores de 15 mg/l de dichos ácidos indican la presencia de fallas en el sistema (41).

Concentraciones de todos los ácidos grasos volátiles mayores a 2,000 mg/litro también pueden inhibir la producción bacteriana de metano. Aunque la limitada producción de metano ha sido medida en suspensiones de cerdos que contienen de 4,000 a 5,000 mg/litro.

Las concentraciones totales de ácidos grasos volátiles son registradas en la mayoría de las suspensiones, si se aplican directamente a la germinación de semillas o a plantas jóvenes, reducen la germinación y el crecimiento de las plantas. Este efecto en el crecimiento de las plantas es cuando la suspensión es aplicada en el suelo. Esto depende del grado de dilución de la suspensión, la tasa de aplicación y el lapso en que los ácidos grasos volátiles puedan persistir en el suelo. Estos resultados sugieren que un periodo breve de aireación durante el almacenaje debería ser adecuado para retirar permanentemente los A.G.V. de la suspensión de cerdos. El pH de la suspensión

fue aumentado pasando aire o nitrógeno a través del tanque y disminuyó añadiendo glucosa (14).

En algunas ocasiones en que se digieren lodos de alto contenido de carbohidrato y/o alcoholes, se producen condiciones ácidas, y en otras oportunidades, por sobrecargas en el digestor, disminución de temperatura, trastornos mecánicos o de otro tipo, u otros factores que llevan el digestor al estado de acidez, se hace añadir álcali al proceso para balancearlo química y biológicamente (67).

## 2.7 Subproductos de la digestión anaerobia y usos.

El líquido resultante de una digestión ya sea aerobia o anaerobia tiene una variedad de usos como:

- \* Fertilizante en forma directa
- \* Recirculación a las instalaciones para propósito de limpieza
- \* Medio de crecimiento para peces con bajas necesidades de oxígeno, por ejemplo: Tilapia
- \* Medio de cultivo para el crecimiento de algas, bacterias, levaduras de las cuales se cosechan mas tarde, se secan e incluyen dentro de la ración para los animales.
- \* Utilizan de nuevo dentro de las instalaciones para proveer de revolcaderos en climas calidos
- \* Emplearlos otra vez para proveer parte del agua de bebida requerida y también como fuente de nutrientes
- \* Además los componentes sólidos después de la digestión se han utilizado como fuente de nutrientes para rumiantes y cerdos.

- \* Como medio de crecimiento de pupas de moscas y gusanos de tierra los cuales después de un tratamiento son usados como fuente de proteína. (28)

## 2.8 Biotratamiento con microalgas.

Es conveniente enfatizar que el estiércol animal constituye una excelente fuente de nutrientes para el desarrollo microbiano y que son susceptibles de servir como sustrato para procesos fermentativos, útiles en su purificación o enriquecimiento protéico. En los últimos años se ha despertado el interés en el empleo de los residuos de porcinos para el desarrollo heterotrófico de microalgas en la producción de biomasa que puede ser utilizada directamente como alimento animal (32). La selección de microalgas para su propagación en residuos predigeridos de porcinos, constituye una alternativa para la producción de diversos productos (proteína, grasas, polisacáridos, etc.) que es objeto de estudio en diversos países (11).

Uno de los tratamientos terciarios de los desperdicios de cerdos es el uso de la aireación del efluente, para el crecimiento de microalgas en una digestión anaeróbica, esto puede ser usado para la alimentación de cerdos, y permitir el regreso de alguno valor económico. La calidad del efluente final ha sido reportado como bueno (16).

Muchas de las primeras investigaciones en el uso de algas, las ocuparon para el tratamiento de aguas sucias y para la clarificación del agua; las algas sirven como una fuente de oxígeno para la digestión aeróbica de la materia orgánica. La

proteína de las algas fue un producto del sistema. Los primeros experimentos de Ludwing et al. (1950-51) y Gotaas et al. (1951) establecieron muchos de los criterios para la tasa de lodos de las lagunas, requerimientos fotosintéticos, características de crecimiento y otros parámetros técnicos necesarios para el uso de las algas en el tratamiento de aguas sucias.

Comunmente, dos tratamientos de utilización de algas para el tratamiento de desperdicios de animales han sido investigados. El primero por Dugan et al. Un diagrama esquemático se muestra en la figura 3. El estiércol de las jaulas de las aves es llevado a los tanques de sedimentación, el sobrenadante de este tanque es bombeado directamente al estanque de las algas, y el sedimento es bombeado al digester anaeróbico para la producción de metano.

La generación de metano de este sistema es utilizado como una fuente de energía para calentar el digester. Algunos excedentes de metano son almacenados para futuros usos. El sobrenadante de la digestión anaeróbica es bombeado al estanque de las algas. Posteriormente las algas se separan, el agua es reciclada a través del sistema.

Un diagrama esquemático de un sistema común existente, examinado en la Universidad de Oregon por Miner et al. (1975) se muestra en la figura 4. Este sistema es similar en concepto al designado por Dugan, excepto que éste utiliza desperdicios de cerdos. La principal diferencia entre los dos sistemas es el tramo de cilindro rotatorio usado para la separación de sólidos y líquidos, en éste se suministran alrededor de 16 kg de

sólidos volátiles por día. Doce estanques con una superficie de 2 m<sup>2</sup> cada uno, fueron usados para este sistema. Algunos estudios preliminares en el crecimiento de algas ha sido conducido por alrededor de períodos de un año, las producciones proyectadas fueron las siguientes:

- 1) Materia seca = 121.5 toneladas métricas/ha/año.
- 2) Proteína cruda, 55 ton/m/ha/año
- 3) El sistema de estanques de algas redujo el 90% del total del nitrógeno contenido en el desperdicio de cerdos.
- 4) Se estimó que el nitrógeno perdido por las algas fue alrededor del 20 a 40% (12).

Estos resultados ciertamente sugieren que la proteína de las algas producida de los desechos de cerdos es comparable con otra fuente de proteína de alga y algunas fuentes convencionales de proteínas. Como se puede esperar, las algas son usadas mejor por los animales rumiantes que por los animales no rumiantes.

Priestley (1976), describe las ventajas de un sistema de producción de algas se pueden enumerar como sigue:

- 1) Los productos de desecho que se utilizan para la producción de algas, requieren poco o ningún procesamiento antes de su uso.
- 2) Las algas tienen esencialmente los mismos aminoácidos que la proteína celular microbiana, pero substancialmente el contenido de ácidos nucleicos es inferior.
- 3) El capital invertido requerido para la producción del sistema es más bajo que para otros sistemas de producción de proteína celular microbiana.

Algunos de los problemas encontrados en la producción de algas que pueden limitar la aplicación mundial son:

- 1) Separar el producto del medio de cultivo
- 2) Limitantes climáticas y topográficas para la localización y funcionamiento de los estanques.
- 3) Grandes cantidades de espacio son requeridos para los estanques donde se procesaran grandes cantidades de desperdicios.
- 4) El alto capital invertido para establecer el sistema (12).

Diferentes sistemas de bioreactores para el cultivo de algas ha sido descrito. El cultivo de algas en vasijas abiertas encontró varias dificultades. Uno de los mayores problemas es el mantenimiento de la alga introducida como única especie cultivada (Azov *et al.* 1980). El reemplazo de la alga introducida por otra autóctona de propiedades inferiores respecto a la eficiencia de los nutrientes, tasa de crecimiento, composición química, etc. puede guiar a un proceso que no sea económicamente aceptado (16).

## CAPITULO 3

## PRODUCCION DE BIOGAS

Los desechos de los cerdos contienen casi 10% de materia seca del cual 70% es biodegradable. La degradación de este material bajo condiciones anaeróbicas da como primer resultado ácidos orgánicos seguidos de una mezcla de gases (biogas) que por lo general contiene 50 a 60% de metano, 40 a 50% de bióxido de carbono y casi 1% de sulfuro de hidrógeno además de otros gases traça (28).

La formación biológica del metano es el resultado de un tipo específico de bacterias que producen energía en su metabolismo (102). Las bacterias metanogénicas representan organismos de un único grupo filogenético (8).

Las plantas de biogas para producir energía no constituyen ninguna novedad. En los países asiáticos esta tecnología ha sido explotada con éxito durante varias generaciones (45).

Varias instituciones en la India han fabricado diferentes tipos de plantas de biogas, resultando en la instalación de alrededor de 100,000 plantas. Alrededor de 7 millones de plantas de biogas han sido construidas en China. En Tailandia digestores con aros de bambú fueron designados para áreas rurales (Tentscher, 1987), mientras que en Korea desarrollaron un digestor de bajo costo, consiste en un tanque hecho con ladrillos y mortero cubierto con hojas de PVC desmontable (NAS, 1981). En Taiwan un digestor simple con el tanque del digestor semienterrado y un recubrimiento interno de plástico, el gas se almacenó en bolsas de plástico (Anon., 1981). En contraste, muchas de las plantas

de biogas instaladas en países desarrollados son grandes unidades, algunas con temperaturas termofílicas (55° C) que incrementan la producción de gas, mismo que se usa en la combustión de máquinas para generar energía mecánica y eléctrica (Brand, 1981).

Muchas granjas en Estados Unidos y Europa han construido plantas de biogas operando con estiércol de vacas, pollos y cerdos (Martin, 1979). A través de extensivos estudios que han sido corridos en otros países para incrementar la producción de biogas, reduciendo los tiempos de retención y los costos de construcción, la información disponible desarrollada por estos países es muy limitada (70).

### 3.1 Que es el biogas.

El biogas es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano y el bióxido de carbono, el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos (59). Cuando esta mezcla de gases se produce en forma natural, se le llama "gas de los pantanos", fue descubierto y reportado por Shirley en 1667 y es responsable de los llamados "fuegos fatuos". Volta fue el primero en reconocer una relación entre el gas de los pantanos y la vegetación en descomposición en el fondo de los lagos.

En la naturaleza se encuentra una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales se puede obtener biogas, entre ellos se encuentra: los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, excretas humanas,

residuos vegetales como pajas, pastos y hojas secas, y basuras domésticas. La composición de biogas depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. En promedio su composición es la siguiente:

** Metano	(CH <sub>4</sub> )	54-70 %
** Bióxido de carbono	(CO <sub>2</sub> )	27-45 %
** Hidrógeno	(H <sub>2</sub> )	1-10 %
** Nitrógeno	(N <sub>2</sub> )	0.5-03 %
** Acido sulfhidrico	(H <sub>2</sub> S)	0.1 %

(59).

### 3.2 - Como se produce el biogas.

La formación de biogas (metano) es un fenómeno biológico que se atribuye a un pequeño grupo de bacterias. Su formación en la naturaleza es común y se efectúa anaeróticamente donde existe materia orgánica en descomposición, que se hidroliza por enzimas extracelulares hasta llegar a obtenerse compuestos sencillos como acetato, metanol, CO<sub>2</sub> o hidrógeno que son los sustratos preferidos por las bacterias metanogénicas.

Las bacterias responsables de los procesos de la digestión; son las bacterias facultativas y las bacterias anaeróbicas estrictas. Las "formadoras de ácidos" son predominantemente bacterias facultativas, con unas cuantas bacterias anaeróbicas estrictas. Las bacterias productoras de ácido que predominan son varias especies de Bacteroides, Clostridium, Escherichia, Lactobacillus, Staphilococcus, Streptococcus, Peptostreptococcus. (42,44).

Estas bacterias formadoras de ácido prosperan en un amplio

rango de condiciones ambientales, mientras que las productoras de metano son bastante sensibles y pueden dejar de crecer bajo circunstancias a las que son fácilmente adaptables las primeras.

Por esta razón la segunda etapa es la que regula la tasa de digestión del desecho. En un ambiente donde se inhibe el crecimiento de las bacterias del metano, debido a condiciones adversas, los ácidos orgánicos se acumulan y reducen el pH a un nivel donde casi toda la actividad bacteriana se interrumpe. El crecimiento de estas bacterias se inhibe con valores de pH menores de 6.8 y mayores de 7.2 (23, 65) y en concentraciones de ácidos orgánicos mayores de 2,000 mg/l, expresados como ácido acético. Las bacterias formadoras de metano pertenecen a la familia Methanobacteriaceae, sus células son en forma bacilar o cocoide, móviles e inmóviles, gram positivas o gram negativas, son microorganismos anaeróbicos muy estrictos que obtienen energía para su crecimiento, por medio de la formación de metano, por la reducción del  $\text{CO}_2$  utilizando electrones generados en la oxidación de compuestos tales como el hidrógeno o por medio de la fermentación de compuestos tales como el acetato y el metanol con la formación de metano y  $\text{CO}_2$  como productos. Estas bacterias son un grupo fisiológico altamente especializado que no utiliza carbohidratos o materiales proteínicos de otros compuestos orgánicos, con excepción de los mencionados anteriormente como fuente de energía. Cada especie sólo puede atacar a un grupo restringido de compuestos, siendo necesaria la presencia de varias especies para estabilizar completamente el desecho. Debido a su alto grado de especia-

lización en relación con sus posibles fuentes de energía, sus requerimientos para el crecimiento en condiciones anaerobias muy estrictas, estas bacterias son muy difíciles de aislar (65).

### 3.3 - Características y tipos de una planta de biogas.

En vista de que no hay digestores prototipo disponibles en el mercado, los granjeros y sus consultores tienen que diseñar sus propios sistemas para producir metano.

La mayor fuente de problemas en la producción de biogas son los aspectos mecánicos del manejo del estiércol (molido, mezclado, tamizado y bombeo) y los problemas de plomería en general (escape de gas, corrosión de las tuberías y válvulas), y no los procesos químicos y bioquímicos. Pero estos problemas pueden superarse con un funcionamiento adecuado y el diseño de un ingeniero competente.

Los digestores anaeróbicos consisten generalmente en tanques de concreto y/o acero, (93) también pueden ser de goma, plástico y fibra de vidrio, (50) o en su defecto con materiales de la región; envueltos con un aislamiento pesado o tratados para retener el calor (93). Un contenedor hermético que tiene como función almacenar el biogas producido; las dos partes pueden estar juntas o separadas y el tanque de almacenamiento puede ser rígido o flotante. La carga del sistema puede ser por gravedad o por bombeo. El procesamiento de desechos en el digestor permite generar biogas y como residuo del proceso se tiene un excelente abono orgánico que lleva el nombre de bioabono (59).

### Características del digestor

Para que un digestor de desechos orgánicos opere en forma correcta, deberá reunir las siguientes características :

- a) Ser hermético a fin de evitar la entrada de aire, el que interfiere con el proceso, y fugas del biogas producido.
- b) Estar térmicamente aislado para evitar cambios bruscos de temperatura, lo que usualmente se consigue construyéndolos enterrados.
- c) Aun no siendo un recipiente de alta presión, el contenido primario de gas deberá contar con una válvula de seguridad.
- d) Deberá contar con medios para efectuar la carga y descarga del sistema.
- e) Los digestores deberán tener acceso para su mantenimiento.
- f) Se deberá contar con un medio para romper las natas que se forman (59).
- g) Facilidad para conducción del gas al lugar de uso (45).

### Tipos de Digestores

Resulta interesante clasificar a los digestores, según su modo de operación en los siguientes tipos:

- De lote (régimen estacionario o "batch").

Un digestor de este tipo es el diseño OLADE-Guatemala (Figura 5)

- De régimen semi-continuo.

Este es el tipo de digestores más usados en el medio rural, son sistemas pequeños para uso doméstico. Los diseños más populares son el hindú y el chino. (Figura 6,7)

- Horizontal de desplazamiento.

Generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados. semejando un canal, con relaciones de largo a ancho de 5 a 1 hasta 8 a 1 y sección transversal circular, cuadrada o en "V". (Figura 8)

- De régimen continuo.

En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control (59).

- Otros (figura 9 y 10)

Otro sistema que se encuentra en desarrollo son los digestores de etapas múltiples, diseñados para aislar grupos de bacterias en cámaras separadas, cada una de las cuales trabaja en condiciones óptimas para el desarrollo del tipo de microorganismos que contienen.

Además, existen numerosos tamaños, formas y configuraciones posibles para los tanques. Algunos de los más comunes son: verticales, por debajo y por encima del suelo; horizontales, por debajo y encima del suelo, entre otras (50).

Esto dependerá de las preferencias del usuario y de las facilidades que tengan para su construcción. Sin embargo, desde el punto de vista físico y del proceso no se recomienda emplear tanques rectangulares: Requieren mayor cantidad de materiales de construcción que crean dentro de la masa en digestión zonas de diferente composición y temperatura que impiden obtener el mayor provecho del sistema (59).

### 3.4 - Efectos de la temperatura y concentraciones en la producción de biogas.

Las metanobacterias son de lento crecimiento y muy delicadas, estas son fácilmente inhibidas por muchos factores ambientales. Los digestores de metano usados para el tratamiento de desperdicios industriales y municipales esta cuidadosamente controlados con respecto a la proporción de carga, temperatura y pH. Las condiciones ambientales requieren las metanobacterias, estar en un pH dentro de un rango de 6.8 a 7.2 para su óptimo crecimiento (McCarty, 1964). Concentraciones de amoníaco excedidas de 1,500 mg por litro inhiben este crecimiento y niveles mayores a 3,000 mg por litro producen aguda toxicidad (McCarty, 1964). Además, la mayoría de los metano-digestores municipales y comerciales son operados a una temperatura mesofílica (30 a 40 °C) o termofílica (50 a 60 °C) rango en que mejora la actividad metabólica de las metanobacterias. La tasa de carga orgánica también tiene que estar controlada cuidadosamente o el crecimiento relativamente rápido de bacterias fermentativas producirá un exceso de ácidos orgánicos. Una sobreproducción de ácidos orgánicos como productos finales pueden disminuir el pH debajo del rango óptimo e inhibir la metanogénesis.

En las estructuras de almacenamiento del estiércol de cerdo, ninguno de estos factores esta controlados. Resultados de trabajos previos, indican que excesivas concentraciones de amoníaco fueron el mayor inhibidor para la producción de metano en estiércol de cerdo almacenado (23).

### 3.5 Efectos de desinfectantes y antibióticos

El uso de desinfectantes y antibióticos puede alterar el tratamiento de digestión anaerobia de los desperdicios de cerdos. La limpieza y desinfección de las zahúrdas ocurre normalmente 2 veces al año y es, dependiendo de la rutina de la granja, completa con limpiezas intermedias. Además la adición de antibióticos al agua de bebida durante varios días, para combatir enfermedades bacterianas infecciosas, es una práctica común en las granjas de cerdos. En algunos experimentos realizados por Poels *et al.* (1984) donde se evalúa la influencia de algunos desinfectantes y antibióticos en la fermentación de metano con desperdicios de cerdos en digestores a escala de laboratorio. Cuatro desinfectantes y seis antibióticos fueron seleccionados de los agentes antimicrobianos aplicados más frecuentemente. Estos agentes se muestran en el cuadro 15. Algunos resultados que se obtuvieron en estos experimentos son los siguientes: El experimento fue iniciado con fermentadores en estados fijos, teniendo una reducción del 95% de A.G.V. en menos de 3 semanas. Todos los desinfectantes evaluados no tuvieron efectos inhibitorios en la digestión de metano cuando se aplicaron a dosis normales. Para los desinfectantes Tego 51 y NaOCl, la 2ª dosis no tuvo consecuencias negativas. La producción de biogas fue inhibida, con 50% y 100% de Creolina y Dettol respectivamente. La disminución fue inmediata con el Dettol, mientras que la máxima disminución en la producción de gas con la Creolina ocurrió sólo después de 6 días. El contenido de metano de el biogas disminuyó de 72% a 62%.

Junto con la disminución en la producción de gas, la Creolina causó un incremento alto de A.G.V. de 310 mg/litro a 4,250 mg/litro y un incremento en la DQO de 6,150 mg/litro a 9,800 mg/litro. En un experimento subsecuente, el Dettol fue evaluado a la mitad de la 2ª dosis. Inmediatamente, se notó una disminución en la producción de biogas del 50%. Además, esta disminución continuó hasta que fue producida completamente la fermentación ácida. La examinación microscópica mostró que las bacterias fluorescentes disminuyeron proporcionalmente a la producción del biogas.

En los experimentos con antibióticos, 3 dosis fueron examinadas sucesivamente (cuadro 15). La digestión no tuvo alteraciones con los siguientes antibióticos: Clortetraciclina, tylosina, eritromicina y cloranfenicol. Por otro lado, la aplicación de la 3ª dosis de bacitracina y virginiamicina dieron una alta disminución en la producción de biogas. Sólo después de 2 días una disminución del 49% para la virginiamicina y 19% para la bacitracina fueron registradas. Con referencia de el control, la cantidad máxima de inhibición de 87% para la virginiamicina después de 4 días y 86% para la bacitracina después de 6 días. En estos experimentos, la disminución en la producción de gas fue junto con un incremento en los A.G.V. y en la DQO. El contenido de A.G.V. se elevó de 1,130 mg/litro a 4,750 mg/litro y de 670 mg/litro a 7,400 mg/litro para la bacitracina. Acumulándose ácido butírico. Los valores de la DQO se incrementaron de 6,100 mg/litro y 8,600 mg/litro a 16,400 mg/litro y 17,100 mg/litro para la bacitracina y la virginiamicina respectivamente. El examen microscópico de

nuevo mostró una reducción concomitante en las especies microbianas fluorescente. Estos experimentos confirman que la aplicación de agentes antimicrobianos, tales como los desinfectantes y antibióticos, pueden inhibir la digestión de los desechos de cerdos. Para los desinfectantes, las dosis usadas normalmente en la práctica no influyeron en la producción del biogas. Esto está de acuerdo con los resultados de Pearson *et al.* (1980) quien establece que 500 mg/litro de fenol puede disminuir la actividad metanogénica en un 50%. Purser *et al.* (1965), O'Connor *et al.* (1970), Fuller & Jonhson (1981), Varel & Hashimoto (1981) y Hilpert *et al.* (1982) han reportado acumulación de ácido propionico y una disminución en la producción de gas después de la aplicación de antibióticos en los digestores de metano. Sin embargo, dosis altas de desinfectantes que contienen fenoles, tuvo efectos inhibitorios en la fermentación de metano (74). Los resultados de éste estudio dan más información específica en las concentraciones críticas de estos compuestos para el tratamiento de digestión de estiércol de cerdos.

Podemos concluir que, cuando los antibióticos y los desinfectantes son usados en las granjas de cerdos en dosis "normales", no hay influencia nociva en la producción de gas. Sin embargo, es aconsejable que el uso de estos agentes antimicrobianos tengan un riesgo potencial disminuido, particularmente cuando las aplicaciones son necesariamente repetidas. A este respecto los desinfectantes Tego 51 y NaOCl, y los antibióticos, Clortetraciclina, tylosina, eritromicina, y cloranfenicol presentan bajo riesgo (74).

### 3.6 Como se puede optimizar la producción de biogas

El proceso de la metanogénesis tradicionalmente ha sido observada en dos etapas: la formación de ácidos y la formación de metano. Sin embargo, recientemente han sido propuestas cuatro etapas como se muestra en la figura 2.

Varios factores tiene que estar dentro de los rangos apropiados para que la producción de metano ocurra satisfactoriamente. Estos incluyen: pH, temperatura, relación carbono-nitrógeno, tiempo de retención y tasa de lodos.

La temperatura puede estimular las bacterias mesofílicas o termofílicas. La operación mesofílica es más común en digestores de granjas que los termofílicos debido al calor y aislamiento adicional que requieren para mantener la temperatura (50). El análisis económico de la fermentación anaeróbica de los desechos de animales, muestra que para que sea factible económicamente deben ocurrir numerosas producciones razonables, las plantas fermentadoras de metano se deben diseñar por el peso de los lodos y por los tiempos relativamente cortos de retención (Hashimoto & Chen 1981, Hill 1982) (36). La producción de metano comunmente se expresa en los término de litro de metano producido por litros del digester o por litros de metano producido por kilogramos de sólidos volátiles añadidos (27). Para la digestión mesofílica del estiércol de cerdo, Hill (1982) recomienda una tasa de lodos orgánicos de  $4.91 \text{ kg SV/m}^3/\text{día}$  y un tiempo de retención ( $\sigma$ ) de 11.5 días. Fisher *et al.* ha usado valores de  $4.0 \text{ kg de SV/m}^3/\text{día}$  y  $\sigma = 15$  días. Las plantas de digestión deben ser diseñadas usando un estado constante para plantear los parámetros; por ejemplo:

lodos orgánicos constantes, retención de tiempo y temperatura, esto se asume en el diseño de una planta. Las condiciones operacionales existentes impuestas en la planta, sin embargo, estan lejos de las constantes operacionales (Sievers *et al.* 1978; Hill & Price 1983). Cuando los sistemas estan planeados usando tasas bajas de lodos ( $2-3 \text{ kg SV/m}^3/\text{día}$ ) y tiempos de retención relativamente largos ( $>15$  días), el sistema no esta esforzándose apropiadamente durante el ciclo del proceso (38). Por otro lado, Summers y Bousfield mostraron que la producción de gas fue marginalmente mejor a 10 días de tiempo de retención que a 7 días, pero alejados de los 5 y 3 días de retención. Igualmente reducciones en la D.B.O., D.Q.O., S.T. y A.G.V. fueron menores que en los tiempos de retención cortos; a los 3 días de retención la concentración de A.G.V. en el digestor, comenzó a tener un incremento al punto de que pudo haber ocurrido un transtorno. El porcentaje de metano en la disminución de gas se debió a los bajos tiempos de retención (Cuadro 16 y 17) (87).

### 3.7- Diseño de plantas de biogas

El diseño del digestor anaeróbico se basa en varios parámetros. Las características del estiércol más importantes son: contenido carbón-nitrógeno, biodegradabilidad, rendimiento último de metano y proporción específica de producción de gas. Estas dependen del tipo de dieta, de la especie animal, de la edad del estiércol y del manejo del mismo. Un segundo factor importante es el tiempo de retención hidráulica. Mientras más tiempo esté el estiércol en el digestor, se necesita mayor

volumen de estiércol en éste. La producción de gas ocurre rápidamente al principio pero comienza a disminuir después de 10-15 días. Un diseño correcto incluye la selección del punto de equilibrio entre la producción de gas y el costo de construcción del digestor. Para los sistemas mesofílicos, se emplearán tiempos de retención de 12-18 días.

Para los sistemas termofílicos se escogen, generalmente tiempos de retención de 5-6 días. Un tercer factor de diseño es la concentración de la pasta espesa de desperdicios, la cual determina el tamaño, desempeño y costo del digestor. Para reducir el tamaño, las concentraciones deben ser lo más altas posibles sin que se produzcan problemas de mezclado o de inhibición de bacterias. Las concentraciones deseables del total de sólidos (cenizas más materia orgánica) son de 5-12 por ciento del total de sólidos. Las concentraciones se especifican, frecuentemente, en términos de sólidos volátiles (sólidos orgánicos) ya que la fracción de ceniza no puede ser digerida. La concentración óptima para los digestores termofílicos es de 8 por ciento de sólidos volátiles (SV) mientras que el rango para digestores mesofílicos es de 7-8 por ciento de SV. Un cuarto factor es el índice de carga, el cual se especifica, generalmente, en términos del peso de los sólidos volátiles agregados al digestor diariamente por  $m^3$  del digestor. Las proporciones típicas de carga de sólidos volátiles son de 0.0908 Kg o 1.136Kg (0.2-0.3lb) por día por  $0.0284 m^3$  (pie cúbico) para los digestores mesofílicos y 0.454 Kg (1 lbs) de sólidos volátiles por  $0.0284 m^3$  (pie cúbico) para los digestores termofílicos (93).

En el cuadro 18 aparecen los tamaños aproximados de los digestores anaerobios para granjas de diferentes dimensiones. Estos cálculos se basan en las disposiciones de diseño señaladas anteriormente.

El gas producido por el digestor se almacena con el fin de tener disponible una cantidad suficiente en el momento en que se requiera. Se puede utilizar cualquier recipiente hermético (neumáticos de carro, bolsas plásticas selladas, otros similares) separados del digestor. Otros sistemas colocan el almacenamiento directamente sobre la boca del digestor. En estos casos es conveniente utilizar campanas flotantes metálicas que permiten disponer del gas a una presión constante. (Uno de estos sistemas está indicado en la figura 11)(93). La línea de conducción está esquematizada en la figura 12. Para una instalación típica, sus dimensiones dependen :

- a) Del flujo de gas que se desea transportar y,
  - b) De la distancia existente entre la planta y el lugar de uso.
- Estas dos variables se utilizan con la ayuda de la cuadro 20 para fijar el diámetro de tubería adecuada a los deseos del consumidor y a las características del diseño. Por ejemplo, en el caso de que el biodigestor se encontrara emplazado a 50 m de la cocina, y el propietario deseara transportar 16 pies cúbicos/ hora, se recomendaría utilizar tubería de 3/4" para los primeros 25 m del recorrido, y tubería de 1/2" para los 25m restantes.

Vale la pena mencionar que las plantas de biogas utilizan casi siempre manguera de PVC, debido a que este material no es afectado por la acción del ácido sulfhídrico. La manguera de

PVC. irá preferiblemente enterrada o recubierta para evitar el deterioro (cristalización) por la luz solar. De lo contrario, se colocará elevada para evitar daños físicos causados por personas o animales.

#### **Valvulas**

Se utilizan mínimo dos válvulas para gas ( Figura 13) la primera o principal irá instalada inmediatamente después del gasómetro, al comienzo de la conducción y sobre el niple de salida. La segunda se monta al final de la línea, en el lugar de uso. Estas válvulas, cuyo tamaño debe ser compatible con el diámetro de la tubería, deberán estar construidas en acero inoxidable o en PVC para evitar la corrosión por el ácido sulfhídrico.

#### **Trampas**

El gas debe ser purificado antes del uso. La purificación, en los casos en que el uso se reduce a calefacción, alumbrado o cocción de alimentos, tiene por objeto eliminar o disminuir el contenido de ácido sulfhídrico para proteger de la corrosión los equipos, y a la reducción del contenido de agua presente en el gas como resultado del proceso de digestión. La figura 14 da una idea aproximada de los accesorios requeridos para utilizar estas operaciones y de su colocación en la línea.

##### **A) Trampas de ácido sulfhídrico**

Están constituidas por un recipiente relleno con material de hierro finamente dividido formando un lecho poroso a través del cual debe circular el gas para que reaccione con el metal y se deposite en el lecho. La condición de porosidad se alcanza utilizando como relleno virutas de hierro o esponjillas de

cocina de marca comercial. Estos materiales tienen la ventaja de ser de bajo costo y de oponer poca resistencia al flujo de gas, aspecto importante en razón de las bajas presiones que se manejan en este tipo de sistemas. La forma del recipiente y las características del material utilizado para su construcción dependen del gusto del propietario de la planta. El único requisito es de que sean completamente herméticos para evitar fugas de gas. Así, es posible encontrar, en plantas en operación, trampas:

- Rectangulares construidas en hierro o en acero, pintadas con el mismo material empleado en el enlucimiento y protección de la campana.
- Cilíndricas en acero. Estas se construyen a partir de secciones de tubería estándar de 2" o más. Al igual que las anteriores requieren de pintura interior y exterior para protegerlas de la corrosión.
- Cilíndricas en PVC. Se construyen también a partir de tubería estándar, o se arman utilizando accesorios ( en "Y" ) de PVC disponibles en el mercado. No requieren pintura protectora, pero deben en lo posible no exponerse a los rayos del sol.

La trampa de sulfhídrico actúa también como trampa de llama no sólo por la presencia del relleno sino por el mayor diámetro del recipiente con la relación a la línea de conducción.

#### B) Trampas de agua

El agua arrastrada por el gas se separa cuando la corriente encuentra en su trayectoria una expansión brusca y una contracción posterior. Para lograr este propósito será

suficiente instalar sobre la línea un accesorio idéntico a las trampas de sulfhídrico, con la diferencia que no se necesitara el relleno de material de hierro. Las trampas están provistas de un grifo de purga por donde se debe evacuar periódicamente el agua depositada en el fondo(38).

#### Procedimiento

El lugar de instalación debe cumplir varios requisitos:

- No debe estar próximo a corrientes o nacimientos de agua
- La distancia mínima a lugares muy calientes o donde haya una llama debe ser de 30 metros.
- Localizarla cerca al lugar donde se producen los residuos utilizados como materia prima.
- Construirla cerca de los lugares de consumo del gas, para no tener que comprar mucha tubería.
- Ubicarlo en un sitio que reciba el sol durante la mayor parte del día.
- Evitar las zonas con tráfico continuo de personas o animales (45).

En el diseño de un digestor, uno de los puntos más importantes es el cálculo de las dimensiones (ver anexo).

#### 3.8 - Utilización de biogas y bioabono.

El biogas se utiliza para producir energía, y esta energía sirve para:

- Cocinar los alimentos
- Alumbrado
- Calefacción y refrigeración
- Como combustible en máquinas de combustión interna (45) .

Un metro<sup>3</sup> de biogas sustituye a:

- \*\* 0.61 litros de gasolina
- \*\* 0.55 litros de ACPM
- \*\* 0.58 litros de petróleo
- \*\* 0.5 a 1.5 kg de leña
- \*\* 0.74 kg de carbón vegetal
- \*\* 1.43 Kwh de energía eléctrica (45).

Si el biogas se va a quemar directamente, sólo se necesita eliminar las gotas de agua en suspensión que son arrastradas por el gas al salir del digestor, evitando así la obstrucción de las tuberías en las que se maneja el biogas. Una forma de eliminar esta agua es haciendo pasar el gas a través de un separador de líquidos que consiste básicamente en un recipiente que guarda una temperatura más baja que el biogas, para condensar el vapor de agua y atraparlo. Si el gas va a ser usado como combustible en un motor de combustión interna, es necesario eliminar las trazas de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ). La utilización del biogas en equipos comerciales requiere de adaptaciones sencillas para quemarlo eficientemente. En general los quemadores diseñados para gas LP se adaptan utilizando mayores espesas y distintos ajustes de aire primario. Para la adaptación de motores de combustión interna, se puede optar por la modificación del carburador de gasolina o bien usar un carburador especial para gas. En el caso de los motores diesel, lo que se hace es operarlos en forma dual (85% biogas, 15 % diesel), para prevenir daños en los inyectores (59).

El biogas producido en la digestión anaeróbica del estiércol de cerdo es muy apropiado para calentar los edificios de

maternidad y de destete. Esto se usa extensamente en granjas de Taiwan (Koh *et al* 1988) (50). Esto puede ser usado en dos formas, en lamparas infrarrojas o por calentadores de piso. Las primeras se producen comercialmente con boquillas de 1.2 mm, una presión de 10-20 cm de columna de agua y un consumo de alrededor de 300 a 400 litros de biogas por hora y calienta una área de 0.3 m<sup>2</sup>, una lampara grande sólo usa de 500 a 600 litros por hora y calienta 0.4 m<sup>2</sup> (50).

Además de generar gas combustible, la fermentación anaeróbica 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. Su composición varía de acuerdo al desecho utilizado, y en promedio un análisis en base seca es el siguiente:

pH	7.5
Materia orgánica	85.0%
Nitrógeno	2.6%
Fósforo	1.5%
Potasio	1.0%

No posee mal olor, ni contamina, tampoco atrae moscas, puede ser aplicado directamente al campo en forma líquida o bien ser deshidratado y almacenado para usarse posteriormente. Puede servir como materia prima para producir compostas mezclado con rastrojos; también puede utilizarse para cultivos por hidroponía, en los que se proporciona a la planta la humedad y los nutrientes que requiere sin utilizar tierra.

Se puede usar para fertilizar estanques de peces ayudando a formar su alimento. Las principales ventajas del efecto fertilizante de estos lodos radican en lo siguiente:

- Posee mayor cantidad de nitrógeno que la materia prima original en base seca, el que mediante el proceso de digestión se torna más asimilable por las plantas.
- Es un buen material para el mejoramiento de suelos
- A diferencia del estiércol fresco, no posee olores desagradables
- No contiene bacterias patógenas o semillas de malas hierbas, puesto que el proceso de digestión las elimina
- Un metro cúbico de bioabono producido diariamente puede fertilizar más de 2 has. de tierra por año a un nivel de 200 kg N/ha
- El incremento de la producción agrícola por el uso del bioabono puede alcanzar un promedio de 10 a 20% (28).

## CAPITULO 4

## TRATAMIENTO AEROBICO

Las características fisicoquímicas y la cantidad de los residuales producidos en las instalaciones porcinas, determinan que éstos no pueden ser dispuestos sin pasar previamente por un proceso de depuración, con el fin de disminuir sus propiedades contaminantes (68). Uno de estos procesos de depuración es el tratamiento aeróbico, éste tratamiento tiene la desventaja de que se pierde el valor fertilizante de los desechos, pero nos permite la reutilización de los productos para alimentación y lavado. Por otra parte elimina los problemas de mal olor que se presentan en la mayoría de las explotaciones porcinas (29).

## 4.1 Fundamento del tratamiento aerobio.

Las investigaciones de estos últimos años indican que las deyecciones porcinas han dejado de ser un producto de desperdicio que había que eliminar en la forma menos nociva posible y que en la actualidad se las puede utilizar de diversas maneras. El aprovechamiento como fertilizante sigue siendo el más eficaz, pero hay también otras alternativas posibles. Una de estas alternativas es el reciclaje de las deyecciones por fermentación aerobia(35). El tratamiento aeróbico de desperdicios, es un proceso que utiliza bacterias aeróbicas y hongos que requieren moléculas de oxígeno ( $O_2$ ). Este proceso muchas veces es favorecido por microorganismos, en parte porque la alta energía producida la obtienen cuando las moléculas de oxígeno reaccionan con la materia orgánica.

Algunos sistemas utilizan un carbón activado como un aditivo para absorber los desechos orgánicos no biodegradables. (86) El tratamiento aeróbico es un proceso biológico controlado que convierte la materia orgánica sólida biodegradable en una sustancia estable parecida al humus que es apropiada para usarse como acondicionador del suelo y tiene también un valor nutritivo seguro. El composteo es una versión acelerada del proceso de la descomposición natural de restos orgánicos, logrado a través de la provisión de condiciones favorables para los microorganismos (bacterias, actinomyces y hongos). El tratamiento apropiado, efectivamente destruye patógenos y semillas de maleza a través del calor metabólico generado por estos microbios durante el proceso. La temperatura, el contenido de humedad, la relación carbono-nitrógeno, el nivel de pH, la estructura física de los materiales del composteo y la aereación, todos estos factores son pertinentes para la tasa y efectividad del proceso. La aereación es esencial para el calor metabólico generado por los microbios aerobicos. Sin embargo, un exceso en la tasa de suministro de aire podría causar una acumulación de calor más rápida que la conductividad y la ventilación (sensible y latente). Las pérdidas de calor pueden resultar en altas temperaturas perjudiciales para la actividad microbiana. Por otro lado, si las pérdidas de calor deben sobrepasar el calor microbiano producido, la masa del abono puede enfriarse previamente, del modo que sea, una estrategia de ventilación impropia hará el proceso ineficaz. Una revisión de la literatura confirma que las estrategias de la aereación son críticas para el control de la temperatura

durante el proceso (55).

#### 4.2 Aspectos microbiológicos del tratamiento aeróbico.

Los aspectos microbiológicos del tratamiento aeróbico mesófilico han sido estudiados por Blouin, *et al.* (1988), Doyle *et al.* (1986), Paca, J. (1980). El *Acinetobacter sp.* es el microorganismo dominante y éste prevalece en correlación con la rápida reducción de la D.Q.O., el tratamiento aeróbico termofílico ha sido aplicado al tratamiento de aguas de desecho y a los desperdicios de animales. Las ventajas de éste tratamiento han sido incluidas con el propósito de aumentar la tasa de oxidación, resultando en digestores con volúmenes más paqueños, mayor destrucción de bacterias patógenas, virus y parásitos, destrucción de semillas de maleza y mayor facilidad para separar sólidos y líquidos (4).

En el cuadro 22, se muestran las bacterias dominantes identificadas durante el tratamiento aeróbico de desperdicios de cerdos en un reactor aeróbico.

#### 4.3 Aspectos físico-químicos del tratamiento aeróbico.

El tratamiento de las suspensiones de cerdo presenta especiales problemas, el más serio de estos es el alto contenido de materia orgánica (33). Las características típicas de las suspensiones no tratadas de cerdo aparecen en el cuadro 7. La aereación de las suspensiones en reactores modifican las condiciones físicas y químicas, tales como el pH, la D.Q.O., el potencial de Redox. El pH se ajusta regularmente a niveles de 7 a lo largo del tratamiento aeróbico, la D.Q.O. se reduce

alrededor de un 65% en un período de 168 hrs. El potencial de óxido-reducción de la suspensión no tratada es de -305.3 mV y de las tratadas es de -136.7 mV con aereaciones de 24 hr (25,26).

#### 4.4 Biodegradación de la materia orgánica

El tratamiento de los desechos biológicos es designado normalmente para máxima biodegradación de la materia orgánica. El proceso del tratamiento confía en la actividad metabólica de los microorganismos de los desechos de los cerdos. La biodegradación realizada por estos microorganismos está influenciada por la composición de los desperdicios y los parámetros operacionales. Una buena eficiencia del tratamiento puede ser esperada cuando las condiciones ambientales son óptimas para los microorganismos que han sido establecidos. Sin embargo, el estiércol de cerdo tiene una gran cantidad de sólidos suspendidos que resisten la degradación biológica. Harper *et al.* (1984) han demostrado que la tasa de biodegradación es mejorada cuando se remueven estos sólidos. La composición de los desperdicios de cerdo ha mostrado variantes, incluso cuando se toman muestras en diferentes periodos del año dentro de la misma granja ya que tanto la cantidad, como la calidad del substrato y la degradabilidad de éste, influyen en el crecimiento y la actividad de los microorganismos.

En un proceso de tratamiento, el tiempo requerido para la oxidación de la materia orgánica debe ser variado de acuerdo a cada una de las cantidades de desperdicio. De acuerdo con

Garraway (1982) el tratamiento aeróbico ofrece una reducción de la D.Q.O. en el sobrenadante de alrededor del 80%, siempre existe una fracción no biodegradable que es proporcional a la concentración de desperdicios suministrados (Evans *et al.* 1980). La presencia de compuestos potencialmente tóxicos tales como metales pesados también es importante. Otros parámetros tales como la disolución de oxígeno, la temperatura y el pH, son algunos de los factores importantes que afectan el tratamiento. Los hongos juegan un papel muy importante en el agotamiento de los desperdicios animales (Cooney & Emerson, 1964). Blouin *et al.* obtuvieron una degradación más completa de la materia orgánica sobrenadante de los desperdicios, cuando inocularon los desperdicios estabilizados con el hongo Chaetomium cellulolyticum. Este hongo fue escogido desde hace tiempo para producir proteína celular simple a partir del estiércol de cerdo. Se obtuvieron reducciones en la D.Q.O. de alrededor del 50%, sugiriendo que el hongo fue el responsable en parte de la degradación de la materia orgánica que las bacterias nativas no pudieron degradar. La degradación óptima de la materia orgánica de desperdicios de cerdos parece ser limitada por la presencia de sustancias de baja degradación. Sin embargo, está degradación parece ser posible hasta cierto punto manteniendo aumentado el oxígeno disuelto a través del tratamiento biológico e inoculando el desperdicio tratado con otro tipo de microorganismos tales como el hongo Chaetomium cellulolyticum (5).

#### 4.5 Degradación microbiológica de sustancias mal olientes.

El esparcir sobre la tierra y almacenar los desperdicios de cerdos son las principales causas de quejas de los olores agrícolas. Esto es debido principalmente a los cambios observados en los desechos de los cerdos en pisos de rejilla y la consecuente acumulación de heces y orina como una suspensión. La actividad microbiana anaeróbica durante el almacenamiento de las suspensiones, da como resultado la producción de sustancias con olores desagradables (85). Schaefer (1977), ha identificado diferentes cantidades de compuestos volátiles que son componentes de los malos olores de los desperdicios de cerdos. Sin embargo, los principales componentes identificados que estuvieron presentes en los desperdicios bajo diferentes cantidades de aereación incluyen: fenol, p-cresol, ácidos carboxílicos de 2 a 5 carbonos. Los ácidos grasos volátiles y el p-cresol han sido considerados por Spoelstra como los indicadores más apropiados de los olores emanados del estiércol de cerdo (7).

Es muy conocido que la aereación de los desperdicios reduce o elimina los olores como resultado de la actividad microbiana. Ishaque *et al.* (49), han demostrado que el fenol y el p-cresol fueron completamente degradados bajo condiciones aeróbicas por los microorganismos nativos del estiércol de cerdo. La microflora del desperdicio es rápidamente modificada durante la aereación y se convierte en una microflora dominante tratada. Robinson *et al.* (77), han mostrado que el *Acinetobacter spp.* se convirtió en la microflora dominante cuando el desperdicio de cerdo fue tratado aeróbicamente de 20 a 30°C. En posteriores

investigaciones por Bayly *et al.* (1984), mostraron que varios microorganismos degradan los compuestos fenólicos y pertenecen al género Pseudomonas, Acinetobacter, Bacillus y Nocardia. Estos microorganismos han sido aislados de otros diferentes ambientes tales como: aguas de desecho, rios y efluentes industriales. Los microorganismos seleccionados para los desperdicios de cerdos por su capacidad para degradar fenoles fueron: Acinetobacter calcoaceticus, Corynebacterium glutamicum y Micrococcus sp. Ya que los microorganismos nativos de varios desperdicios estan presentes en altas concentraciones y fueron capaces de degradar rápidamente las sustancias malolientes en presencia de oxígeno. Bourque *et al.* (1987) consideran que inoculando masivamente con microorganismos seleccionados se acelerará la degradación de las sustancias olorosas (7). La limitante en estos casos son las cantidades de desperdicio que se tendrían que inocular, ya que a escala de laboratorio se puede realizar, pero a nivel de granja es muy difícil. Probablemente futuros estudios de las características fisicoquímicas de estiércol de cerdo y de las especies de microorganismos de la microflora del estiércol del cerdo, que están implicados en la degradación de sustancias malolientes pueda conducir al desarrollo de un mejor proceso (7).

## CAPITULO 5

## OTRAS ALTERNATIVAS PARA EL USO DE EXCRETAS PORCINAS

La producción de animales domésticos, en general, y la de cerdos en particular, están asociadas a un elevado desperdicio de granos alimenticios que podrían ser aprovechados mediante su consumo humano directo. Esta competencia nutricional entre animales domésticos y los humanos ha sido enfrentada de manera diferente en culturas muy diversas. Algunos casos que podemos mencionar son : la prohibición del consumo de carne de cerdo por cuestiones religiosas y la promoción de las dietas vegetarianas, otra forma de enfrentar el problema es utilizar los desperdicios humanos como materia prima para la nutrición de los cerdos, por ejemplo, la alimentación tradicional de traspatio o el uso de desechos agroindustriales, de la escamocha. Por eso la sustitución de granos por residuos orgánicos es un tema de mucho interés por parte de muchos criadores que desean reducir sus costos de producción en las granjas de países importadores como México. Uno de los aspectos cada vez más estudiados de la alimentación alternativa de los cerdos y de los animales domésticos es la posibilidad de recircular, al menos en forma parcial o indirecta, la proteína fecal de los animales. Esta posibilidad se deriva del hecho muy conocido que los cerdos excretan cerca del 30% del nitrógeno que ingieren y que gran parte de este nitrógeno excretado esta presente en proteína de buena calidad.

En principio, la realimentación total de la proteína fecal a los cerdos, permitiría reducir significativamente las

descargas contaminantes de heces y, al mismo tiempo, contribuiría a la disminución de los costos de alimentación por la sustitución parcial de los concentrados proteínicos en la dieta de estos animales. Sin embargo, hay que reconocer la existencia de límites toxicológicos (99).

Todos los desperdicios animales, incluyendo el del cerdo deberían estar procesados previamente para alimentar animales. La principal razón para el procesamiento del desperdicio es el garantizar la destrucción de organismos patógenos que podrían estar presentes. Si estos desechos son procesados adecuadamente antes de usarlo como alimento, estas bacterias tienen poca oportunidad de presentar riesgos para la salud. La mayoría de los microorganismos incluyen toxinas producidas por hongos y bacterias, esto no es un problema cuando estos desechos son adecuadamente procesados. También, arsenicales, antibióticos y otros medicamentos administrados a los animales pueden ser excretados en las heces de los animales que les dan estas drogas. Los medicamentos que presentan mayor preocupación son aquellos que no son degradados por el animal o por los microorganismos en las heces. La mayor parte de los antibióticos son degradados, por lo tanto se presenta una preocupación relativa a la alimentación animal con desperdicios. Elementos tales como cobre, arsénico y metales pesados, están presentes en las dietas de los animales y son excretados en las heces. El procesamiento de los desechos no destruye estos elementos, por lo tanto, hay preocupación acerca de que estos alcancen niveles críticos en animales alimentados con desperdicios, habiendo dos alternativas a considerar.

La primera evitar la alimentación con desperdicios que contengan niveles elevados de estos minerales y/o alimentar con desperdicios por periodos más cortos de tiempo para prevenir que se refuercen estos elementos en los tejidos de los animales. Si los elementos se eliminan de los tejidos de los animales después de retirar la dieta que los contenían, garantizará la seguridad de que los elementos potencialmente tóxicos no estén presentes en los desperdicios animales para la alimentación animal (Cuadro 23) (18,61). También es necesario reconocer la existencia de limitantes técnicas para la recuperación y recirculación total de las excretas de cerdo por la forma en que éstas son manejadas en la granja. Finalmente es necesario explorar las limitantes económicas para la instalación y operación de sistemas de tratamiento y recirculación de las excretas porcinas.

La selección de la tecnología que mejor corresponda a cada granja dependerá mucho de su localización, topografía, disponibilidad de capital, nivel técnico, tipo de alimentación utilizado, etc. y, por falta de espacio. Desde el punto de vista de la recuperación del valor nutritivo y económico de los efluentes, las alternativas de realimentación de éstos efluentes, utilizándolos como fuentes de proteína son las que teóricamente serían más rentables pero pueden existir múltiples restricciones de tipo sanitario, operativo o incluso de tipo estético que impidan este tipo de soluciones. En el otro extremo, las soluciones más prácticas y elementales son las de riego directo al campo, pero también pueden estar limitadas por muchos factores topográficos y de disponibilidad de medios de

transporte o de conducción de los materiales, de forma que dificulten su aplicación (99).

El procesamiento de excretas animales puede ser benéfico para incrementar la palatabilidad, recuperación de nutrientes, destrucción de patógenos y para controlar olores. Los mayores métodos de procesamiento incluyen: secado (por aire caliente y de forma natural), ensilado, separación de líquidos y sólidos, tratamiento aeróbico de líquidos y el composteo. La siguiente es una breve información de estos métodos.

#### SECADO NATURAL

##### Ventajas:

- La materia seca se incorpora fácilmente a la dieta.
- Los aires contaminantes son bajos
- Los requerimientos de manipulación son pocos.
- Bajo costo de energía para el secado
- La materia seca se almacena en pilas fácilmente.

##### Desventajas:

- Altas pérdidas de nitrógeno (equivalente a proteína).
- Pérdidas relativamente altas de nutrientes energéticos.
- Puede contener patógenos.
- La materia seca frecuentemente contiene pedazos y trozos grandes que requieren pulverización para su subsecuente uso.
- Limitantes por su tasa de secado lento.
- Pérdida de la fracción líquida.

#### SECADO POR AIRE CALIENTE

##### Ventajas:

- Buena aceptación animal.

- La materia seca es fácil de incorporar a la dieta, así como su almacenamiento.
- Muerte de patógenos a altas temperaturas.
- La materia seca está deodorizada.

#### Desventajas:

- Pueden existir aires contaminantes durante el proceso, se requiere de equipo para el control de olores.
- La planta para el proceso (deshidratación) puede ser afectada por la zona y/o por restricciones legales.
- Altos costos de energía para deshidratar.
- Altos costos del equipo.
- Los tiempos y los requerimientos de energía son altos para coleccionar, transportar y deshidratar.

#### ENSILADO

##### Ventajas:

- Incrementa la aceptación del animal.
- Baja pérdida de nutrientes.
- Existen varios sistemas de alimentación adecuados al ensilado.
- Permite su almacenamiento.
- Control de patógenos aproximadamente después de tres semanas de ensilaje.
- Material deodorizado.
- Utilización de la fracción líquida y sólida.

##### Desventajas:

- Frecuentemente la materia diluida se usa en los tiempos del ensilaje.
- Condimentar con forrajes, diluye los materiales.

- El manejo o los requerimientos laborales (recolección, transporte para almacenar, materiales de ensilaje, tiempo de ensilaje, transportar a los lugares de almacenaje, etc.)
- Destreza para almacenar (en depósitos verticales y herméticamente)

#### SEPARACION DE LIQUIDOS-SOLIDOS

##### Ventajas:

- Los sólidos procesados tienen buena aceptación animal.

##### Desventajas:

- Grandes pérdidas de nutrientes en los líquidos que no son utilizados.
- Los sólidos retenidos tienen bajo valor nutritivo.
- Los costos de operación y mantenimiento.
- La gran inversión inicial para el equipo.

#### TRATAMIENTO QUIMICO

##### Ventajas:

- Aumenta la aceptación animal.
- La inmediata recolección y la realimentación reducen las pérdidas.
- No requiere de almacenamiento.
- Materiales deodorizados.
- Los requerimientos laborales y de energía son bajos.
- Utilización de fracciones sólidas y líquidas.

##### Desventajas:

- La recolección y procesamiento deben ser diarios.
- El corto periodo de utilidad no permite su almacenamiento extensivo.
- Requieren de equipo para mezclar.

- Costo de los químicos.

#### TRATAMIENTO AEROBICO EN ZANJAS DE OXIDACION

##### Ventajas:

- Buena aceptación animal.
- Control de patógenos específicos.
- Material deodorizado.
- El sistema puede ser integrado con pisos de rejilla y así eliminar el transporte, almacenaje y manipulación.
- La proteína celular puede ser usada por animales no rumiantes y el Nitrógeno no protéico puede ser utilizado por rumiantes.

##### Desventajas:

- Requiere de alto grado de capacitación para su mantenimiento y constantes monitoreos.
- Altos costos de energía para su operación.

#### COMPOSTEO

##### Ventajas:

- Buena aceptación animal.
- Permite su almacenaje.
- Control de patógenos.
- El material composteado está deodorizado.
- Es relativamente simple.

##### Desventajas:

- La pérdida de nutrientes es grande.
- Altos costos de equipo y maquinaria (1).

### 5.1 Alimentación de borregos

Varios estudios económicos han demostrado, que el aprovechamiento del estiércol animal como ingrediente alimenticio, en la nutrición de varias clases de ruminantes, tiene un valor de 3 a 10 veces superior a que si los nutrientes se utilizaran como fertilizante. El estiércol de los animales son evaluados económicamente más como fuente de proteína que como fuente de energía en dietas balanceadas, pero definitivamente, tanto la energía como la proteína y los minerales, contribuyen al valor total del recurso utilizable (48). La metodología del ensilado, también ha sido utilizada como un método económico para tratar de aprovechar el estiércol animal (Anthony, 1969). Estos pueden ser fermentados con ingredientes alimenticios tradicionales, obteniéndose ensilados de estiércol libres de microorganismos potencialmente patógenos. El ensilaje de estiércol de animales puede también ofrecer ventajas, tales como mejorar la aceptabilidad animal, abatir problemas de contaminación y disminuir los costos de alimentación. La constante necesidad de aumentar la disponibilidad de proteína de origen animal (la de ruminantes entre otras) ha conducido también a la búsqueda de nuevas fuentes de nitrógeno, materia orgánica y minerales para la alimentación animal. La composición química del estiércol de cerdo (Cuadro 4, 5 y 7) especialmente el contenido de nitrógeno, sugiere la posibilidad de utilizarlo en la nutrición de borregos, ya que los microorganismos del rumen pueden utilizar los compuestos de nitrógeno no proteico, degradar los ácidos nucleicos de la proteína unicelular y aprovechar la

fibra. El aprovechamiento del estiércol de cerdo en la nutrición de borregos, bien pudiera contribuir a suministrar por un lado, parte de los nutrimentos necesitados para su dieta, aumentando así y disponiendo continuamente de una fuente de nitrógeno, energía y minerales, y por otro lado, a contar con una buena alternativa de manejo del estiércol de cerdo para abatir los problemas de contaminación que genera la actividad porcícola de una manera económicamente rentable y a la vez disminuir el área requerida para la disposición del estiércol (46).

## 5.2 - Alimentación de cerdos.

La reutilización del excremento del cerdo para la alimentación porcina no ha recibido tanta atención en las investigaciones como la alimentación con deyecciones aviares o las de bovino (Anthony, 1974) para los rumiantes (35). El uso del estiércol como ingrediente en la alimentación ofrece la capacidad de salvar algunos de los nutrientes y para reducir los problemas de contaminación (54).

Diggs *et al.* (1965), han demostrado que las deyecciones porcinas, obtenidas rascándolas de un piso de hormigón y desecándolas, podían emplearse para remplazar a un 15% de la ración típica del cerdo sin que el rendimiento decayera. Pero cuando remplazaban al 30% de la dieta, la eficiencia de conversión del pienso disminuía, a pesar de que Parket *et al.* (1959) observaron que el fósforo de las deyecciones era sumamente asimilable (35).

Orr *et al.* (1973) informaron que las heces recogidas frescas no refuerzan el rendimiento normal cuando reemplazan al 22% de la dieta completa (54).

### 5.3 Alimentación de bovinos.

Las dietas convencionales para cerdos tienen entre un 85 a 88% de digestibilidad; la parte no digestible (del 12 al 15% de la dieta original) sometida a degradación bacteriana en un sistema aerobio, da como resultado una conversión considerable del nitrógeno en proteína bacteriana (28).

La importancia del valor nutritivo de las deyecciones de cualquier especie animal es la cantidad de nitrógeno que contienen y a las diferentes capacidades de los animales para utilizar éste nitrógeno. Los rumiantes pueden utilizar eficazmente el nitrógeno no protéico, inclusive la urea y el ácido úrico (28).

Henning, *et al.* (1972) mostraron que las heces de cerdos incluidas en pellets en dietas de ovinos y bovinos en un 40%, no existieron efectos adversos en su desempeño. Pearce (1975) mostró que una disminución de la digestibilidad de la materia seca en dietas de bovinos incrementando el estiércol seco de cerdo. Vacas alimentadas con dietas que contenían 30 y 50% de excretas semi-sólidas de cerdo, ganaron 1.2 y 1.0 kg diario respectivamente (Flachowsky, 1975).

Berger *et al.* (1981) mostró que el estiércol de cerdo puede ser ensilado con pastos (40 a 60% de estiércol en la mezcla) y con granos de maíz (60% o menos de estiércol de cerdo en la mezcla) (88).

#### 5.4 Crianza artificial de ranas.

Una alternativa interesante al usar el estiércol de cerdo es que este puede ser integrado al ciclo de producción comercial de ranas cuyos productos encuentran una gran demanda en el mercado internacional.

En este caso no se trata de alimentar las ranas con el estiércol de cerdo sino más bien de utilizarlo, como materia prima, para la crianza de larvas de mosca que en última instancia servirán de alimento a las ranas.

Este innovador uso del estiércol tiene una serie de ventajas en comparación con los otros métodos de aplicación. Puede a su vez mejorar considerablemente las ganancias del productor ya que la ranicultura es una actividad muy rentable. Entre las ventajas podríamos citar las siguientes:

- \* Luego de retiradas las larvas, el estiércol remanente puede ser utilizado como abono orgánico o como alimento de bovinos o pescados.
- \* El cosechar y usar las larvas evita la proliferación de las moscas.
- \* La ganancia por hectárea será mayor con una nueva fuente de ingreso a través de la ranicultura.

Una de las limitantes que se presentan en el uso del estiércol de cerdo es que éste deberá estar en forma sólida para su uso, y no líquida. Así, muchas veces no se puede hacer uso del estiércol que proviene de instalaciones de engorda con pisos ranurados o perforados. Otra limitante es que se crea la necesidad de lugares de almacenamiento y como consecuencia problemas de olor.

La disminución en la oferta de rana criada naturalmente, ha incentivado la crianza de rana en forma artificial. Sin embargo, una serie de factores ha dificultado la expansión de esta actividad. Uno de ellos es el clima. Las ranas crecen muy lentamente en climas fríos pudiendo inclusive entrar en periodos de hibernación. En los climas cálidos ocurre lo contrario, el metabolismo de la rana se hace más activo, la circulación de la sangre se hace más rápida, su apetito aumenta y su crecimiento es más acelerado. Los principios de nutrición necesarios para la alimentación de las ranas no están aún definidos como lo es para otras especies. Aún existen varias dudas en relación a los niveles nutricionales, tipos de ración y formas de administración. Para tener una idea de la complejidad del problema, basta mencionar que las ranas, luego de la metamorfosis, no aceptan alimentos inertes o sea ellas precisan que su alimento se encuentre en movimiento.

Su alimento debe flotar en el agua y no depositarse en el fondo. Los renacuajos, que son las ranas antes de la metamorfosis, no son tan exigentes y se alimentan de materia inerte y en este estado es común el uso de raciones en su alimentación (79).

En los criaderos industriales las tentativas que se han probado para acondicionar a las ranas a que acepten alimentos inertes, no han dado resultados satisfactorios, por esta razón se han utilizado como alimentos más comunes renacuajos, peces, moscas y otros insectos, de estos alimentos los que han merecido especial atención han sido los relacionados a la crianza de mosca debido a que ellas presentan las siguientes

características: ciclo de vida relativamente corto, bajo costo de producción, elevada capacidad reproductiva y son fáciles de ofrecer a las ranas. La cría de renacuajos es la segunda opción ya que ellos son obtenidos en el propio local y son muy apreciados por las ranas.

Una rana reproductora produce alrededor de 35,000 huevos por desovo. Ello ocurre en la época de primavera-verano. De ellos se considera que solamente 4,000 podrán convertirse en renacuajos. En las regiones tropicales con climas húmedos, los renacuajos demoran entre dos a tres meses hasta que se transforman en rana a través de la metamorfosis. Para que ellos permanezcan más tiempo en el estado de renacuajo, se han empleado varias técnicas que retrasan la metamorfosis. La principal es disminuir la temperatura del agua ya que ello retardará el metabolismo. La otra técnica es aumentar la densidad de la población de renacuajos. La crianza de peces y otros insectos también pueden ser utilizadas pero en general, es más cara y difícil. Así, en cuanto al desarrollo de técnicas para la formulación de las raciones inertes, la crianza de insectos y renacuajos tiene un papel importante en la crianza de las ranas (79).

El ciclo de vida de una mosca es de entre 12 a 20 días. Durante éste tiempo una hembra produce un promedio de 800 huevos, que demoran 24 horas para desovar y transformarse en larvas. Estas últimas demoran de cuatro a cinco días para convertirse en adultas. Las ranas se pueden alimentar ya sea de moscas adultas o de sus larvas. En una explotación comercial se prefiere alimentar con larvas, usando a las moscas adultas como

"madres" en la producción de las mismas. La producción de larvas se puede hacer a través del uso de moscas sueltas o que estén en "moscarios". La desventaja de usar moscas sueltas es que se puede favorecer la proliferación de especies indeseables, y además su producción no es uniforme en todo el año, pudiendo ser nula durante el invierno. Tiene la ventaja de no tener costo alguno aunque en los moscarios las moscas deberán ser alimentadas y manejadas adecuadamente (79).

En cuanto a la alimentación de las larvas, los sistemas de alimentación más comunes aprovechan residuos orgánicos, tales como mataderos de pescaderías o de materia fecal de aves o cerdos.

Las heces del cerdo son un sustrato excelente en la crianza de larvas de mosca. Ella puede ser usada dentro de los moscarios, pero la práctica más común es dejarlas expuestas al libre acceso de las moscas. Las heces son colectadas y almacenadas en estercoleras distantes del criadero. Luego de aproximadamente dos días, se retiran unos cinco a diez centímetros de la capa superior, donde se podrán notar millares de larvas en movimiento.

Para ser suministradas a las ranas, estas larvas deberán ser separadas del estiércol lo que se hace usando bandejas que dejan pasar el estiércol, y retienen a las larvas. Esta operación manual puede ser evitada si las heces se colocan en pequeñas camadas sobre una mesa que tenga varias perforaciones. Como las larvas tienen fotofobismo, es decir que huyen de la claridad, ellas se hundirán en el estiércol y eventualmente caerán a través de las perforaciones de la mesa, pudiendo luego

recuperarse del piso. Luego de su recolección las larvas son llevadas a las jaulas de engorde de ranas y colocadas en pequeñas bandejas para ser consumidas. El sistema de alimentación de ranas, con larvas de moscas prácticamente no tiene ningún costo. Los criadores de ranas sufren actualmente dificultades en conseguir buenos substratos para la crianza de larvas ya que los restos de mataderos o pescaderías son extremadamente desagradables. La importancia de incluir estiércol de cerdo en este proceso productivo es que incrementa la rentabilidad por hectarea, de la misma forma que auxilia al ranicultor. El resultado ha sido excelente pues con el precio de un kilo de carne de rana se compran cinco kilos de carne de cerdo (79).

En el clima tropical las ranas demoran entre ocho a nueve meses luego de la metamorfosis, para alcanzar el peso de matanza de 150 gramos, (usando únicamente larvas en su alimentación). Luego de que se retira la piel (de gran valor comercial) y las vísceras, se obtiene un promedio de 80 gramos de carne. Por lo tanto necesitarán entre 12 a 13 ranas para alcanzar el kilo. La ranicultura continúa despertando gran interés gracias al aumento de la demanda por este tipo de carne y la disminución de la oferta de ranas criadas en el ambiente natural. Para la porcicultura que posee la materia prima esencial (estiércol), usada para la producción artificial de uno de los principales alimentos de las ranas (larvas), ésta es una excelente oportunidad para mejorar las ganancias. (79)

### 5.5 Utilización como abono.

En el pasado, transportar y aplicar el estiércol en el suelo era considerado como una desventaja económica porque la disposición de los costos excedía el valor de los nutrientes en el estiércol. Más recientemente, debido a la alta comercialización de los fertilizantes y a los costos de energía, el estiércol han sido considerado como un recurso con valor fertilizante (89). El valor fertilizante del estiércol varía enormemente con la edad y la especie animal, la ración, el ambiente y otros factores. Durante el tratamiento, almacenaje y manipulación, los nutrientes pueden perderse o convertirse a otra forma afectando la probabilidad de usarlo para el crecimiento de las plantas (53). Por ejemplo grandes cantidades de nitrógeno amoniacal se pueden perder del estiércol debido a la volatilización en la atmósfera (56).

Los compuestos de fósforo y potasio pueden hundirse en el fondo de los lagos. Ya que actualmente la aplicación de estiércol a la tierra es variable pueden ser necesarios análisis periódicos del estiércol por granja, para predecir verdaderamente el valor fertilizante (10,96). En el cuadro 24 se muestra la cantidad de elementos excretados por tipo de animal en un año.

El uso del estiércol de cerdos en la tierra puede tener efectos adversos en la calidad del agua, por ejemplo: a) La acumulación de microorganismos patógenos (bacterias, protozoarios, virus, parásitos intestinales, etc.) fósforo, carbón orgánico y nitrógeno orgánico que no son fácilmente removibles a través de los perfiles del suelo, pero pueden ser sacados de la

superficie de suelos erosionados por el agua, y b) El movimiento de las sales solubles y los nitratos de la superficie del agua el flujo del subsuelo y a los depósitos de agua profunda (63,73). Probablemente existan muchos efectos en la calidad de la pastura y forraje cosechado por el estiércol aplicado a la tierra. Estos efectos pueden estar en la composición de los nutrientes y el balance de nutrientes de los productos cosechados que no presentan ninguna restricción en el uso del estiércol. En todo caso, la aplicación del estiércol en tasas que proporcionan excesivos nitratos o potasio pueden tener efectos detrimentales en la cosecha producida. La excesiva disponibilidad de nitrógeno en el suelo, reduce el contenido de azúcar y la calidad del total de azúcar en la remolacha de azúcar. La reducción de frutos de algunas plantas tales como los tomates y también causan problemas de color en algunas frutas tales como el enverdecimiento de las naranjas. De igual forma, el excesivo crecimiento de hierba causado por el aumento de nitrógeno en el suelo, puede ser problema en algunas siembras. Excesivos nitratos en el suelo, pueden causar un aumento en la acumulación de nitratos en la pastura y forrajes, valores mayores de 0.2% de nitratos en el forraje son reconocidos como niveles peligrosos para las granjas (73).

## ANALISIS DE LA INFORMACION

Como ya se mencionó, la cantidad de estiércol producido en las granjas porcinas es un verdadero problema, tanto para el manejo dentro de las instalaciones como en los lugares de almacenamiento y disposición final, provocando alteraciones ecológicas a los terrenos cercanos, y problemas de salud a los animales y personas que trabajan en estas granjas y las que habitan en la periferia. Es por esto, que el tratamiento del estiércol es una solución a estos problemas y una alternativa para la reutilización de algunos elementos con valor nutricional, así como una fuente de energía en el caso de que se obtenga biogas, y la reutilización del agua.

En el presente trabajo, se da a conocer, por medio de un estudio recapitulativo las características operacionales de algunos tratamientos que existen y que se podrían fomentar en nuestro país. Algunos de los sistemas que abarca el trabajo son: Digestión anaerobia, producción de biogas, fermentación aerobia, reutilización para alimentación de algunos animales, tratamiento con microalgas, utilización como abono. Existen otras alternativas o tratamientos que se pueden utilizar, algunos de los cuales han caído en desuso por no cumplir los requisitos necesarios para implementarlos, o simplemente se han cambiado por nueva tecnología.

En la cuadro 25 se muestran los sistemas de tratamiento que existen y que se pueden implementar, ya sea como un sólo tratamiento o la combinación de dos o más sistemas, de acuerdo a las necesidades y posibilidades existentes.

Algunos de estos tratamientos, como la evaporación natural acelerada, la bioaumentación, el método de zona de raíces y la producción de microalgas, sólo se aplican a las aguas residuales después de algún tratamiento primario, como puede ser la separación de sólidos-líquidos. Diferentes sistemas de tratamiento pueden ser aplicados a estos residuos. Sin embargo, a la hora de escoger el sistema a emplear deben tenerse en cuenta diversos factores, entre los cuales podemos señalar los siguientes: ubicación de la instalación porcina, número de animales, costos de la instalación, beneficios obtenidos, área de terreno disponible para el sistema de tratamiento, características del terreno cercano a la instalación y otros. Es por esto, que es difícil precisar cuál es el sistema de tratamiento y disposición óptima para éste residuo.

## LITERATURA CITADA

1. Arndt, L. D., Day, L. D. and Hatfield, E. E.; Processing and Handling of Animal Excreta for Refeeding. *J. Anim. Sci.* **48**: 157-162 (1979).
2. Appan, A. and Kean, K. Ch.; A Computer Solution for Determination of Unit Pollution Loads. *Prog. Wat. Tech.* **11**: 521-530 (1979).
3. Barrington, F. S. and MacKenzie, F. A.; The Enrichment of Swine Manure through Cement Kiln Dust Incorporation. *Biological Wastes*, **29**: 1-10 (1989).
4. Beaudet, R., Gagnon, C. Bisailon, G. J. and Ishaque, M.; Microbiological Aspects of Aerobic Thermophilic Treatment of Swine Waste., *Appl. Environ. Microbiol.* **56**: 971-976 (1990).
5. Blouin, M., Bisailon, G. J., Beaudet, R. and Ishaque, M.; Aerobic biodegradation of Organic Matter of Swine Waste. *Biological Wastes*, **25**: 127-139 (1988).
6. Blouin, M., Bisailon, G. J., Beaudet, R. and Ishaque, M.; Nitrification of Swine Waste. *Can. J. Microbiol.*, **36**: 273-278 (1990).
7. Bourque, D., Bisailon, J., Beaudet, R., Sylvestre, M., Ishaque, M. and Morin, A.; Microbiological Degradation of Malodorous Substances of Swine Waste Under Aerobic Conditions. *Appl. Environ. Microbiol.*, **53**: 137-141 (1987).
8. Bryant, P. M.; Microbial Methane Production-Theoretical Aspects. *J. Anim. Sci.* **48**: 193-201 (1979).
9. Buhr, O. H. and Andrews, F. J.; Review Paper: The Thermophilic Anaerobic Digestion Process. *Water Research.* **11**: 129-143 (1977).
10. Burns, C. J., King, D. L. and Westerman, W. P.; Long-Term Swine Lagoon Effluent Applications on "Coastal" Bermudagrass: I. Yield, Quality, and Element Removal. *J. Environ. Qual.*, **19**: 749-756 (1990).
11. Casas, C. C.; Alternativas Biotecnológicas para la Utilización de Desechos Agropecuarios. Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo; CINVESTAV, Guadalajara, Jal., Ag. (1990), XI-XII.
12. Calvert, C. C.; Use of Animal Excreta for Microbial and Insect Protein Synthesis. *J. Anim. Sci.* **48**: 178-192 (1979).

13. Chen, H. T. and Day, L. D.; Effects of Temperature Change on the Stability of Thermophilic Fermentation of Swine Manure. Agricultural Wastes., 16: 313-317 (1986).
14. Cooper, P. and Cornforth, I. S.; Volatile Fatty Acid in Stored Animal Slurry. J. Sci. Ed. Agric., 29: 19-27 (1978).
15. Cruickshank, G. G.; Notas sobre un Plan para el Tratamiento y Manejo de las Aguas Residuales., III Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Vol. III; Acapulco, 1982. S.M.I.S.A. S.C.
16. De la Noüe, J. and Basseres, A.; Biotreatment of Anaerobically Digested Swine Manure with Microalgae. Biological Wastes., 29: 17-31 (1989).
17. Deans, A. E. and Evans, R. M.; Gamma Irradiation of Piggery Slurry. Biological Wastes. 21: 249-256 (1987).
18. Derbyshire, J. B., Monteith, D. H. and Shannon E. E.; Virological Studies on an Anaerobic Digestion System for Liquid Pig Manure. Agricultural Wastes., 18: 309-312 (1986).
19. Domínguez, L. E.; La Conaminación por Excretas de Cerdo: Un Problema Controlable a Mediano Plazo. Nuestro Acontercer Porcino 1:4-12 (1993).
20. Donham, K. J., Knapp, L. W., Monson, R. and Gustafson, K.; Acute Toxic Exposure to Gas from Liquid Manure. J. of Occupational Medicine. 24: 142-5 (1982).
21. Donham, J. K. and Leininger, R. J.; Animal Studies of Potential Chronic Lung Disease of Workers in Swine Confinement Buildings. Am. J. Vet. Res., 45: 926-931 (1984).
22. Donham, J. K., Yeggy, J. and Dague, R. R.; Chemical and Physical Parameters of Liquid Manure from Swine Confinement Facilities: Health Implications for Workers, Swine and the Environment. Agricultural Wastes. 14: 97-113 (1985).
23. Donham, J. K., Yeggy, J. and Dague, R. R.; Production Rates of Toxic Gases from Liquid Swine Manure: Health Implications for Workers and Animal in Swine Confinement Buildings. Biological Wastes., 24: 161-173 (1988).
24. Doporto, D. J. M., y Guerra, G.; Planeación y Evaluación de Empresas Porcinas II. 1ª ed. Trillas, México, 1986.

25. Doyle, Y., Guay, R., de la Noüe, J., and Asselin, J.; Traitement aérobie du lisier de porc: aspects microbiens. Can. J. Microbiol. 32: 679-686 (1986).
26. Doyle, Y. and de la Noüe, J.; Aerobic treatment of Swine Manure: Physico-Chemical Aspects. Biological Wastes. 32: 187-208 (1987).
27. Durand, H. J., Iannotti, L. E., Fischer, R. J. and Miles, B. J.; Modeling, Simulating and Optimizing the Anaerobic Digestion of Swine Manure. Biological Wastes. 24: 1-15 (1988).
28. English, R. P., Baxter, S. and Fowler, V. R.; Crecimiento y Finalización del Cerdo (Como mejorar su productividad) Manual Moderno. México, 1990.
29. Esteban, V. J.; Reciclaje de Excretas de Cerdo: Estudio Recapitulativo. Tesis de Licenciatura. Fac. de Med. Vet. y Zoot. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., 1983.
30. Fischer, R. J., Iannotti, L. E. and Porter, H. J.; Anaerobic Digestion of Swine Manure at Various Influent Solids Concentrations. Agricultural Wastes. 11: 157-166 (1984).
31. Fernandes, L., Mckyes, E. and Obidniak, L.; Performance of a Continuous Belt Microscreening Unit for Solid Liquid Separation of Swine Wastes. Can. Agric. Engin. 30: 151-155 (1987).
32. Gantar, M., Obrecht, Z. and Dalmacija, B.; Nutrient Removal and Algal Succession during the Growth of *Spirulina platensis* and *Scenedesmus quadricauda* on Swine Wastewater. Bioresource Technology 36: 167-171 (1991).
33. Garraway, L. J.; Investigations on the Aerobic Treatment of Pig Slurry. Agricultural Wastes. 4: 131-142 (1982).
34. Gonzalez, O. A.; Problemas de Contaminacion.; Desarrollo Porcicola. 2: 28-29 (1992).
35. Harmon, B. G.; Reciclaje de Deyecciones Porcinas por Fermentación Aeróbia. Revista Mundial de Zootecnia. 18: 34-38 (1976)
36. Hashimoto, G. A.; Methane from Swine Manure: Effect of Temperature and Influent Substrate Concentration on Kinetic Parameter. Agricultural Wastes. 9: 299-308 (1984).

37. Hernández, S. S.; La Bioalimentación, tratamiento microbiológico de aguas residuales. Acontecer Porcino. 1: 48-50 (1993).
38. Hill, T. D.; Maximising Methane Production in Stressed Fermentation Systems for Swine Production Units. Agricultural Wastes, 9: 189-203 (1984).
39. Hill, T. D. and Bolte, P. J.; Characteristics of Whole and Scraped Swine Waste as Substrates for Continuously Expanding Anaerobic Digestion Systems. Agricultural Wastes, 16: 147-156 (1986).
40. Hill, T. D., Holmberg, D. R. and Bolte, P. J.; Operating and Performance Characteristics of Scraped Swine Manure as a Thermophilic Anaerobic Digestion Substrate. Agricultural Wastes. 14: 37-49 (1985).
41. Hill, T. D. and Holmberg, D. R.; Long Chain Volatile Fatty Acid Relationships in Anaerobic Digestion of Swine Waste. Biological Wastes, 23: 195-214 (1988).
42. Hobson, N. P. and Shaw, G. B.; The Bacterial Population of Piggery-Waste Anaerobic Digesters. Water Research. 8: 507-516 (1974).
43. Hoyos, G.; Manejo de Desperdicios y Control de Olores. Nuestro Acontecer Porcino 1:51-56 (1993).
44. Iannotti, L. E., Fischer, R. J. and Sievers, M. D.; Medium for Enhanced Growth of Bacteria from a Swine Manure Digester. Appl. Environ. Microbiol. 43: 247-249 (1982).
45. Instituto de Investigaciones Tecnológicas. Plantas de Biogas Diseño, Construcción y Operación. Organización de Estados Americanos. Bogota, 1980.
46. Iñiguez, C. G., Cuaron, I. J. A., Y Perez G. P.; Estudio de Factibilidad Tecnico-económico para el Aprovechamiento del Estiércol del Cerdo en la Alimentación de Borregos.; Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo; CINVESTAV. Guadalajara, Jal., Ag. (1990), 49-69.
47. Iñiguez, C. G., Franco, G. Y Robles, C. A.; Factibilidad Tecnico Economica para el Aprovechamiento de Solidos Recuperados de Estiércol de Cerdo Fermentados en la Nutrición de Cerdos; Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo; CINVESTAV. Guadalajara Jal. Ag. (1990), 70-100.

48. Iñiguez, C. G.; Fermentación de Estiércol de Cerdo para la Obtención de un Alimento para Rumiantes. Tesis de Doctorado. Colegio de Ciencias y Humanidades. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F., 1991.
49. Ishaque, M. J., Baisilon, R., Beaudet, R. and Sylvestre, M.; Degradation of Phenolic Compounds by Microorganisms Indigenous to Swine Wastes. Agricultural Wastes. 13: 229-235 (1985).
50. Ishibashi, K. and Day, L. D.; Technical and Economical feasibility of Using Methane Gas Produced from Swine Waste for Energy. Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias Sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo; CINVESTAV. Guadalajara, Jal. (1990), 144-171.
51. Iturbe, R. Y Silva, A. E.; Revision Bibliografica sobre Contaminacion del Suelo y Acuiferos. Ingeniería Hidraulica en México. , Sep-Dic :51-56 (1989).
52. Jacques, A. K. y Hoyos, G.; Manejo de Desperdicios y Control de Olores: Necesidades de Planificación para la Producción Intensiva. Memorias de la 1era. Jornada en Producción Porcina. México, D.F., 1994. p. 58-71.
53. King, D. L., Burns, C. J. and Westerman, W. P.; Long-Term Swine Effluent Applications on "Coastal" Bermuda-grass: II. Effect on Nutrient Accumulation in Soil. J. Environ Qual. 19: 756-760 (1990).
54. Kornegay, T. E., Holland, R. M., Webb, E. K. and Bovard, P.K.; Nutrient Characterization of Swine Fecal Waste and Utilization of These Nutrients by Swine. J. Anim. Sci., 44: 608-619 (1977).
55. Lau, K. A., Lo, V. K., Lian, H. P. and Yu, C. J.; Aeration Experiments for Swine Wastes Composting. Biores. Technol. 41: 145-152 (1992).
56. Lockyer, R. D., Pain, F. B. and Klarenbeek, V. J.; Ammonia Emissions from Cattle, Pig and Poultry Wastes applied to Pasture. Environ Pollution. , 56: 19-30 (1989).
57. Lopez, P. Y R. M.; Problemas Politicos, Sociales y Economicos en la Aplicacion de la Legislacion Ambiental en México. III Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Vol. III; Acapulco (1982), 1-14.
58. Maciel, A. C.; Manejo y Disposición de Residuos Sólidos en los Principales Centros Urbanos e Industriales en México. III Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Vol. III; Acapulco, 1982. S.M.I.S.A.S.C.

59. Mandujano, M. I., Felix, A. A. y Martínez, M. A.; Biogas: Energía y Fertilizantes a Partir de Desechos Orgánicos, Manual para el promotor de tecnología. Cuernavaca, Méx. OLADE, IIE., (1981).
60. McCaskey, A. T. and Anthony, B.; Human and Health Aspects of Feeding Livestock Excreta. *J. Anim. Sci.*, 48: 163-177 (1979).
61. McCaskey, A. T.; Health Aspects Associated with the Feeding of Swine Waste. Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo., CINVESTAV. Guadalajara, Jal. Ag.1990, 33-48.
62. McCaskey, A. T.; Microbiological and Chemical Pollution Potential of Swine Waste.; Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo; CINVESTAV. Guadalajara, Jal. Ag. 1990, 12-32.
63. McKain, N. and Hobson, N. P.; A Note on the Destruction of Porcine Enteroviruses in Anaerobic Digestions. *Biological Wastes*. 22: 147-155 (1987).
64. Mejía, S. G. y Vázquez, B. E.; Determinación de Criterios para la Evaluación de Digestores Anaeróbicos. VI Congreso Nacional de Saneamiento Ambiental, El Gran Reto. Queretaro, Gro. 1988 Cap. 3
65. Moeller, Ch. G. E.; Microbiología y Bioquímica de la digestión anaerobia. Tesis de Maestría en Ingeniería (Sanitaria). División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F., 1978.
66. Moeller, Ch. G. E.; Utilización de un Modelo Cinético de Crecimiento Biológico para la Predicción del Comportamiento de la Biomasa Anaeróbica para la Estabilización de los Lodos de Desecho. VI Congreso Nacional de Saneamiento Ambiental, El Gran Reto. Queretaro Gro. 1988 Cap. 3.
67. Montalvo, S. J.; Parámetros básicos de la digestión anaeróbica de lodos. *Ingeniería Civil*. 27: 205-221 (1976).
68. Montalvo, S. J.; Alternativas en el Tratamiento y Disposición de los Residuos Porcinos en Cuba. *Ingeniería Civil*. 28: 117-134 (1977).
69. Montalvo, S. J.; Estudio sobre la Anaerobiosis de los Lodos Primarios Porcinos. *Ingeniería Civil*. 33: 367-375 (1982).

70. Nazir, M.; Biogas Plants Construction Technology for Rural Areas. Bioresource Technology. 35: 283-289 (1991).
71. Nuño, I. A.; Evaporación Natural Acelerada (Otra alternativa para el control de contaminantes). Acontecer Porcino. 3: 37-42 (1993).
72. Oleszkiewicz, A. J.; A Comparison of Anaerobic Treatment of Low Concentration Piggery Wastewater. Agricultural Wastes. 8: 215-231 (1983).
73. Pratt, F. P.; Management Restrictions in Soil Application of Manure. J. Anim. Sci., 48: 134-143 (1979).
74. Poels, J., Van assche, P. And Verstraete, W.; Effects of Disinfectants Antibiotics on the Anaerobic Digestion of Piggery Waste. Agricultural Wastes. 9: 239-247 (1984).
75. Ramírez, Ch. F.; Control de Contaminación de Aguas Residuales en Centros de Refinamiento. III Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Vol. III; Acapulco, 1982. S.M.I.S.A. S.C.
76. Ritter, F. W., Walpole, W. E. and Eastburn, P. R.; Effect of An Anaerobic Swine Lagoon on Groundwater Quality in Sussex Country, Delaware. Agricultural Wastes 10: 267-284 (1984).
77. Robinson, K., Saxon, R. and Baxter, H.; Microbiological Aspects of Aerobiocally treated Swine Wastes. Proceeding of Symposium on Livestock Wastes. Am. Soc. Agric. Eng. Proc. 271: 225-228 (1971).
78. Robles, E., Gallegos, E. M., Calderón, A. y Sainz, M. G.; Sistema de Tratamiento de Lechos de Raíces, Remoción de Materia Orgánica. Inf. Cient. y Tec. 15: 26-28 (1993).
79. Roppa, L.; Uso del Estiércol de Cerdo en la Crianza Artificial de Ranas. Industria Porcina., 29-32 May-Jun. (1987).
80. Sanchez, H. E.; Efecto de la Carga Organicaa sobre la Eficiencia de un Filtro Anaeróbico Aplicado al Tratamiento de Residual Porcino. Ingeniería Civil. 34:81-92 (1983).
81. Schönwiese, Ch. D.; El Clima en Peligro. Revista Mexicana del Petróleo. May-Jun: 23-30. (1990).
82. Segura, M. A.; Residuos agropecuarios.- Diagnóstico técnico y estrategias.; Curso taller sobre control de residuos agropecuarios.; Xalapa, Ver. p. 4-35; SEDUE (1985).

83. Sintesis Porcina. En Holanda, el problema son las excretas. (7): 26 (1988).
84. Smith, R. J., Heim, M. E. and Greiner, T. H.; Experimental Methane Production from Animal Excreta in Pilot-Scale and Farm-Size Units. *J. Anim. Sci.* **48**: 202-217 (1979).
85. Spoelstra, S. F.; Simple phenol and indoles in aerobically stored piggery wastes. *J. Sci. Food Agric.* **28**: 415-423 (1977).
86. Stanley, M. E.; Environmental Chemistry. 7<sup>th</sup> editions. Lewis Publishers. New York, 1992.
87. Summers, R. and Bousfield, S; A Detailed Study of Piggery-Wastes Anaerobic Digestion. Agricultural Wastes. **2**: 61-78 (1980).
88. Sutton, L. A.; Utilization of Swine Manure Solids in Ruminant Diets. Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias Sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo; CINVESTAV. Guadalajara, Jal. (1990), 101-119.
89. Sutton, L. A., Nelson, W. D., Mayrose, B. V., Nye, C. J. and Kelly, T. D.; Effects of Varying Salt Levels in Liquid Swine Manure on Soil Composition and Corn Yield. *J. Environ. Qual.*, **13**: 49-59 (1984).
90. Sutton, L. A., Nye, C. J., Patterson, A. J., Kelly, T. D. and Furomoto-Elkin, A. J.; Effects of Avilamycin in Swine and Poultry Waste on Methane Production in Anaerobic Digesters. Biological Wastes., **30**: 35-45 (1989).
91. Svendsen, J., Bengtsson Ch. and Gustafsson G.; Comparative Studies on the Incidence of Disease Among Suckling Piglets Maintained in Farrowing Pens with Different Manure Handling Systems. Agricultural Wastes., **10**: 61-74 (1984).
92. Svendsen, E. and Blackburn, H. T.; Sequential Phases in the Anaerobic Degradation of Swine Manure. Agricultural Wastes., **16**: 47-65 (1986).
93. Sweeten, M. J.; Gas Metano de Estiércol Porcino. Porcira. **18**: 26-34
94. Taiganides, E. P., White, R. K. and Stroschine, R. L., Water and soil oxygen demand of livestock waste. In: Livestock Wastes Management and Pollution Abatement. Amer. Soc. Agr. Eng., p. 179 St. Joseph, MI. USA. 1971.

95. Taiganides, E. P.; Pig Waste Management & Pollution Control: Ideas for México.; XXVII Congreso AMVEC. Acapulco, 1992. 313-326.
96. Vanderholm, H. D.; Handling of Manure from Different Livestock and management Systems. *J. Anim. Sci.*, 48: 113-120 (1979).
97. Vázquez, B. E., Mejía, S. M.; Impacto Ambiental de las Granjas Porcinas en el Estado de Yucatan. VI Congreso Nacional de Saneamiento Ambiental, El Gran Reto. Queretaro Qro. 1988 Cap. IV.
98. Velsaen, A. F. M.; Anaerobic Digestion of Piggery Waste. 2. Start-up Procedure., *Neth. J. Agric. Sci.*, 27: 142-152 (1979).
99. Viniegra, G. G.; Consideraciones Técnicas y Económicas sobre la Recirculación de Residuos Orgánicos de las Granjas Porcícolas de México. Memorias del Primer Ciclo Internacional de Conferencias sobre Manejo y Aprovechamiento de Estiércol de Cerdo; CINVESTAV. Guadalajara Jal. Ag. (1990), 120-143.
100. Vriens, L., Nihoul, R. and Verachtert, H.; Activated Sludges as Animal Feed: A Review. *Biological Wastes.*, 27: 161-207 (1989).
101. Williams, G. A.; Indicators of Piggery Slurry Odour Offensiveness. *Agricultural Wastes.*, 10: 15-36 (1984).
102. Zeikus, G. J.; The Biology of Methanogenic Bacteria. *Bacterol. Rev.* 41: 514-541 (1977).

**C U A D R O S**

CUADRO 1  
GASES QUE PROVOCAN EL "EFECTO INVERNADERO"

TRAZA DE GASES	CONCENTRACIÓN ACTUAL	TIEMPO DE PERMANENCIA EN ATMOSFERA	INCREMENTO ACTUAL	AUMENTO DE TEMPERATURA	FUENTES ANTROPOGENAS MAS IMPORTANTES
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	347 ppm	De 6 hasta 10 años	0.4 % p.a.	1.5 hasta 4.5 °C	Combustibles fósiles Roturación de bosques Erosión de suelos
Ozono (O <sub>3</sub> ) sólo cerca del suelo	30 ppb	De 30 hasta 90 días	1 % p.a.	0.9 °C	Indirectamente de óxidos de nitrógeno, monóxidos de carbono e hidrocarburos
Compuestos clorofluoro-carbonados	0.4 ppb	De 50 hasta 100 años	4 % p.a.	0.5°C (?)	Propelentes en aerosoles medios refrigerantes y disolventes, espumas sintéticas.
Oxido nítrico (N <sub>2</sub> O)	0.3 ppm	Desde 20 hasta 100 años	0.25 % p.a.	0.12°C	Fertilizantes sintéticos Combustibles fósiles Combustión biológica
Metano (CH <sub>4</sub> )	1.65 ppm	Desde 4 hasta 7 años	1.5 % p.a.	0.09°C	Cultivo de arroz, Ganadería a gran escala Escape de gas natural Combustibles fósiles Combustión biológica
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	< 1 ppm	De 7 hasta 14 días	?	0.09°C	Ganadería a gran escala Combustibles fósiles Plantas depuradoras
Tetracloruros de carbono (CCl <sub>4</sub> )	0.14 ppb	?	?	0.06°C	Disolventes industriales

Fuente: Rev. Méx. del Petróleo, 1990 (81).

CUADRO 2  
PRODUCCIÓN DE EXCRETAS - CERDOS

ANIMAL	PESO (Kg)	EXCRETAS (Kg/día)	AGUA
Destetados	17.5	1.15	91 %
Crecimiento	32.5	2.10	91 %
Finalización	75.0	4.90	91 %
	100.0	6.50	91 %
Gestación	137.5	4.45	91 %
Gestación/camada	187.5	16.50	91 %
Semental	175.0	5.50	91 %

Fuente: Esteban, V. J., 1983 (29).

CUADRO 3  
PRODUCCIÓN DEL ESTIÉRCOL DE CERDO EN TERMINOS, DE 1000 KG DE  
PESO VIVO (ASAE, 1988)

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	DATOS
Total de estiércol (TE)	Kg/día	65.0
Relación heces/orina		1.2
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	1010.0
Sólidos totales (ST)	Kg/día	6.0
	% de TE	9.2
Sólidos volátiles	Kg/día	4.8
	% ST	80.0

Fuente: Iñiguez, C. G., 1990 (46).

## CUADRO 4

RANGOS EN LA COMPOSICIÓN DEL ESTIERCOL DE CERDO  
(BASE SECA)  
DATOS

Proteína cruda, %	11.23d	23.5 a	24 b	25.7 b	46.17 e
Proteína verdadera, %	15.6 a				
Fibra cruda, %	7.0 d	14.8 a	15 c	23.0 d	
Extracto etéreo, %	2.0 d	8.0 a	9.0 d		
Cenizas, %	10.0 d	15.3 a	28.0 d		
Extracto libre de nitrógeno, %	38.3 a				
Calcio, %	2.72 a	4.28b	2.7 c		
Fósforo, %	2.13 a	2.65b			
Magnesio, %	0.93 a				
Sodio, %	0.45 b				
Potasio, %	1.34 a	1.56b			
Cobre, ppm	36.0 b	63.0 a			
Zinc, ppm	530.0 a				
Energía bruta(KJ/g)	17.0 d	23.0 d			
Fibra neutro					
detergente, %	20.0 d	60.0 d			
Fibra ácido					
detergente, %	14.0 d	39.0 d			
Lignina, %	3.0 d	6.0 d			
Celulosa, %	6.0 d	23.0 d			
Hemicelulosa, %	3.0 d	36.0 d			
Digestibilidad de la materia seca (in vivo) en rumiantes, %	29.0 f	51.0 g			
Digestibilidad de la materia orgánica (in vivo) rumiantes, %	29.0 h				
Digestibilidad de la materia seca (in vivo) en cerdos	49.0 i				

- a Kornegay et al., 1977. f Stanogias & Pearce  
 b Sutton et al., 1988. g Tinnimit et al., 1972.  
 c Smith & Whler, 1979. h Ngian & Pearce, 1979.  
 d Hilliard et al., 1979. i Holland et al., 1975.  
 e Adriano, 1975.

Fuente: Iniguez, C. G., 1990 (46).

CUADRO 5  
COMPOSICION DEL ESTIERCOL DE CERDO

COMPONENTES	PROMEDIO	RANGO
% de Materia Seca		
Proteína cruda	19	11-31
Fibra cruda	18	7-23
Extracto etéreo	5	2-09
Cenizas	17	10-28
Fibra neutro detergente	45	20-60
Fibra ácido detergente	24	10-39
Lignina	5	3-06
Celulosa	17	6-23
Hemicelulosa	20	3-36
Fósforo	2.6	1.4-4.6
Potasio	1.0	.6-1.6
Calcio	3.5	1.5-8.5
Magnesio	0.7	0.3-1.3
Sodio	0.3	0.1-0.5
ppm de Materia Seca		
Hierro	2169	971-6407
Zinc	600	225-1059
Cobre	280	27- 822
Cadmio	0.77	0.04- 3.02
Plomo	9.89	0.29- 40.11
Arsénico	57	0.20- 102.51

Fuente: McCaskey, A. T., 1990 (52).

CUADRO 6  
COMPOSICIÓN DE AMINOACIDOS DE LAS HECEAS PORCINAS  
( % )

	Heces porcinas frescas	Heces porcinas secas
Fenilalanina	0.81	0.87
Licina	0.60	1.11
Arginina	0.44	0.67
Treonina	0.53	0.80
Metionina	--	0.58
Isoleucina	0.52	1.03
Leucina	0.92	1.57

Fuente: Harmon, B. G., 1976 (35).

CUADRO 7

## CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DEL ESTIERCOL SIN TRATAMIENTO

Demanda química de oxígeno, g/L	44,0
Población total de microbios aeróbicos, UFC/ml	$9.1 \times 10^8$
Sólidos totales en suspensión, g/L	30,14
Potencial de oxido-reducción, mV (Redox)	-297,2
$N(NH_4^-)$ , g/L	4,49
$N(NH_3^-)$ , mg/L	107,4
$P(PO_4^{3-})$ , g/L	1,95
pH	7,5

Fuente: Doyle, Y., 1986 (25).

CUADRO 8

## CONCENTRACIONES DE GASES Y EFECTOS

GAS	CONCENTRACIÓN	ALTERACIONES QUE PRODUCEN
Amoniaco ( $NH_3$ )	20-30 ppm	Irritan mucosas de ojo y tracto respiratorio
	50-75 ppm	Reducción del crecimiento en un 12% y daño pulmonar
	En las bacterias productoras de Metano	
	>1500 mg/l	Inhiben el crecimiento
	>3000 mg/l	Produce aguda toxicidad
Ácido sulfhídrico ( $H_2S$ )	100 ppm	Irritación de ojos y nariz
	200 ppm	Cefaleas y mareos
	500 ppm	Nauseas y excitación
	≥1000 ppm	Inconsciencia y muerte
Metano ( $CH_4$ )	-----	Asfixiante
	500 000 ppm	Cefaleas, no tóxico (24).
	-----	Puede provocar explosiones y fuegos (24).

Fuente: Donham, J. K., 1988; Doporto, D. J., 1986; Hoyos, G., 1993 (23, 24, 43).

## CUADRO 9.

ENFERMEDADES BACTERIANAS DEL CERDO QUE PUEDEN SER  
TRANSMITIDAS A LOS HUMANOS A TRAVES DE LAS HECEs

ENFERMEDAD	AGENTE
Salmonelosis	<i>Salmonella</i> spp.
Leptospirosis	<i>Leptospira interrogans</i>
Colibacilosis	<i>Escherichia coli</i>
Yersinosis	<i>Yersinia enterocolitica</i>
Listeriosis	<i>Listeria monocytogenes</i> <sup>a</sup>
Campilobacteriosis	<i>Campilobacter fetus</i> y <i>Campilobacter jejuni</i>
Brucelosis	<i>Brucella suis</i> <sup>b</sup>
Erisipelas	<i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i> <sup>b</sup>

- a) Más común en vacas y borregos que en el cerdo  
b) Originalmente adquirida por contacto ocupacional.  
Fuente: McCaskey, A. T., 1990 (62).

## CUADRO 10.

## VALORES MAXIMOS DE EXPOSICION A GASES

Gas	Exposición prolongada límite 8 hrs	Exposición a corto plazo límite 10 min.
Amoniaco	25 ppm	35 ppm
Bioxido de Carbono	5000 ppm	1500 ppm
Monoxido de Carbono	50 ppm	300 ppm
Acido Sulfhídrico	10 ppm	15 ppm

Fuente: Jacques, A. K., 1994 (52).

## CUADRO 11

LA CONCENTRACION DE LOS PARAMETROS MEDIDOS EN EL EFUENTE DIGERIDO

A SEIS CONCENTRACIONES DE SOLIDOS INFLUYENTES.

Concentracion (g de SV/litro <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> (mg/l)	pH	Alcalinidad (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	Total (mg/l)	A. Acético (mg/l)	A. Propiónico (mg/l)	A. Isobutírico (mg/l)	A. Butírico (mg/l)	A. Isovalérico (mg/l)	A. Valérico (mg/l)	Hidrógeno X
60.3	2936	7.6	13041	370	---	---	---	---	---	---	---
68.1	2540	7.7	3083	128	115	13	---	---	---	---	0.009
81.9	2750	7.6	14465	157	139	17	---	---	---	---	0.005
87.8	4245	7.9	19400	205	190	15	---	---	---	---	0.004
97.1	3672	7.9	20370	1211	275	914	22	---	---	---	0.005
108.0 <sup>1</sup>	6083	7.9	27433	6532	2052	2696	719	109	896	60	0.017

Fuente: Fischer, R. J., 1984 (30).

## CUADRO 12

CONCENTRACION DE A.G.V DURANTE LOS 105 DIAS

DE OPERACION DEL DIGESTOR A UNA CONCENTRACION DE 108 g/l

Días de operación	Total de A.G.V. (mg/litro)	Acético (mg/litro)	Propiónico (mg/litro)	Isobutírico (mg/litro)	Butírico (mg/litro)	Isovalérico (mg/litro)	Valérico (mg/litro)
17	1161	781	704	92	---	84	---
37	6532	2052	2696	719	109	896	60
93	4961	134	4263	130	31	213	130
105	1966	80	1756	14	12	85	19

Fuente: Fischer, R. J., 1984 (30).

CUADRO 13

EFFECTO DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA DE 55°C A 60°C EN EL  
DESEMPEÑO DE UN DIGESTOR.

	Digestor 1		Digestor 2		Digestor 4		Digestor 5	
	de 55°C, 3x <sup>a</sup> 5 días <sup>b</sup>	a 60°C, 3x 5 días	de 55°C, 3x <sup>a</sup> 8 días	a 60°C, 3x 8 días	de 55°C, 3x <sup>a</sup> 13 días	a 60°C, 3x 13 días	de 55°C, 3x <sup>a</sup> 4 días	a 60°C, 3x 4 días
$\beta^c$	0.258	0.205	0.266	0.259	0.362	0.274	0.274	0.213
$\tau^d$	1.548	1.230	0.998	0.971	0.835	0.633	2.055	1.598
X CH <sub>4</sub>	57.86	54.19	61.06	57.92	63.54	57.59	60.83	56.55
ph <sup>e</sup>	7.51	7.73	7.66	7.75	7.71	7.77	7.62	7.63
H <sub>2</sub> O	1.36	1.79	1.31	1.61	1.31	1.93	1.31	1.48
TACV <sup>f</sup>	2.44	2.26	0.81	2.68	0.56	3.04	0.88	2.24
A. acético <sup>g</sup>	0.30	0.80	0.15	1.09	0.08	1.32	0.12	0.62
A. Propiónico <sup>h</sup>	1.55	1.33	0.64	1.20	0.47	1.27	0.73	1.24
Alcalinidad <sup>i</sup>	7.10	8.98	3.44	9.22	6.98	12.16	8.05	10.25
X de Reducción de S.V.	62.41	61.00	68.87	61.17	73.23	65.33	63.83	61.58

<sup>a</sup> Concentración de Sólidos Volátiles como X de S.V.

<sup>b</sup> Tiempos de Retención hidráulicos en días

<sup>c</sup> Rendimiento de Metano en m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kg de S.V. alimentado.

<sup>d</sup> Tasa de Producción Volumétrica de Metano en m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> en m<sup>3</sup> por día.

<sup>e</sup>, <sup>f</sup>, <sup>g</sup> e <sup>h</sup> en kg por m<sup>-3</sup>.

<sup>i</sup> Total de A.G.V. sumados como acético, propiónico, iso- y n-butírico, iso- y n-valérico en kg por m<sup>-3</sup> y acetato

Fuente: Svendsen, E., 1982 (92).

CUADRO 14.  
EFECTO DE ADITIVOS ALIMENTICIOS EN LAGUNAS DE  
FERMENTACION Y MANEJO DE RESIDUOS

---

ADITIVOS	EFFECTO EN EL MANEJO DE DESPERDICIOS
Sulfato de cobre	Inhibe la descomposición de desechos
Acido arsanilico	Inhibe la descomposición de desechos
Antibióticos	Inhibe la descomposición de desechos
Probióticos	Estimula la utilización de nutrientes
Enzimas	Estimula la utilización de nutrientes
Cultivo de levaduras vivas	Estimula la utilización de nutrientes
Extracto de Yuca	Estimula la utilización de nutrientes
"Buffers" de ác. org.	Estimula la utilización de nutrientes
Plaguicidas	Inhibe la descomposición de desechos

---

Fuente: Hoyos, G., 1993 (43).

CUADRO 15

CARACTERISTICAS Y CONCENTRACIONES APLICADAS DE LOS AGENTES  
ANTIMICROBIANOS EXAMINADOS EN EL EXPERIMENTO DE LABORATORIO

Agente antimicrobiano	Características	Concentraciones <sup>v</sup>	
<b>DESINFECTANTES</b>			
		(ml/litro <sup>-1</sup> )	
Tego 51	Dodecyl-di(amino-etil)glycin	dosis 1	0.17
		dosis 2	1.70
Dettol	Una mezcla de para-clormetaxyleneol terpinol e iso-propanol	dosis 1	0.83
		dosis 2	8.30
NaOCl	Contiene de 25 a 32 g libres disponibles de cloro por litro	dosis 1	1.70
		dosis 2	16.70
Creolina	Una mezcla de aceite de creosota, fenoles (mínimo 20%) y jabón de resina	dosis 1	0.17
		dosis 2	1.70
<b>ANTIBIÓTICOS</b>			
Clortetraciclinas	Tetraciclinas	dosis 1	3.3
		dosis 2	16.7
		dosis 3	33.3
Tylosina	Antibiótico macrólido	dosis 1	.7
		dosis 2	8.3
		dosis 3	16.7
Cloranfenicol	Antibiótico sintético que contiene un grupo p-nitrofenil, un dicloroacetamilo y un grupo propanediol	dosis 1	16.7
		dosis 2	83.3
		dosis 3	166.6
Eritromicina	Antibiótico macrolido	dosis 1	0.4
		dosis 2	2.0
		dosis 3	4.0
Bacitracina	Mezcla de diferentes fracciones de antibióticos con polipéptidos naturales	dosis 1	3.3
		dosis 2	16.7
		dosis 3	33.3
Virginiamicina	Mezcla de diferentes fracciones de antibióticos con polipeptidos naturales	dosis 1	1.7
		dosis 2	8.3
		dosis 3	16.7

<sup>v</sup> En el digestor.

Fuente: Poels, J., 1984 (74).

CUADRO 16

## UNA COMPARACION DE LA EFICIENCIA DE DIGESTION CON VARIOS TIEMPOS DE RETENCION

	10 Dias			7 Dias			5 Dias			3 Dias		
	entrada	salida	Reducción	entrada	salida	Reducción	entrada	salida	Reducción	entrada	salida	Reducción
ST (X)	3.3	2.1	36	3.7	2.6	30	3.7	2.5	32	3.5	3.2	8.6
A.G.V. (mg/litro)	3697	274	92.6	5008	924	82	5940	1148	81	5092	2970	41.6
NH <sub>3</sub> N (mg/litro)	1237	1044	15.6	2156	2118	1.7	2078	2128	nada	1847	2229	nada
D.H.O (mg/litro)	14672	2567	82.5	18917	2787	85	17543	3628	79	21000	28000	nada
D.Q.O. (mg/litro)	46920	21956	52.3	79980	41910	47.6	69805	38400	45	67600	51600	23.7
Gas por kilogramo de S.T. añadido		0.297 m <sup>3</sup>			0.284m <sup>3</sup>			0.240 m <sup>3</sup>			0.170 m <sup>3</sup>	

Fuente: Swaners, R., 1980 (87).

CUADRO 17

## ANALISIS DEL EFLUENTE DIGERIDO Y LA PRODUCCION DE GAS DURANTE LA DIGESTION TERMOFILICA DEL ESTIERCO DE CERDO

PARAMETROS	TIEMPO DE RETENCION HIDRAULICA EN DIAS		
	25	15	10
Sólidos totales (g/l)	59.3 ± 4.1	63.3 ± 4.3	72.2 ± 5.1
Sólidos volátiles (g/l)	47.2 ± 3.3	50.4 ± 4.0	54.5 ± 3.7
Demanda química de oxígeno (g/l)	63.5 ± 5.1	73.0 ± 4.9	77.0 ± 6.3
Total de nitrógeno (g de N / l)	4.41 ± 0.10	4.41 ± 0.11	4.75 ± 0.22
Amoníaco (g de N/l)	2.11 ± 0.11	2.09 ± 0.17	2.42 ± 0.078
Total de ácidos volátiles (g/l) (como acético)	2.06 ± 0.39	1.85 ± 0.46	2.10 ± 0.28
Ac. acético (g/l)	0.49 ± 0.17	0.50 ± 0.14	0.68 ± 0.32
Ac. butírico (g/l, como acético)	0.83 ± 0.19	0.62 ± 0.11	0.70 ± 0.09
Ac. propiónico (g/l, como acético)	0.74 ± 0.07	0.72 ± 0.20	0.72 ± 0.14
Alcalinidad (g de CaCO <sub>3</sub> por litro)	8.25 ± 0.64	10.86 ± 0.98	13.25 ± 0.76
pH	7.45 ± 0.18	7.40 ± 0.21	7.40 ± 0.23
Calidad del gas (X de CH <sub>4</sub> )	56.7	57.7	58.1
Producción de metano			
litros por día	321.0	436.3	625.0
Coeficiente de variación (X)	9.1	9.9	5.9

Fuente: Hill, T. D., 1985 (40).

CUADRO 18  
TAMAÑO DE DIGESTOR ANEROBIO PARA GRANJAS  
(95°F y 16 días de retención)

Tamaño de la Operación: Cabezas	8% Concentración de sólidos volátiles		5% de Concentración sól. vol.		
	Sólidos volátiles kg/día	Entrada de la pasta l/día	Tamaño del digestor 1	Entrada de la pasta l/día	Tamaño del digestor 1
50	16329	204390	3596070	325539	5678000
100	32659	416386	7192100	662433	11734500
200	53403	832772	14384300	1205940	23090500
500	153293	2044078	35960700	3255390	57915600
1000	306586	4163863	71921000	6548620	117345000
2000	613172	8327726	147628000	13219390	230905000
5000	1532930	20440800	359607000	32667460	567800000
10000	3065860	41638600	719210000	64464560	1173450000
15000	4898770	60934833	1059890000	98039800	1741250000

\* Cerdos de 68 kg (150 lb) o peso equivalente, a una vez capacidad.  
Fuente: Sweeten, M. J., (93).

CUADRO 19.  
CALCULO DE LA PRODUCCION DE METANO Y DE ELEMENTOS  
FERTILIZANTES A PARTIR DEL ESTIERCOL

Tamaño de la operación <sub>a</sub>	Rendimiento bruto $0.0284m^3$ (pies cúbicos) día <sup>b,c,d</sup>		Rendimiento neto de metano $0.0284m^3$ (pie cúbico)/día <sup>e</sup>	Elementos Fertilizantes		
	Biogas	Metano		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
50	4.64	13.37	9.29	1.814	1.361	1.361
100	9.29	26.94	18.54	3.175	2.268	2.268
200	18.58	53.88	37.16	6.350	4.536	4.536
500	46.45	133.77	92.60	15.876	11.340	11.340
1000	92.90	269.41	185.20	31.742	22.680	22.680
2000	185.80	538.82	371.16	63.500	54.359	54.359
5000	464.50	1337.76	929.00	158.760	113.400	113.400
10000	929.00	2694.10	2787.00	317.520	226.800	226.800
15000	1393.50	3994.70		499.000	340.190	340.190

<sup>a</sup> - Cerdos de 68 kg (150 lb) de peso equivalente, capacidad a cualquier momento suposición

<sup>b</sup> - Destrucción de sólidos volátiles = 50 %

<sup>c</sup> - Rendimiento bruto del metano es de  $0.23m^3$  (8.0 pies cúbicos) CH<sub>4</sub> por 0.454 kg (1b) de sólidos

<sup>d</sup> - El biogas contiene 60% de metano y 40% de CO<sub>2</sub> (base volumen).

<sup>e</sup> - El requerimiento de energía para el calentamiento y mezclado del digestor es de 30% de la producción bruta del gas.

<sup>f</sup> - Las cantidades recuperables de fertilizante son .03178kg (0.071b) N; .02270kg (.051b) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y .02270 kg (.051b) para K<sub>2</sub>O por cabeza por día, sin incluir las pérdidas durante el almacenamiento del lodo.

Fuente: Sweeten, M. J., (93).

CUADRO 20.  
RECOMENDACIONES SOBRE DIAMETRO DE TUBERIA DE CONDUCCION  
DE BIOGAS

FLUJO DESEADO (Pies <sup>3</sup> /hora)	25 m.	DISTANCIA AL LUGAR DE USO		
		50m.	100 m.	150m.
16	1/2 "	1 <sup>o</sup> B 25m: 3/4 " resto: 1/2 "	3/4 "	3/4 "
24	1/2 "	3/4 "	3/4 " resto : 3/4 "	1 <sup>o</sup> B 100 m: 1 "
32	3/4 "	1 "	3/4 " resto : 3/4 "	1 <sup>o</sup> B 100 m: 1 "
48	3/4 "	3/4 "	1 <sup>o</sup> B 75m: 1 " resto: 3/4 "	1 "
64	3/4 "	1 "	1 <sup>o</sup> B 50m: 1 1/2 " resto: 1 "	1 <sup>o</sup> B 100 m: 1 1/2 " resto: 1 "

Fuente: Instituto de investigaciones tecnológicas, 1980 (45).

CUADRO 21.

CONSUMO DE BIOGAS POR DIFERENTE EQUIPO

Equipo	Consumo de biogas (m <sup>3</sup> /hr)
Estufa (2 quemadores)	0.40-0.55
Lampara	0.15-0.21
Refrigerador (1.8 ft <sup>3</sup> )	0.05-0.063
Motor C.I.	0.45-0.55 p/c H.P.

Fuente: Instituto de investigaciones tecnológicas, 1980 (45).

## CUADRO 22.

PRINCIPALES BACTERIAS IDENTIFICADAS EN EL TRATAMIENTO  
AEROBICO DE DESPERDICIOS DE CERDOS.

---



---

Bacterias

---

*Acitenobacter calcoaceticum*  
*Alcaligenes spp.*  
*Enterobacter agglomerans*  
*Escherichia coli*  
*Flavobacter odoratum*  
*Klebsiella pneumoniae*  
*Moraxella spp.*  
*Proteus vulgaris*  
*Providencia spp.*  
*Providencia alcalifaciens*  
*Pseudomonas maltophilia*  
*Pseudomonas stutzeri*  
*Pseudomonas fluorescens spp.*  
*Pseudomonas spp.*  
*Salmonella spp.*  
*Staphylococcus y Streptococcus.*

---



---

Fuente: Beaudet, R., 1990 (4).

## CUADRO 23.

RIESGOS POTENCIALES DE LA ALIMENTACION CON  
DESPERDICIOS ANIMALES

---

Microorganismos patógenos	Antibióticos y drogas
Toxinas microbianas	Hormonas
Micotoxinas	Coccidiostatos
Parásitos	Pesticidas
Virus	Metales pesados
Arsenicales	Elementos traza

---

Fuente: McCaskey, A. T., 1979 y Vriens, L., 1989 (60,100).

CUADRO 24.

APROXIMACION DE LOS NUTRENTES FERTILIZANTES  
POR ANIMAL EN UN AÑO EXCRETADO<sup>a</sup>

Animal	Peso/Vivo Kg	N Kg/Año	P <sup>b</sup> Kg/Año	K <sup>c</sup> Kg/Año
Lestetado	16	2.6	0.9	1.7
Desarrollo	29	5.0	1.6	3.2
Finalización	69	11.3	3.7	7.3
	91	15.0	5.0	10.0
Gestante	125	10.4	3.5	6.8
Cerda con Lechones	170	38.1	12.7	24.9
Semental	159	12.7	4.3	8.6

<sup>a</sup> Plan de Servicio del Medio Oeste, 1975

<sup>b</sup> Convertido a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, multiplicar por 2.3

<sup>c</sup> Convertido a K<sub>2</sub>O, multiplicar por 1.2

Fuente : Vanderholm, H. D., 1979 (96).

CUADRO 25.

DIFERENTES TRATAMIENTO PARA EL ESTIERCO DE CERDOS

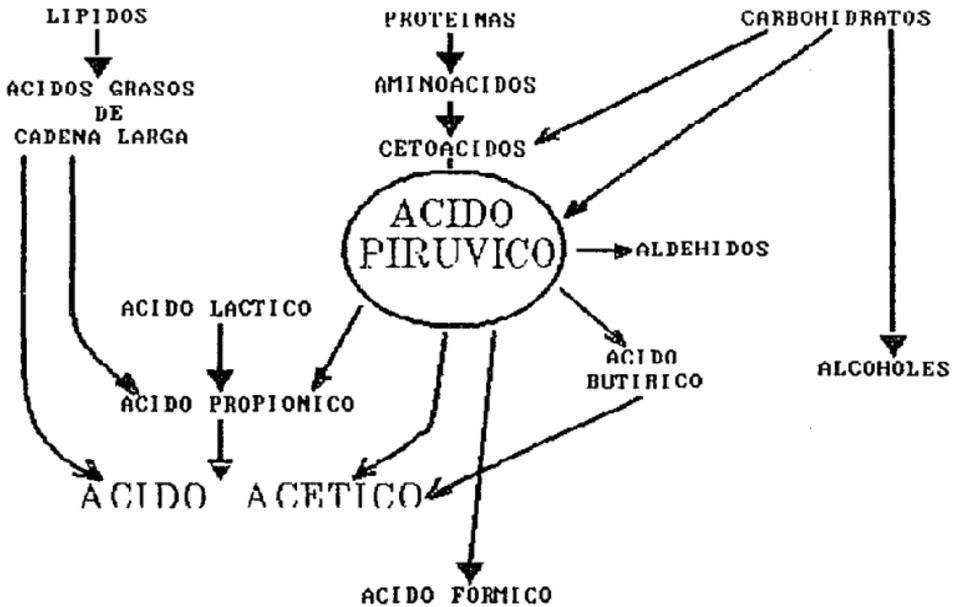
FISICOS	QUIMICOS		BIOLOGICOS
Incineración	Clorinación		Contacto
Relleno Sanitario	Floculación	A	Digestores Biofiltro
Deshidratación	Hidrólisis	n	Accidente
Evaporación Natural Acelerada	Osmolisis	a	Flujo Convencional
Irradiación	Pirólisis	e	Artificial
Separación Sól-Liq.		r	Natural
Método de Zona de raíces		ó	
Españar en terrenos		b	
Fertilizante		i	
		o	
			Fosa de oxidación
		Aeróbio	Digestor
			Artificial
			Laguna Natural
		Bioaumentación	
		Producción de Microalgas	

(Fuente: 16, 17, 29, 31, 37, 46, 68, 71, 72, 78).

**F I G U R A S**

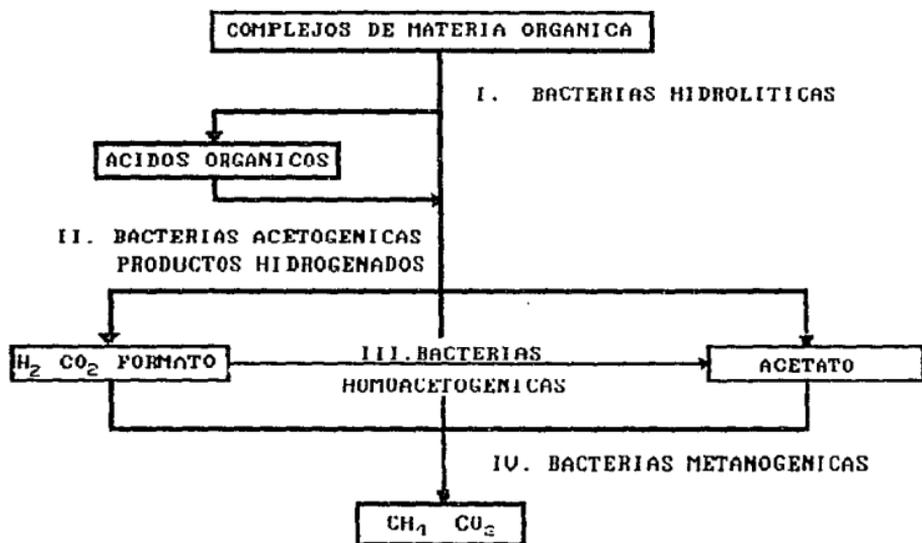
Fig. 1 REACCIONES PRODUCIDAS POR BACTERIAS ACIDOGENICAS

## MATERIA ORGANICA PARTICULADA



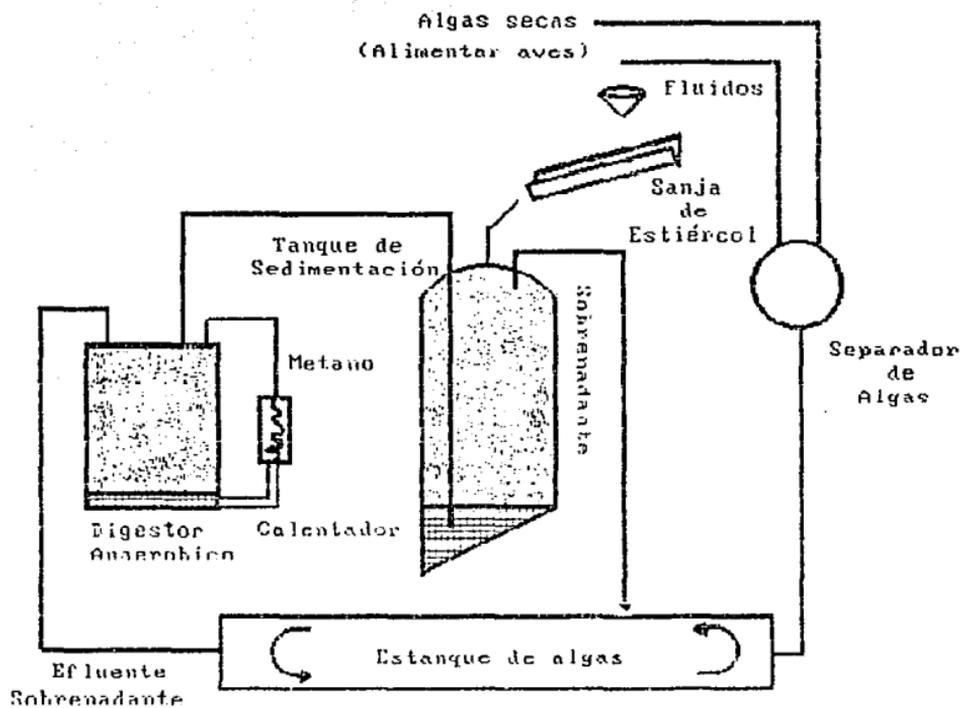
Fuente : Moeller, Ch. G., 1988 (66).

Fig. 2 GRUPO DE BACTERIAS INVOLUCRADAS EN LA DIGESTION ANAEROBICA



Fuente : Moeller, Ch. G., 1988 (66).

Fig. 3 Tratamiento con Microalgas.



Fuente: Calvert, J. C., 1979 (12).

Fig. 4 Tratamiento con Microalgas

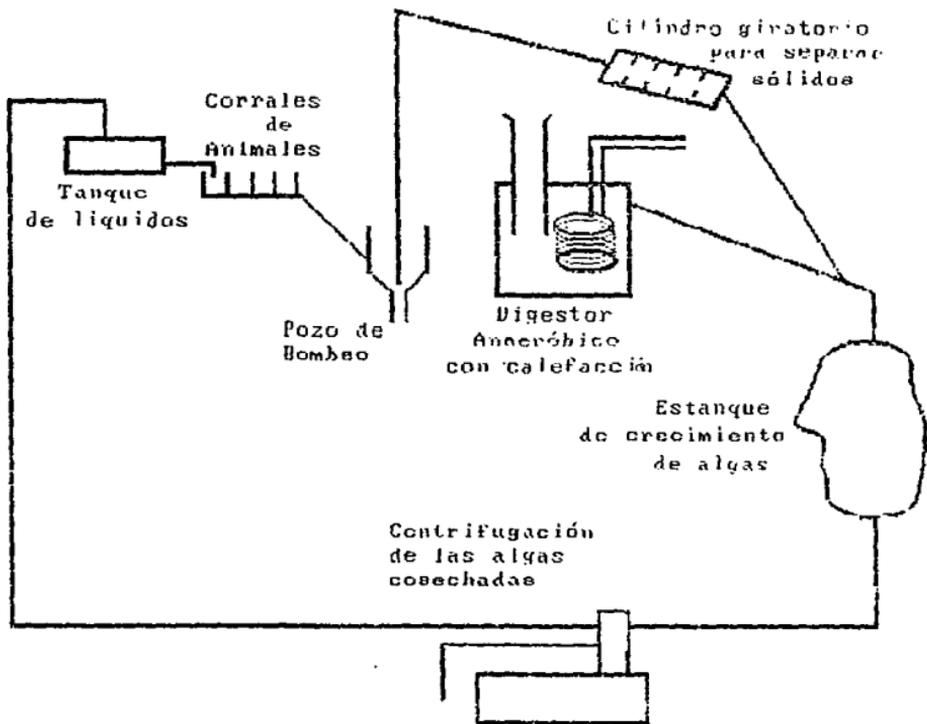
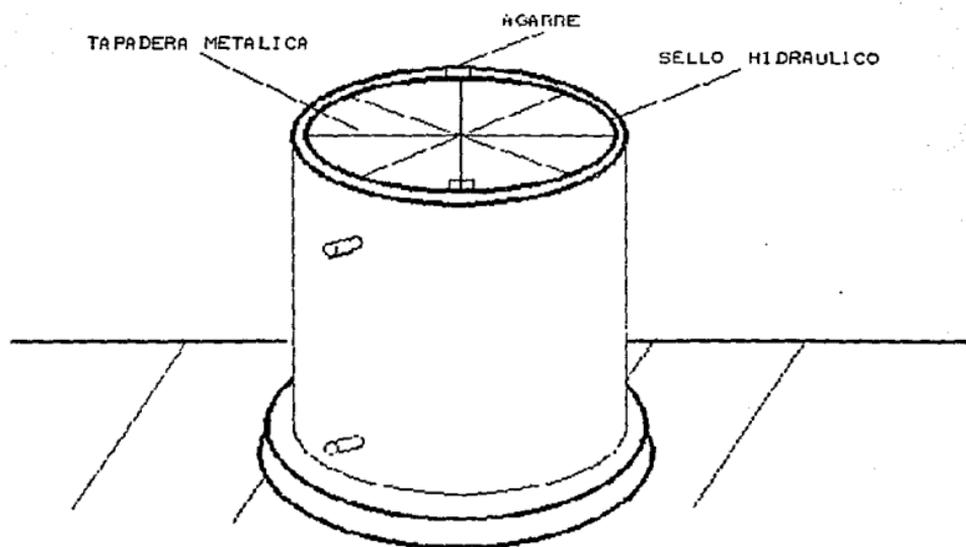
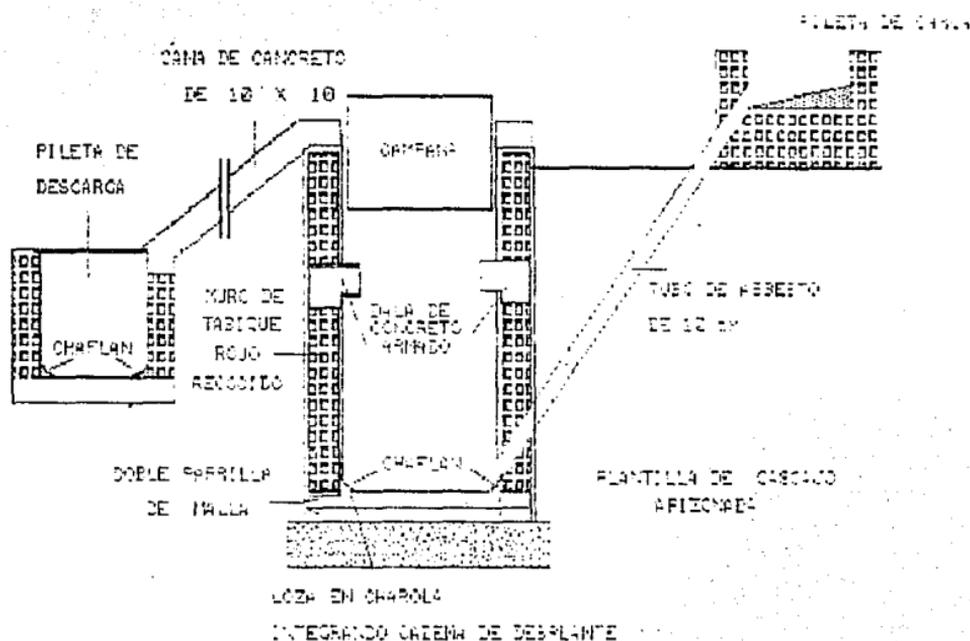


Fig. 5 . DIGESTOR TIPO OLADE-GUATEMALA



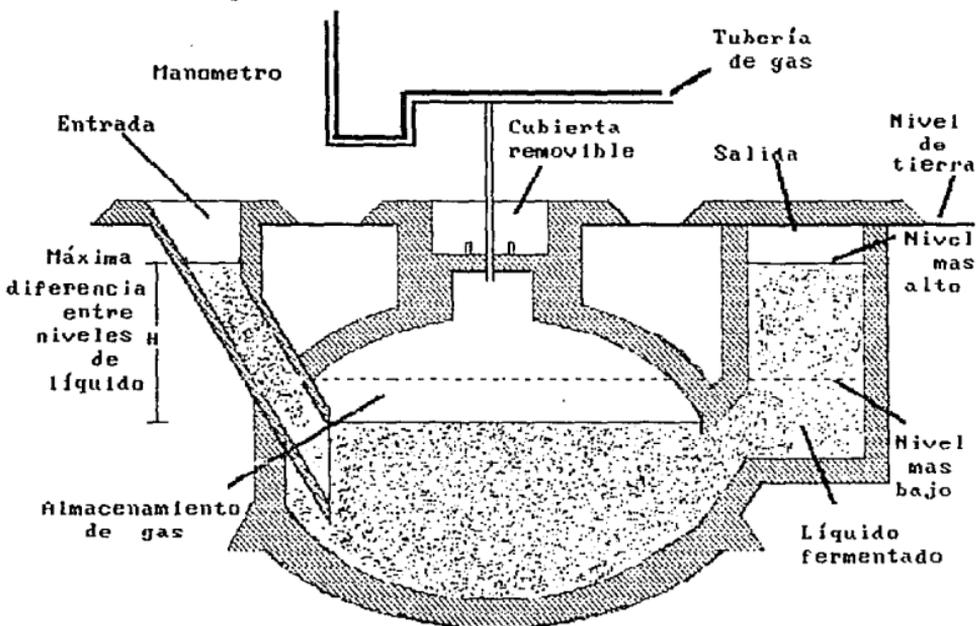
Fuente: Mandujano, M. I., 1981 (59).

Fig. 6 DIGESTOR TIPO HINDU



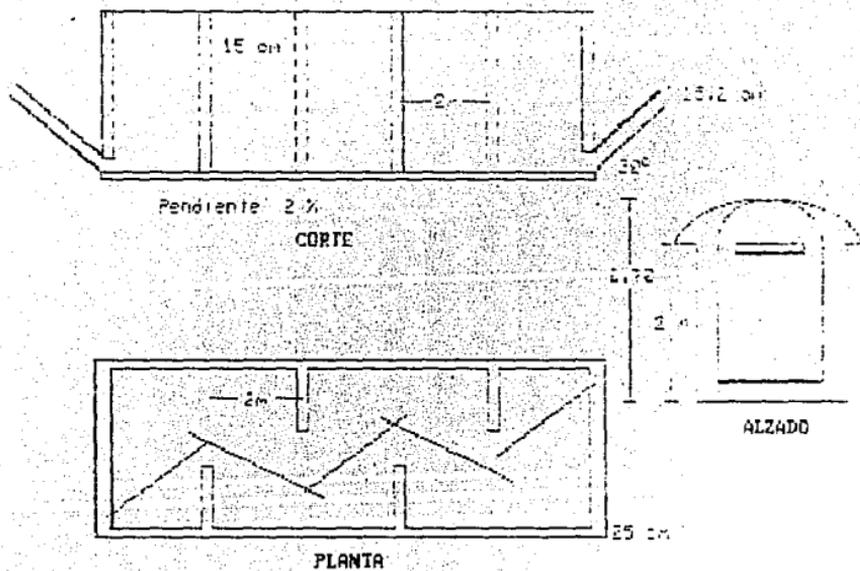
Fuente: Mandujano, M. I. 1981 (59).

Fig. 7 PLANTA DE BIOGAS TIPO CHINO



Fuente: Mandujano, H. I., 1981 (59).

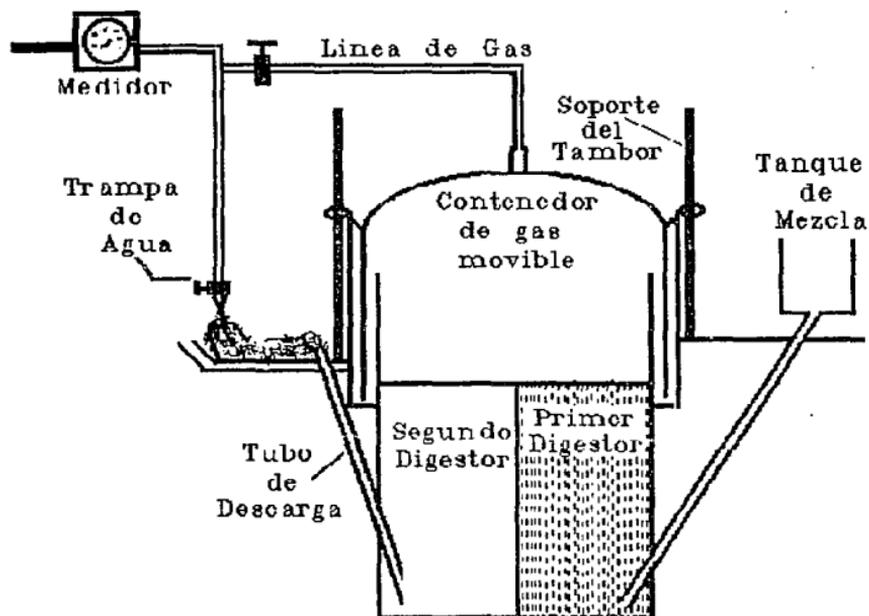
Fig. 8 DIGESTOR HORIZONTAL DE DESPLAZAMIENTO



DIGESTOR DE 48 M CUBICOS

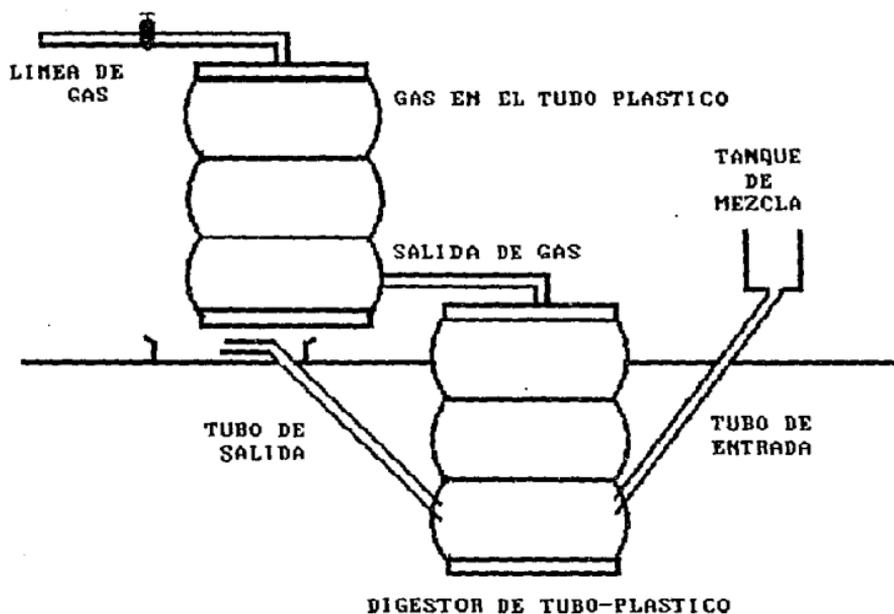
Fuente: Mandujano, M. I., 1981 (59).

Fig. 9 Otro tipo de Digestor  
(Con doble cámara de digestión)



Fuente: Nazir, M. 1991 (70).

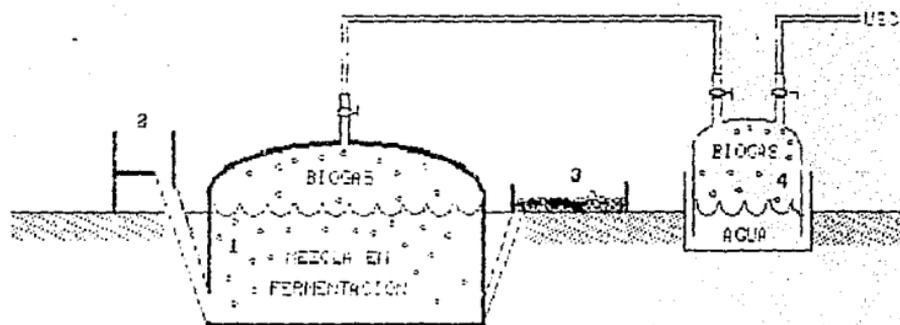
Fig. 10 PLANTA DE BIOGAS DE PLASTICO A BAJO COSTO



Fuente: Hazir, M. 1991 (70).

Fig. 11

## ESQUEMA DE UNA INSTALACION DE GENERACION DE BIOGAS

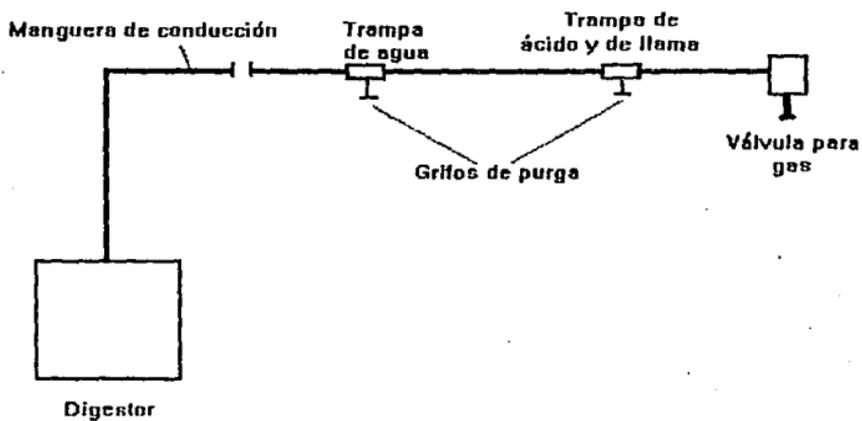


- 1 - DIGESTOR
- 2 - PILETA DE CARGA (MATERIA PRIMA)
- 3 - PILETA DE DESCARGA (LIDOS RESIDUALES)
- 4 - ALMACENAMIENTO DE BIOGAS

Fuente: Mandujano, M. I., 1981 (59).

Figura 12.

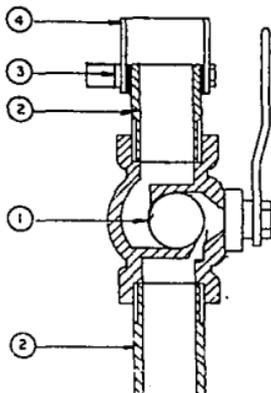
Esquema típico de una línea de conducción de gas.



Fuente: Instituto de Investigaciones Tecnológicas, 1980 (45).

Figura 13

## VALVULAS PARA GAS

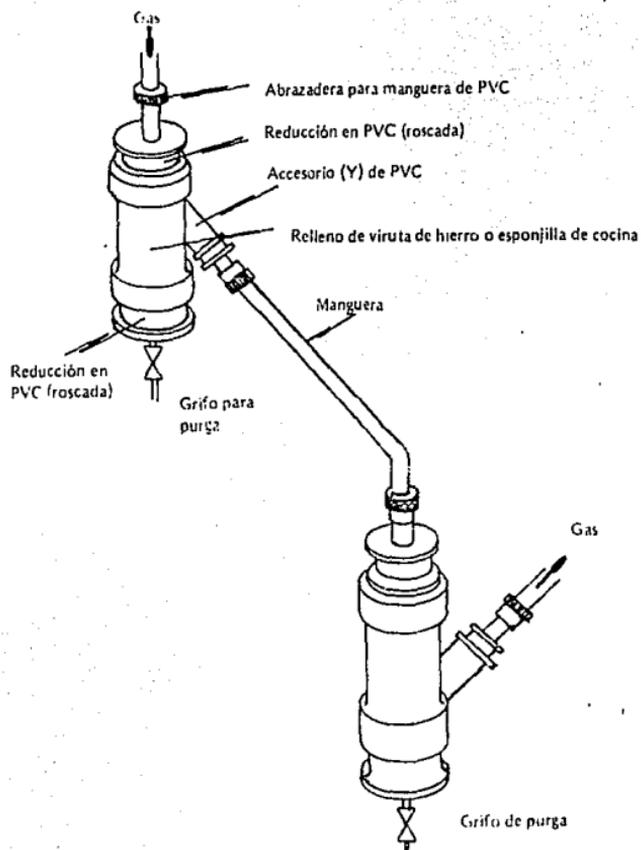


- 1 - Válvula de esfera en acero inox. o PVC.
- 2 - Tubo de acero o de PVC roscado.
- 3 - Abrazadera.
- 4 - Manguera de PVC.

Fuente: Instituto de Investigaciones Tecnológicas  
1980 (45).

Figura 14  
ACCESORIOS PARA LA PURIFICACION DEL GAS

TRAMPA DE ACIDO SULFIDRICO Y DE LLAMA



## A N E X O

## CALCULO DE DIMENSIONES DE UN DIGESTOR

Para diseñar un digestor cilíndrico vertical con campana de tipo hindú, se requieren de los siguientes datos :

- Requerimiento de biogas por día----- B (m<sup>3</sup> biogas/día)
- Cuadro 21
- Relación del volumen de biogas producido al día por volumen del digestor:

$$R = \left( \frac{\text{m}^3 \text{ de biogas/día}}{\text{m}^3 \text{ digestor}} \right)$$

Se tiene entonces que el volumen del digestor (V) en metros cúbicos, estará dado por la relación:  $V = \frac{B}{R}$

Para calcular el digestor requerido en el primero de los ejemplos antes descrito, se procede de la siguiente manera:

- 1) Los requerimientos diarios de biogas para cubrir las necesidades planteadas son B= 2.5 m<sup>3</sup>/día
- 2) Un digestor tipo hindú operando con desechos de vaca mezclados con agua caliente, a 25 días de residencia, presenta una relación de volumen de biogas producido al día por volumen de digestor del orden de 0.75, o sea que R= 0.75.

3) El Volumen del digestor,  $V = \frac{B}{R}$ , será entonces

$$V = \frac{2.5}{0.75} = 3.33 \text{m}^3$$

Con objeto de asegurar que se cuente con suficiente gas, pasamos al orden inmediato superior, lo que da un digestor de 4m<sup>3</sup>, el que producirá del orden de 3m<sup>3</sup> al día.

4) Si se trata de un digestor cilíndrico vertical de diámetro (d) igual a la profundidad (h),  $d=h$ , el volumen del cilindro

$$\text{será: } V = \frac{\pi d^2}{4} * h = \frac{\pi d^3}{4} = 4m^3$$

y por lo tanto su diámetro:

$$d = \frac{\sqrt[3]{4 * 4}}{\pi} = 1.72 \text{ m.}$$

Tenemos entonces que un digestor de  $4m^3$  de volumen será un pozo de 1.72 m de diámetro y 1.72 m de profundidad.

5) La relación de altura a diámetro del pozo no necesariamente es de 1 a 1. Veamos el cálculo de la profundidad del pozo para este mismo digestor de  $4m^3$  de volumen si estipulamos un diámetro de 1.60 m.

$$V = \frac{(\pi) 1.60^2}{4} * h = 4m^3$$

$$h = \frac{4 * 4}{1.60^2} = \frac{4 * 4}{2.56} = 1.99m$$

Tenemos ahora un pozo de 1.60m de diámetro y 2 m de profundidad.

6) Para este pozo, las dimensiones de la campana para almacenar la mitad de biogas producido en un día, o sea  $1/2 * 3m^3 = 1.5 m^3$  de biogas, serán 1.50m de diámetro, para dejar 0.10m de holgura con el pozo, y su altura  $h'$ :

$$V' = \frac{\pi \times 1.50m^2}{4} \times h' = 1.5 m^3$$

$$h' = \frac{1.5 \times 4}{1.50^2 \pi} = \frac{1.5 \times 4}{2.25 \pi} = 0.85$$

por lo tanto las dimensiones de la campana serán:

$$d' = 1.50 \text{ m}$$

$$h' = 0.85 \text{ m}$$

En la misma forma se procede para calcular las dimensiones para calcular el digester, partiendo de la cantidad de biogas que se desee producir y la eficiencia del sistema propuesto (59).