

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMATICAS

Centro de Estudios de Biotecnología Industrial

Título: Análisis de la viabilidad del uso de lodos anaerobios como alimento animal

**Tesis presentada en opción al
Título Académico de**

MASTER EN BIOTECNOLOGIA
Mención Biotecnología Ambiental

Autor: Lic. José Lucas Pérez Pardo

*Tutores: Dra. Rosa C. Bermúdez Savón
Dr. Pedro Lezcano Perdigón*

Consultante: Ing. Juan R. Cárdenas Sánchez

Julio, 1998
"Año del Aniversario 40 de las Batallas Decisivas de la Guerra de Liberación"

Quisiera agradecer a todos aquellos que de una forma u otra, han brindado su apoyo para la culminación de este trabajo, especialmente a:

La Dra. Rosa C. Bermúdez: Por brindarme la posibilidad de seguir su ejemplo; así como, por la claridad y apoyo incondicional en la defensa de esta idea.

Los Drs. Pedro Lezcano y Manuel Valdivie: Por alentarme a seguir adelante con sus valiosas orientaciones.

El Ing. Juan R. Cárdenas: Por su interés y colaboración, decisivos en la culminación de este estudio.

Los Drs. Juana Galindo y Ramón Boucourt: Por su dinámica contribución en la ejecución de este trabajo.

A los compañeros del Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, de la Universidad de Oriente, por su hospitalidad y ayuda oportuna.

A los colegas de la Delegación Territorial del CITMA y del Centro de Investigaciones en Bioalimentos en Ciego de Avila, especialmente al Dr. José Herrera Altuve.

*A todos, **GRACIAS***

*A la memoria
De mis padres.*

*A mi esposa
Por apoyarme y soportarme.*

*A Pavel y Liudmila
Para que sigan este ejemplo.*

*"... Buscamos sólo la verdad, en la medida
que nuestra inteligencia nos permita conocerla."*

Ch. Darwin

PENSAMIENTO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

INDICE

RESUMEN

INTRODUCCION

REVISION
BIBLIOGRAFICA

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXOS

PARTE
EXPERIMENTAL

*RESULTADOS
Y DISCUSION*

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio sobre la viabilidad técnico-económica del uso de los lodos anaerobios como alimento animal en un sistema integral que contempla la digestión anaerobia de la vinaza de destilería y el aprovechamiento de los productos generados.

Como base para el análisis se realizó la caracterización de la vinaza de la destilería "Nauyú" y se evaluó, en un reactor a escala de banco, la eficiencia del tratamiento, la composición del lodo y del efluente. Se consideraron además, los beneficios económicos que se derivan del uso de los lodos en diferentes sistemas de alimentación así como el aprovechamiento del biogás como combustible de la caldera que alimenta la destilería y del efluente en el fertiriego de áreas cañeras.

Se concluye que los lodos anaerobios pueden ser considerados potencialmente, una alternativa atractiva para la alimentación animal.

El sistema integral propuesto permite amortizar la inversión inicial en tres años aproximadamente, por lo que se considera una alternativa económica sostenible y sustentable, aplicable al resto de las destilerías del Ministerio del Azúcar.

INDICE

Páginas

I.- Introducción	1
II.-Revisión Bibliográfica	3
II.1.- Digestión Anaerobia.....	3
II.2.- Reactores Anaerobios.....	11
II.3.- Biogás.....	16
II.4.- Lodos Anaerobios.....	18
II.5.- Digestión Anaerobia de la Vinaza.....	24
III.- Parte Experimental.....	26
III.1.- Caracterización de la destilería "Nauyú"	26
III.2.- Análisis Ambientales.....	27
III.3.- Digestión Anaerobia de la Vinaza.....	28
III.4.- Viabilidad Económica.....	30
IV.- Resultados y Discusión.....	32
IV.1.- Composición de la Vinaza.....	32
IV.2.- Digestión Anaerobia de la Vinaza.....	33
IV.3.- Propuesta de un sistema de tratamiento con reactores UASB.....	35
IV.4.- Viabilidad Económica de un sistema integral para el tratamiento de la Vinaza.....	37
V.- Conclusiones.....	45
VI.- Recomendaciones.....	46
VII.- Bibliografía.....	47
VIII.- Anexos.....	55

I.- INTRODUCCION

Como resultado de la explosión demográfica, el uso indiscriminado de los recursos naturales y la carencia de políticas efectivas para la protección del medio ambiente, la humanidad enfrenta en la actualidad tres problemas que ponen en peligro su propia existencia: la contaminación ambiental, la falta de alimentos y el agotamiento de las reservas naturales de petróleo.

Por lo anterior el desarrollo sustentable está emergiendo en el ámbito global como uno de los retos más acuciantes de finales de siglo XX, proponiéndose conciliar el desarrollo y el crecimiento económico con el tratamiento y reciclaje de los desechos de una manera sostenida y racional.

Para llevar a cabo el tratamiento de los desechos existen dos grupos generales de procedimientos: los fisicoquímicos y los biológicos, los primeros son aplicables a residuos con contaminantes inorgánicos o con sustancias orgánicas no biodegradables; los segundos se emplean cuando resulta posible remover la carga contaminada mediante la acción de microorganismos bajo condiciones aerobias o anaerobias.

Existen razones de tipo técnico y económico que han dado primacía a los tratamientos biológicos anaerobios, no obstante el grado de eficiencia en la remoción de la materia orgánica no es suficiente para considerar que el residuo ha sido definitivamente descontaminado. Ante esta situación se tienen las siguientes alternativas:

- 1- Someter el residual a un postratamiento y una vez depurado verterlo al ambiente.
- 2- Postratar el residual y reciclarlo.
- 3- Reciclar directamente el residuo.

Aunque la cantidad de lodo generado en los procesos anaerobios es marcadamente inferior al de los aerobios, su presencia es inevitable, siendo el volumen producido directamente dependiente del caudal y la eficiencia fermentativa.

Tradicionalmente las alternativas ecológicas para la utilización y disposición de los lodos anaerobios han estado encaminadas al uso directo en la agricultura, preparación de fertilizantes y rellenos sanitarios; su posible aprovechamiento en la alimentación animal ha sido abordado

de manera esporádica como un elemento a considerar dentro de un sistema integral de tratamiento y reciclaje de residuos (Kubiak y Duvuis, 1985 citado por Bermúdez *et. al.*, 1993; Valdés *et. al.*, 1991; Olguin, 1996 y Pérez, 1997). Por esto, resulta de interés evaluar hasta qué grado esta alternativa puede ser viable, máxime si se tiene en cuenta el rápido y continuo aumento de los precios de los concentrados proteicos y cereales que son base de los alimentos balanceados para animales.

Elías (1997) ha planteado que para países tropicales la producción animal sólo será sostenible cuando se armonice la producción agrícola, el aprovechamiento de los residuales y se establezca una adecuada práctica biotecnológica que permita mejorar y aprovechar los productos, subproductos y residuales.

Con este trabajo se persiguen los siguientes objetivos:

1. Determinar el estado actual del conocimiento acerca de la digestión anaerobia y sus tecnologías.
2. Valorar la potencialidad de los lodos anaerobios como alimento animal.
3. Realizar un estudio sobre la viabilidad técnico-económica de un sistema de tratamiento anaerobio de vinaza de destilería, considerando el uso del biogás, los lodos y los efluentes líquidos.

II. REVISION BIBLIOGRAFICA

II.1. - Digestión Anaerobia

En términos generales es el proceso mediante el cual la materia orgánica compleja es transformada en un gas combustible, quedando como residuo un producto con elevado contenido orgánico y una fracción mineral de cantidad y naturaleza variables.

La digestión anaerobia es el procedimiento más utilizado para la estabilización de los lodos residuales de desechos orgánicos (Chaving y Necthling, 1990; Peavy et. al., 1995 y Handel y Cavalcanti, 1997) y aunque es un proceso único e indivisible, su análisis requiere valorar la bioquímica y la microbiología de sus etapas, conjuntamente con las tecnologías establecidas, de manera independiente, para poder alcanzar el fin deseado.

II.1.1 - Bioquímica y microbiología.

Las fermentaciones anaerobias son transformaciones en las que un sustrato orgánico, la mayoría de las veces producto de la degradación de biopolímeros, cede equivalentes de reducción a un aceptor orgánico. Si el aceptor es dióxido de carbono o grupos metilos, éstos se convierten en metano, recibiendo el proceso el nombre de *digestión anaerobia* (Guiot et. al., 1989).

Guyot (1992) en una revisión sobre la bioquímica y la microbiología de la digestión anaerobia, plantea cuatro condiciones generales para que la bioconversión se realice eficientemente:

- Anareobiosis estricta.
- Condiciones reductoras rigurosas.
- Ausencia o cantidades limitadas de aceptores de electrones finales que favorezcan otras vías en competencia con la metanogénesis.
- Respetar las exigencias específicas de cada grupo de bacterias involucradas: ausencia de inhibidores, condiciones de temperatura, el pH y la presencia de oligoelementos.

Existe un consenso generalizado de que el proceso se verifica mediante un conjunto de etapas interrelacionadas, donde la participación de diferentes grupos de microorganismos determinan la conversión de los sustratos a dióxido de carbono y metano. Esta concepción tuvo su origen

en los resultados de Jeans y McCarty (1965), donde se logró establecer que la materia orgánica es degradada en dos etapas principales: la hidrolítica-enzimática y la conversión de los productos de ésta en metano y dióxido de carbono.

Estudios posteriores han permitido profundizar en las rutas metabólicas que siguen los microorganismos, su ubicación taxonómica y las condiciones necesarias de las múltiples reacciones que se verifican. En esta dirección se destacan los trabajos realizados por Gujer y Zehder (1983); Guit *et. al.* (1989) y Schoberth (1992).

En la actualidad se conoce que durante la transformación de la materia orgánica a dióxido de carbono y metano, ocurren los siguientes procesos: (Meraz *et. al.*, 1995)

- Hidrólisis de biopolímeros.
- Fermentación de azúcares, aminoácidos y lípidos.
- Oxidación β -anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes.
- Conversión de acetato a metano.
- Conversión de hidrógeno a metano.

Estas transformaciones han sido agrupadas en etapas de acuerdo a los criterios de diferentes autores. Guyot (1992) refiere las siguientes (ver anexos, Fig. 1):

- * Hidrólisis y fermentación.
- * Acetogénesis
- * Matanogénesis.

II.1.1.1.- *Hidrólisis y fermentación:*

En esta etapa los biopolímeros (proteínas, polisacáridos, lípidos, etc.) son hidrolizados por enzimas extracelulares a compuestos más simples (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos). Estas sustancias son utilizadas por microorganismos fermentadores y oxidadores anaerobios, produciéndose una mezcla de ácidos carboxílicos, alcoholes, hidrógeno y dióxido de carbono.

Cabe señalar que siempre que el sustrato esté constituido por sustancias fácilmente hidrolizables, esta etapa procederá sin grandes inconvenientes, sin embargo si los sustratos son pocos solubles y/o de difícil degradación (celulosa, lignina, etc.), puede convertirse en limitante del proceso global (Guyot, 1992). Estas condiciones siempre se toman en cuenta para definir la carga máxima de operación de los reactores y ha motivado que en ocasiones, se prefiera separar físicamente la formación de ácidos de la producción de metano. Esto permite controlar y proteger la metanización mediante el ajuste, para cada etapa; de los requerimientos nutricionales y la cinética del crecimiento microbiano (Fanaka y Matsno, 1986; Ramos, 1988 y Valdés *et. al.*, 1993).

Las bacterias responsables de esta etapa pueden ser anaerobias facultativas o estrictas, siendo las más representativas las pertenecientes a los géneros: Clostridium, Cellulolytic, Proteus, Propanobacterium y Acetovirum (La Serna *et. al.*, 1988; Vilck, 1990; Ramos *et. al.*, 1992 y Tirumale y Nand, 1994).

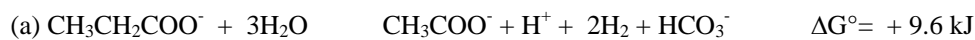
II.1.1.2.- *Acetogénesis:*

Durante la acetogénesis los productos de la fermentación son convertidos en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por un grupo de bacterias denominadas “Productoras Obligadas de Hidrógeno” (BPOH). La particularidad de estos microorganismos radica en que las reacciones que realizan son inhibidas por el hidrógeno que producen, coexistiendo en una relación sintrófica con las bacterias metanogénicas hidrogenofílicas (Noyola, 1994).

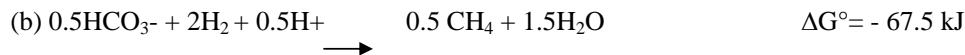
Guyot (1992), plantea que si en el medio de fermentación no existen iones sulfato, ciertos grupos de bacterias sulfatoreductoras pueden también establecer una relación sintrófica con las metanogénicas, de la misma manera que las BPOH.

La transferencia interespecie de hidrógeno mantiene la presión de este gas a niveles adecuados y propicia las condiciones termodinámicas para la conversión de los intermediarios en hidrógeno y acetato. Esto es importante para comprender los fenómenos de regulación de la digestión anaerobia, por ejemplo, para la reacción de acetogénesis a partir de propionato, se tiene que:

- Reacción efectuada por la BPOH.



- Reacción efectuada por las bacterias metanogénicas hidrogenofílica.



- Balance de (a) y (b)



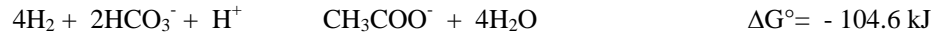
El carácter exergónico del balance de las reacciones, explica la ocurrencia espontánea de los procesos acoplados. Resulta interesante referir que Bryant (1968) fue el primero en determinar que la reacción (c) se realiza en dos etapas: la (a) por medio de una BPOH llamada Organismo "S" y la (b) por una bacteria metanogénica denominada Methanobacterium MoH. Este descubrimiento fue muy importante para describir la metanogénesis en tres etapas a partir de la materia orgánica.

Homoacetogénesis:



Esta etapa ocurre simultáneamente con la anterior. El hidrógeno, el monóxido de carbono y algunos sacáridos, tales como la glucosa y la fructuosa, son transformados únicamente en acetato.

El proceso a partir del hidrógeno, puede representarse como sigue:



Guyot (1992) reporta que los microorganismos más representativos de este proceso son: Clostridium formicoaceticum y Acetobacterium woodii, aisladas por vez primera, por Andreisen (1970) y Balch (1977), respectivamente.

II.1.1.3.- *Metanogénesis*: →

La metanogénesis es la etapa terminal de la digestión anaerobia donde los compuestos intermediarios de etapas anteriores se convierten en metano y dióxido de carbono.

Los metanógenos constituyen un grupo restringido y especializado de microorganismos, cuya taxonomía se está perfeccionando gradualmente. Trevan et. al. (1990) reconocen tres órdenes:

- Methanobacterium y Methanorevibacter
- Methanococcales que comprende la especie M. methanococcus
- Methanomicrobiales que comprende las especies M. methanomicrobium, M. methanogenium, M. methanospirillum y M. methanosarcina.

Estas bacterias metanogénicas carecen de enzimas *superoxidodismutasa* y *catalasa*, por lo que no pueden neutralizar los radicales superóxido y el peróxido de hidrógeno que se generan en el metabolismo oxidativo. Estas son las razones de que se inhiban totalmente a concentraciones de oxígeno iguales o mayores a 0.001 mgL^{-1} , siendo necesarios potenciales redox inferiores a -330 mV . Word (1990) y Brock y Madigan (1991), aseguran que las mismas deben ser manipuladas en condiciones de anaerobiosis estrictas.

Estos microorganismos crecen mejor utilizando dióxido de carbono e hidrógeno, derivando la energía necesaria para su crecimiento de la reducción del dióxido de carbono a metano, sin embargo, algunas utilizan el dióxido de carbono y en lugar de hidrógeno emplean formiato, metanol o compuestos aminados (Monroy, 1997). Las especies más versátiles son cepas de Methanosarcina debido a que pueden utilizar: hidrógeno, dióxido de carbono, metanol, acetato y metilamina. En este sentido Schoberth (1992), plantea una clasificación de acuerdo a la naturaleza del sustrato de partida, siendo las que originan procesos más estables las siguientes:

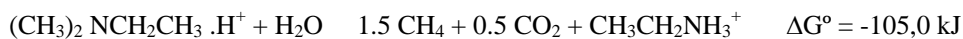
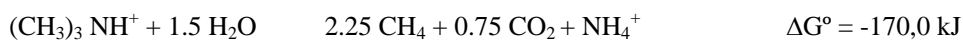
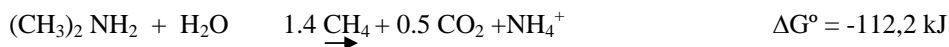
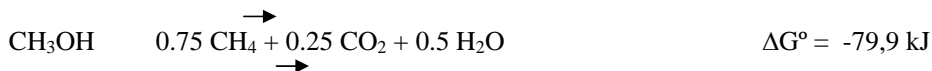
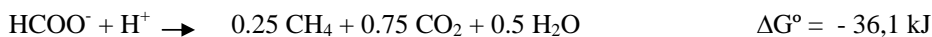
- Bacterias acetoclásticas:



- Bacterias hidrogenofílicas



- Otras bacterias metanogénicas



El mecanismo de generación de metano y la producción asociada de ATP, ha sido objeto de estudio desde hace algunos años. Se conoce que la fermentación metánica se basa en el transporte de equivalente de reducción desde un sustrato, donador de hidrógeno o electrones, al dióxido de carbono o grupos metilo, quedando reducidos a metano. Como donadores

actúan: hidrógeno, dióxido de carbono, metanol, acetato, formiato, entre otras especies; en el caso que el dióxido de carbono actúe como aceptor de electrones, éste primeramente se reduce a formiato con la intervención del ácido tetrahidrofólico (THF).

Barker (1967) citado por Bermúdez (1995), esquematizó las rutas metabólicas de formación de metano a partir del dióxido de carbono y acetato (ver anexos, Fig. 2).

De acuerdo a este mecanismo el carbono convertido en grupo metilo, es transportado a la coenzima B₁₂ y con el concurso del ATP, se separa como metano. En el caso de que los precursores sean el metanol o el ácido acético, los equivalentes de reducción son transportados directamente, interviniendo el ATP.

En la actualidad se sabe que la bioquímica de la formación del metano, implica la participación de compuestos y reacciones exclusivas que caracterizan a los microorganismos metanogénicos. Trevan *et. al.* (1990) plantean que el proceso ocurre, con todos los intermediarios fuertemente ligados a transportadores. Bajo esta concepción el primer paso (ver anexos, Fig. 3) implica la

presencia de un portador, probablemente tetrahidrometanopterina (Vogels *et. al.*, 1984), donde el dióxido de carbono se convierte en formiato. Posteriormente el formiato ligado, es sucesivamente reducido a formaldehído, metanol e intermediarios metilo antes de alcanzar la fase terminal. Como principal agente reductor actúa un diazo compuesto de la riboflavina conocido como CoF₄₂₀.

En la fase terminal interviene una coenzima M (CoB₁₂) que acepta la unidad de un átomo de carbono como un derivado del metanol, éste es después reducido a un grupo metilo y en el paso final se libera el metano.

Independientemente del avance en el conocimiento de la bioquímica de la metanogénesis, aún quedan lagunas importantes que deben aclararse. De forma particular los dos grandes problemas que aparecen sin solucionar son el mecanismo de generación del ATP y la ruta a través de la cual estos microorganismos convierten el dióxido de carbono en materiales celulares (Stryer, 1995).

Speece (1990); Monroy (1992); Guyot y Monroy (1993) y Monroy (1997), señalan los factores fisicoquímicos así como los requerimientos nutricionales de mayor interés en la digestión anaerobia:

A) Factores fisicoquímicos

- pH: Se indica un intervalo permisible de 6.5-7.8, siendo óptimo entre 7.0-7.2.
- Temperatura: Los valores óptimos para régimen mesófilo y termofílico están comprendidos en el intervalo de 35-40 °C y 50-55 °C, respectivamente.
- Potencial amortiguador: Se define como la diferencia entre la alcalinidad total y la concentración de ácidos grasos volátiles. La relación AGV/alcalinidad total debe mantenerse por debajo de 0.3.

B) Requerimientos nutricionales

- Concentración de la carga orgánica inicial: Este requerimiento es dependiente de la estrategia tecnológica que se siga para la digestión. En reactores avanzados puede llegar hasta 40 kg DQOm⁻³ de digestor por día.
- Relación entre la DQO:N:P: Generalmente se asumen concentraciones en la relación 100:5:1. Sin embargo, otros autores han demostrado que para tratamientos anaerobios, esta relación puede oscilar en los intervalos de 100: (1-10): (0-1.5) (Lema, 1986 y Bermúdez, 1988).
- Relación entre DQO:N:P:S: Se recomienda la relación 400:5:1:0,2.
- Sustancias trazas: Algunos oligoelementos, a determinadas concentraciones, son necesarios para el desarrollo de la biomasa, valores por encima de estos umbrales pueden provocar la inhibición del proceso (Tabla. II.1.1.3.1).

Tabla No.II.1.1.3.1: Agentes y concentraciones de inhibición, expresada en mgL⁻¹.

Agente Inhibidor	Concentración inhibitoria
Cobre (II)	100
Cromo (III)	200
Níquel (II)	200 - 500
Sodio	3 500 - 5 500
Potasio	2 500 - 4 500
Calcio	2 500 - 4 500
Magnesio	1 000 - 1 500
Sulfato	5 000
Nitrito	50
Cianuro	25

Fuente: Sánchez, 1986

La toxicidad está relacionada con el pH y la estabilidad termodinámica del compuesto. Para iones poliatómicos, la forma tóxica es la no ionizada, ya que estas moléculas pueden atravesar fácilmente la pared celular bacteriana y una vez dentro pueden de nuevo disociarse, produciendo un cambio de pH interno en la célula. Ejemplos representativos de este efecto es el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y los ácidos grasos volátiles.

II.2.- Reactores Anaerobios:

El desarrollo de tecnologías para el tratamiento anaerobio de los residuales estuvo, desde sus inicios, determinada por sus innegables ventajas técnicas y económicas.

Estudios realizados sobre los costos de inversión de plantas de tratamiento (ver anexos, Fig. 4) muestra que en la medida que aumenta la carga orgánica a tratar son más evidentes los beneficios de los procesos anaerobios sobre los aerobios, inclusive para plantas donde se combinen ambos tipos de tratamientos.

Rodríguez *et. al.* (1997) refieren que para aguas residuales biodegradables, con concentraciones de DQO iguales o superiores a 5 000 mgL⁻¹, las ventajas de los métodos de tratamiento anaerobio están dadas por:

a.- Menor demanda de energía por no ser requerida la aireación.

- b.- Menores requerimientos de nutrientes.
- c.- Producción de metano como un subproducto aprovechable.
- d.- Menor producción de lodos.

Precisamente por esto, a partir de la segunda mitad del presente siglo, se realizó un importante esfuerzo de investigación y desarrollo tecnológico que rindió sus frutos a partir de los años 60 con el surgimiento de reactores que permitieron incrementar la biomasa activa en su interior y desacoplar el tiempo de retención celular (TRC) del tiempo de retención hidráulica (TRH), proporcionando incrementos significativos en la eficiencia a altos valores de carga orgánica.

Noyola (1994), en un estudio sobre el escalado de los reactores anaerobios da la clasificación actual que desde el punto de vista evolutivo los agrupa en tres generaciones:

Reactores de primera generación: En ellos la biomasa se encuentra sedimentada, existiendo un mínimo de contacto con el sustrato, o bien en suspensión sin recirculación de sólidos, derivándose una relación TRC/TRH unitaria. La producción de biogás en estos reactores no sobrepasa $1.5 \text{ m}^3 \text{ biogás.m}^{-3} \text{ reactor}$. Las variantes de estos tipos de digestores se emplean

para el tratamiento de residuos sólidos y la estabilización de lodos. Ejemplos de los mismos son las “Fosas Sépticas”, “Tanques Imhoff”, “Lagunas Anaerobias”, así como los digestores convencionales y los completamente mezclados muy empleados para la estabilización de lodos de purga en las plantas de tratamientos de aguas residuales.

El modelo denominado “Contacto Anaerobio” constituye una transición entre la primera y la segunda generación pues en su diseño se adiciona un sedimentador y un sistema de reciclado de lodos que aumenta la relación TRC/TRH, haciendo el proceso más eficiente y estable (Sánchez, 1986).

Reactores de segunda generación: Tienen como rasgo distintivo un aumento en la retención de microorganismos dentro del reactor. Esto se logra mediante la adhesión a soportes o por su sedimentación. La primera versión de estos reactores fue el “Filtro Anaerobio” dada por Young y McCarty (1969) la cual consistió en una columna empacada de flujo ascendente o descendente. Posteriormente se desarrollaron modalidades más eficientes al ordenar el empaque mediante el uso de soportes tubulares (Berg y Lentz, 1979; Genze y Harremoos, 1983 y Young, 1991). Reactores a gran escala, tal como el filtro anaerobio de 13 000 m³, instalado en la destilería de la corporación Bacardí en Puerto Rico desde 1984, han demostrado la viabilidad de este sistema (Saendrey, 1992).

Lettinga *et. al.* (1980), desarrollaron el sistema UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) o reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente, con características de película fija pero sin material de soporte. Su principio de funcionamiento se basa en la capacidad de sedimentación de la biomasa generada en el interior del reactor lo cual contribuye a minimizar el lavado celular a altas velocidades de carga.

Este sistema fue escalado a mediados de los años 80 en Holanda, manifestándose hasta el presente un aumento significativo del número de plantas de tratamiento con esta tecnología (Alibhac y Foster, 1986; Lettinga, 1991; Figarola, 1992; Ilangovan, 1995 y Briones y Kuppusamy, 1997)

Reactores de tercera generación: Es la más reciente generación de reactores anaerobios, denominada de “Lecho Fluidificado”. Al igual que los de segunda generación han sido concebidos para el tratamiento de residuales líquidos de alta carga orgánica. Estos sistemas contienen los microorganismos en forma de biopelículas adheridas a un soporte que se expande o fluidifica. Los diseños propuestos por diferentes autores (Hecjnen *et. al.*, 1989 y Meraz *et. al.*, 1995) utilizan una corriente de recirculación para provocar un flujo ascendente y fluidificar el lecho de partículas de soporte, que puede ser de arena, material plástico o cerámica. El material de soporte proporciona una gran área superficial sobre la que se adhiere la biopelícula, asegurándose una adecuada sedimentación y retención celular.

A escala comercial se han instalado algunas tecnologías de lecho fluidizado, no obstante debido al nivel de complejidad operacional, aún continúan los estudios a escala de planta piloto.

En las tablas II.2.1, II.2.2 y II.2.3 se indican las ventajas y desventajas planteadas por Noyola (1994) para los reactores de segunda y tercera generación. Como se observa, tienen la ventaja común de admitir altas velocidades de carga volumétrica con altos índices de remoción. Las desventajas están determinadas, fundamentalmente, por las características físicoquímicas de las aguas y la capacidad de amortiguamiento ante variaciones de las condiciones de operación.

Tabla No. II.2.1: Ventajas y desventajas del filtro anaerobio.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Soporta altas cargas orgánicas (15 kg DQO . m⁻³ día⁻¹). • Resistente a picos orgánicos o tóxicos cuando opera con recirculación. • Construcción simple. • Aplicable a pequeña y mediana escala. • Rápidos rearranques sin dificultades operacionales. • Operación simple. • Puede operarse como flujo descendente o ascendente. • Altas productividades (8 m³ biogás .m⁻³ reactor). • Eficiencia de remoción del 85 %. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arranque lento aún contando con inóculo adecuado (3 meses como mínimo). • Riesgo de taponamiento. • Sensible a sólidos suspendidos. • Sensible a aguas que forman precipitados, principalmente en régimen de flujo ascendente. • Alto costo del material soporte. • Costos mayores en tanques cuando se utilizan soportes de piedra. • Presencia de lodos suspendidos en el efluente.

Fuente: Noyola, 1994

Tabla No. II.2.2: Ventajas y desventajas del UASB.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Soporta altas cargas orgánicas (25 kg DQO . m⁻³ Día⁻¹). • Bajo requerimientos de energía. • Construcción relativamente simple. • Arranque rápido con inóculo adecuado. 	<ul style="list-style-type: none"> • La granulación es lenta y de difícil control. • No todas las aguas favorecen la granulación. • Requiere de inóculos con

<ul style="list-style-type: none"> • Proceso ampliamente probado en la práctica. • Aplicable a pequeña y gran escala. • Operación simple comparada con otros reactores de avanzada. • Altas productividades. ($10\text{m}^{-3}\text{biogás} \cdot \text{m}^{-3}\text{reactor}$) • Eficiencia de remoción superiores al 85 %. 	<p>determinadas características.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensible a sólidos suspendidos, grasas y aceites en el influente. • Sensible a aguas que forman precipitados.
--	---

Fuente: Noyola, 1994

Tabla No. II.2.3: Ventajas y desventajas del reactor de lecho fluidizado

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Soporta muy altas cargas orgánicas ($40\text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$). • Soporta aguas con sólidos suspendidos aunque no los remueve. • Con soporte absorbente puede aplicarse a desechos inhibidores. • Soporta picos orgánicos moderados. • Instalaciones compactas. • Altas productividades. ($> 10\text{ m}^3\text{ biogás} \cdot \text{m}^{-3}\text{ reactor}$). • Eficiencias de remoción mayores del 90 %. 	<ul style="list-style-type: none"> • Arranque lento y difícil. • Requerimientos energéticos importantes debido a la fluidificación por bombeo. • Control complejo del proceso. • Difícil su escalado. • Presencia de sólidos suspendidos en el efluente. • Altos costos asociados a soporte (plásticos, carbón activado, etc.) • Poca experiencia a escala industrial. • No soporta períodos prolongados sin alimentación.

Fuente: Noyola, 1994

De manera general la elección de una determinada modalidad tecnológica depende de las características específicas del residual a tratar y de los beneficios económicos que se derivan. Iza *et. al.* (1991), resumen la aplicación en el ámbito industrial de diferentes tipos de reactores avanzados (Tabla II.2.4). Es evidente el predominio de la tecnología UASB lo cual está dado por las ventajas técnico-económicas que se tienen al operar con altos tiempos de retención de la biomasa activa, sin necesidad de emplear soportes para la inmovilización, ni

recurrir a la recirculación de los lodos como alternativa determinante de la estrategia de operación.

Tabla No. II.2.4: Aguas tratadas por procesos anaerobios a escala industrial

Aguas Residuales	Tipo de Reactores			
	Contacto Anaerobico	UASB	Filtro Anaerobio	Lecho Fluidizado
Destilería de alcohol	X	X	X	X
Azúcar de remolacha		X		
Cervecería		X		X
Industria Química		X	X	
Confitería		X		
Producción de Enzimas			X	
Procesadora de pescado		X		
Lixiviado de rellenos sanitarios		X	X	
Procesadora de carne	X	X		
Industria lechera y derivados	X	X	X	
Pulpa de papel		X		
Estiércol de cerdo		X	X	
Refrescos		X	X	X
Almidón	X	X	X	
Agua de trat térmico de lodos			X	
Producción de levaduras	X	X		

Fuente: Iza *et. al.*, 1991

Estudios desarrollados por Lettinga *et. al.* (1983), muestran los bajos costos de inversión y operación relativos para la implantación de esta tecnología. Más recientemente, estudios de oportunidad realizado por Santiesteban (1992 y 1993), para la aplicación de los UASB al tratamiento de vinazas de destilerías, indican una rápida amortización de la inversión inicial con saldos económicos atractivos cuando se consideran diferentes alternativas para el uso del biogás y de los residuales como biofertilizantes. Similares resultados han sido reportados por

Viñas *et. al.* (1995), en el tratamiento de residuales agropecuarios con reactores UASB. Estos autores plantean que el costo de producción de un m³ de metano oscila entre 0.06 y 0.013 USD, pudiéndose recuperar la inversión inicial en un período menor a dos años.

A partir de la presente década se han estudiado algunas modalidades de reactores híbridos donde se combinan elementos tecnológicos de los reactores UASB y los Filtros Anaerobios (Valdés, 1990 y Bello, 1994) así como de reactores convencionales con estos últimos (Wasser *et. al.*, 1995). Otra dirección de desarrollo son los trabajos con cepas celulolíticas, extractos enzimáticos de origen vegetal y la adición de asociaciones metanogénicas para el tratamiento de residuos sólidos agrícolas (Milán y Cruz, 1992; Tirmale y Nand, 1994 y Sudhakar y Nandi, 1994). Además, se presta especial interés al control automático del proceso a escala industrial, mediante el uso de sensores para el control *on line* de iones bicarbonatos (Hawkes *et. al.*, 1995), hidrógeno (Dochain, 1995) y ácidos grasos volátiles (Vanrolleghem, 1995)

Es de esperar avances significativos en la tecnología de la digestión anaerobia. Los recientes logros en las técnicas de Ingeniería Genética avizoran un futuro prometedor al hacer posible dirigir la acción de los microorganismos hacia objetivos predeterminados. La clonación de genes en bacterias, capaces de codificar la producción de enzimas degradadoras de lo que hasta hoy conocemos como compuestos recalcitrantes, y la posibilidad de inducir la producción de metabolitos de alto valor agregado, amplía el campo de desarrollo de esta herramienta de la biotecnología ambiental (Bravo, 1996, Vázquez, 1996 y Burlage *et. al.*, 1996).

II.3.- Biogás

Uno de los beneficios del tratamiento de residuales que aplican la tecnología de la digestión anaerobia es la generación de cantidades apreciables de biogás.

En la composición de esta mezcla (Tabla II.3.1) intervienen como sustancias principales, el metano y el dióxido de carbono, conjuntamente con otras producciones de las diferentes etapas del proceso.

Tabla No. II.3.1: Composición del biogás

Sustancia	%
Metano	55 - 70
Dióxido de carbono	35 - 40
Hidrógeno	1 - 3
Nitrógeno	0,5 - 3
Sulfuro de hidrógeno	0,1 - 3
agua	trazas

Fuente: Stout, 1980

La cantidad de biogás producido así como su concentración de metano, varía en dependencia de la naturaleza del desecho y de las condiciones en que se realiza la fermentación. (Tabla II.3.2)

Tabla No. II.3.2: Biogás a partir de diferentes residuos.

Residuo	m ³ biogás.kg ⁻¹ sustrato	% de metano	TRH
Excreta bovina	0,23 - 0,20	58	10
Excreta avícola	0,46 - 0,54	60	10 - 15
Excreta de cerdo	0,69 - 0,76	60	10 - 15
Hojas forrajeras	0,10 - 0,50	55	29 - 30
Residuos remolacha	0,10 - 0,50	57	14 - 15
Cachaza	0,30 - 0,35	64	25 - 30
Vinaza de destilería	0,50 - 0,80	68	3 - 4
Residual de torula	0,45 - 0,70	65	3 - 4

Fuente: Adaptado a lo reportado por Bermúdez (1995)

Estudios realizados acerca del poder calórico del biogás han posibilitado establecer la equivalencia energética con otras fuentes y las ventajas económicas de su uso en diferentes actividades (Tabla II.3.3 y II.3.4).

Tabla No. II.3.3 : Equivalencia energética del biogás y precio.

Combustible	Equivalente por cada m ³ de biogás / L	Precio / USD
Fuel oil	0,55	68,97 / t
Kerosene	0,75	200,44 / t
Alcohol	1,03	31,44 / hL
Diesel	0,61	182,29 / t

Fuente: Comisión Nacional de Energía, 1998

Tabla No. II.3.4: Consumo de biogás y energía calorífica, considerando un poder calórico de 25,08 MJ..m⁻³ biogás.

Aplicaciones	biogás, m ³ ·h ⁻¹	Energía, MJ . h ⁻¹
Lámpara de capucha	0,100	2,51
Quemador para estufa	0,320	8,03
Quemador para horno	0,420	10,53
Estufa con 4 quemadores y horno	2,068	51,87
Oxicorte	0,250	6,27
Refrigerador de absorción	0,083	2,09

Fuente: Alfonso y Sánchez, 1981.

Por estas razones, la explotación de esta fuente renovable de energía se hace cada vez más atractiva; sobre todo por su incidencia determinante en la reducción de los periodos de amortización de las plantas de tratamiento y los beneficios sociales que representa su aplicación en la cocción de alimentos, alumbrado, cogeneración de energía eléctrica, etc.

En la actualidad el uso del metano se ha extendido a las grandes ciudades de países desarrollados, así por ejemplo, se plantea que alrededor del 30 % del combustible utilizado en los Estados Unidos es metano. Una situación similar se manifiesta en otros países desarrollados de Europa. (Kispert *et. al.*, 1995)

II.4.- Lodos Anaerobios

Es conocido que durante la digestión anaerobia el esquema metabólico que siguen los microorganismos es la fermentación. Este mecanismo, a diferencia de los aerobios, tiene como rasgo distintivo el ser ineficiente en el aprovechamiento de la energía de los sustratos para la síntesis y mantenimiento celular (Stryer, 1995). Noyola (1989), ha señalado que bajo condiciones de anareobiosis, sólo el 10% de la energía es utilizada en la producción de biomasa (ver anexos, Fig.5), razón que explica la baja producción de lodos y es, de hecho, una de las ventajas del proceso como modo de tratamiento de residuos.

Comentario [CEBI1]: D

En cualquier fermentación la cantidad de biomasa generada y la de otros productos, se determina mediante la aplicación de un balance de materiales sustentado en el primer principio

de la termodinámica. Gujer y Zehnder (1983), indican que la tasa de conversión máxima de sustratos a microorganismos es de $0.18 \text{ kg SSV} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DQOr}$. Sin embargo, investigaciones desarrolladas por Hashimoto (1982), demuestran que el rendimiento real de metano puede alejarse sensiblemente de este valor, dependiendo de la edad del inóculo, su procedencia y de las condiciones en que se realice la fermentación.

Por otra parte, el lodo no sólo está constituido por biomasa microbiana, sino también por una fracción importante de cenizas que guarda relación con la composición del sustrato y con el grado de mineralización que se alcance en la digestión.

Debido a esta situación no resulta conveniente arribar a generalizaciones en cuanto a los índices de generación de lodos de los digestores anaerobios. Por esta razón en los estudios de diseños para la recepción y secado de estos productos se recurre a la experiencia. Por ejemplo en el caso particular de la vinaza de destilería digeridas en reactores avanzados, se reporta un valor promedio de $0.10 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DQOr}$ (Pérez *et. al.*, 1985; Sánchez, 1990 y Valdés *et. al.*, 1993).

Estudios realizados sobre la composición de los lodos provenientes del tratamiento de diferentes residuos (Tabla II.4.1) corroboran lo planteado en la literatura acerca de su riqueza en material orgánico y mineral (Guillermo y Leal, 1985 y Eng y Martínez, 1993).

Las mayores diferencias se manifiestan en la composición de oligoelementos siendo, como es de esperar, más alta y variable en los lodos provenientes de aguas albañales.

Los valores extremos y promedios del pH están en correspondencia con el control que se ejerce sobre éste para lograr que la digestión se lleve a cabo eficientemente. En residuos ácidos el ajuste de este parámetro se realiza, generalmente, adicionando suspensión de hidrato de cal, de ahí que deban esperarse concentraciones relativamente altas de iones calcio en el lodo. Trabajos desarrollados por Guyot (1992) refieren la existencia de cantidades no despreciables de este ion en las partículas que conforman los lodos anaerobios.

Las altas concentraciones de nitrógeno, proteína bruta así como la presencia, en cantidades adecuadas, de sustancias con marcado efecto beneficioso en la nutrición animal, han dado lugar a que estos productos sean considerados potencialmente una alternativa para este propósito (Figueroa, 1993; Rodriguez *et. al.*, 1994 y Pérez, 1997).

Tabla No.II.4.1: Composición de los lodos anaerobios

COMPONENTES	U/M	PROCEDENCIA DEL LODO DIGESTADO						
		Aguas Albañales (n=41) *			Residuo Porcino (n=30) **	Vinaza de Destilería (n=27) ***		
		Mín.	Máx.	X	X	Mín	Máx	X
Sólidos Totales	g/L	8,00	11,05	9,25	10,45	6,25	11,30	10,33
Sól. Tot. Volátiles	% bs.	53,80	81,00	6,25	70,60	55,60	85,70	74,10
Nitrógeno Total	% bs.	3,50	6,60	4,95	5,40	3,02	7,00	5,90
N . 6,25	% bs.	21,90	40,90	4,84	33,60	20,50	43,80	37,50
Grasa Bruta	% bs.	-	-	-	-	1,98	3,51	2,30
Fibra Bruta	% bs.	-	-	-	-	5,96	9,70	6,61
.pH	U	6,90	7,60	7,30	7,30	7,00	8,62	7,81
Ca	% bs.	4,70	8,60	6,50	11,90	-	-	-
Ceniza	% bs.	19,00	46,20	37,62	26,40	14,30	40,00	25,61
Ni	mg/kg	10	5 300	50	-	1	92	47
Zn	mg/kg	72	49 000	2 000	190	21	324	173
Mn	mg/kg	60	3 900	500	720	26	427	226
Cr	mg/kg	20	40 600	200	20	2	185	93
Fe	mg/kg	120	12 000	4 600	6 000	641	978	804
Al	mg/kg	13 000	15 000	2 000	1 800	97	925	511
Pb	mg/kg	15	26 000	500	670	20	924	422
Cu	mg/kg	52	117 000	500	2 600	26	854	440

Fuentes: * Ohio Guide (1995; Schmdt y Ahring (1994) y Aspiazó *et. al.* (1997)

** Marcet (1981)

*** Valdés *et. al.* (1991) y Sucromiles S.A. (1997)

Lo anterior reviste mayor fuerza si consideramos, conjuntamente con los beneficios ecológico que representa el reciclaje de estos desechos, el rápido ascenso de los precios de venta de los concentrados proteicos y cereales que conforman la mayor parte del alimento para animales monogástricos (ver anexos, Fig. 6). En este sentido, se ha planteado que en la producción mundial de monogástricos, la alimentación representa del 60-70% del costo total (Rodríguez, 1992).

De manera general los monogástricos dependen del aporte de alimento para asegurar su subsistencia, cuestión que es prácticamente imposible lograr con un solo ingrediente. Por

tanto, la potencialidad nutricional de una materia prima, hay que valorarla dentro del contexto de una dieta balanceada que satisfaga sus requerimientos en energía, proteínas, aminoácidos esenciales, minerales y vitaminas (NRC, 1984; NRC, 1988 y Maylin, 1991).

Otro aspecto importante en la definición de los requerimientos nutricionales es el consumo del alimento y la digestibilidad. Los monogástricos regulan su consumo en gran medida, para cubrir su requerimiento energético; por tanto, el resto de los componentes de un alimento balanceado debe guardar una proporción con el tenor de energía (Blum, 1985 y De Basilio, 1994).

En investigaciones realizadas en lodos anaerobios porcinos procedentes de una planta de tratamiento industrial (Marcet, 1981, 1982 y 1983), se determinó la composición aminoacídica del lodo digerido (Tabla II.4.2). Como se observa están presentes aminoácidos considerados esenciales en la dieta animal. Estos compuestos son liberados durante la biodegradación de las proteínas y una parte consumidos en el metabolismo de las poblaciones microbianas.

Tabla No. II.4.2: Composición de aminoácidos en el lodo digerido porcino. (% b.s.)

Aminoácidos	x	s	Cv/%
Ala	1,02	0,040	3,9
Val	1,06	0,040	3,8
Gly	0,99	0,020	2,0
Ile	0,99	0,080	8,9
Leu	1,39	0,040	2,9
Pro	0,92	0,070	7,6
Trp	0,66	0,060	9,1
Thr	0,08	0,003	3,8
Ser	0,90	0,100	11,1
Met	0,29	0,020	6,9
Phe	1,11	0,090	8,1
Asp	1,39	0,040	2,9
Glu	1,87	0,040	2,1
Tyr	1,09	0,050	4,6

Lys	0,83	0,050	6,0
-----	------	-------	-----

Fuente: Marcet, 1981

López (1994) planteó que en la crianza de cerdos, los aminoácidos lisina, triptófano y metionina son los limitantes pudiéndolo ser también la treonina bajo determinadas condiciones. Estos requerimientos son minuciosamente seguidos en la alimentación avícola (Valdiviá, 1990) donde se tiene estricto control para todas las categorías y tipo de aves (Rodríguez, 1992).

Whalen (1998) indica que el valor de la proteína como nutriente no sólo está determinado por la cantidad y naturaleza de los aminoácidos, sino también por la relación en que se encuentran unos con respecto a otros. En la Tabla II.4.3 se muestran las relaciones de mayor interés nutricional para diferentes fuentes, comparadas con el lodo porcino y lo recomendado en la literatura. Las relaciones encontradas en el lodo anaerobio son comparables con la de otras materias primas y muy cercanas al valor recomendado.

Tabla No. II.4.3: Relación entre aminoácidos esenciales en diferentes fuentes.

Fuente	Lisina:Metionina:Treonina	Referencia
Harina de soya	1 : 0,16 : 0,63	Knoblech, 1989
Harina de pescado	1 : 0,46 : 0,52	Knoblech, 1989
Trigo	1 : 0,46 : 0,92	Knoblech, 1989
Lodo porcino	1 : 0,44 : 0,61	Marcet, 1981
Valor recomendado	1 : 0,45 : 0,60	Whalen, 1998

Marchnin *et. al.* (1983), suministraron a carneros los lodos provenientes de la digestión anaerobia de residuos vegetales inoculados con excreta vacuna. Los porcentajes de inclusión en la dieta oscilaron entre el 15-25 % (base seca), alcanzándose ganancias en peso vivo de 670 g día⁻¹ sin manifestarse afectaciones en la salud animal.

Valdés *et. al.* (1991), determinaron la potencialidad nutricional de los lodos provenientes del tratamiento de vinaza de destilería y residuales azucareros en reactores UASB. Estos autores

encontraron porcentajes de digestibilidad (*in vitro*) del nitrógeno por encima del 95 % con un valor medio de proteína bruta de 34 %. Las cantidades de microelementos en el lodo estuvieron por debajo de lo reportado en la literatura como permisibles para la dieta animal. Esto último se corresponde con los resultados obtenidos por Liebholz (1962), Hedges y Kornogay (1974), Kienhalz (1976) y Beauvuin (1980), al evaluar la posible afectación de los lodos digeridos en la fisiología animal.

Por otra parte, es bien sabido la riqueza que presenta la biomasa resultante de los digestores de biogás en vitaminas del complejo B. Como se ha indicado (ver anexos, Fig. 2) durante el metabolismo de las bacterias metanogénicas intervienen cantidades importantes de cobalamina

(Vitamina B₁₂), llegándose a afirmar que esta vitamina se encuentra en cantidades enormes en los lodos anaerobios (Trevan *et. al.*, 1990). Por otra parte Bermúdez (1995) enfatiza, que como resultado de las fermentaciones de los productos de la hidrólisis de polisacáridos, particularmente en la fermentación acetobutírica, la biomasa microbiana, específicamente el género *Clostridium*, proporciona una valiosa fuente de riboflavina (Vitamina B₂); estos microorganismos no presentan acción tóxica, ni efectos perjudiciales a la salud animal.

La fermentación anaerobia ofrece una drástica reducción de los microorganismos patógenos que abundan en los residuos orgánicos, siendo destruidos en su mayor parte, en el interior de los reactores. Hernández (1988) asegura que el biodigestor anaerobio constituye un avance en el campo sanitario en comparación con el tradicional tanque séptico.

Diversos artículos publicados por la FAO (1987, 1989 y 1993) plantean que el alto grado de saneamiento que se alcanza en la digestión está determinado por la separación física de los organismos en el seno de los reactores y por las condiciones inherentes al proceso.

Un estudio detallado realizado por Marcet (1981) en el lodo anaerobio porcino fresco y después de seco al sol, demuestra que en la digestión es posible remover el 92,65 % de los coliformes totales, llegando al 99,65 % en el lodo seco. Además se estudió la presencia de

Salmonella y *Shigella*, resultando negativas todas las pruebas de Trichuris eggs y Coccidas eggs, a pesar de estar presentes, de manera puntual, en las excretas.

En la Oficina Cubana de Patentes e Inversiones (1998), aparecen registrados los trabajos de Lynn (1976); Seckler *et. al.* (1985); Erikson (1985); Weignandt *et. al.* (1986) y Lasseur *et. al.* (1996), referentes al uso de lodos anaerobios procedentes de excretas vacunas y residuos agroindustriales en la alimentación animal. En todos los documentos, conjuntamente con el aval del valor nutritivo del producto, se indica que su calidad sanitaria cumple con los indicadores establecidos para ser consumidos por animales, siempre que se controlen estrictamente las normas higiénico - sanitarias para la recepción, distribución y oferta al animal. Por su alto contenido en fibra estos lodos son recomendados para la crianza de rumiantes.

II.5. Digestión anaerobia de vinaza de destilería

En Cuba, dada las características de su base productiva, se generan grandes cantidades de residuos tanto agrícolas como industriales, que son susceptibles de ser tratados y aprovechados de forma eficiente con la fermentación anaerobia, generándose múltiples beneficios y permitiendo la conservación del entorno.

Uno de los residuales de mayor impacto para ser sometidos a la digestión anaerobia es la vinaza de las destilerías de alcohol, dado su alto contenido de materia orgánica y los grandes volúmenes que se producen (Tabla II.5.1). De acuerdo a estas características es necesario seleccionar digestores de alta carga, dentro de los cuales el más recomendado según la experiencia nacional e internacional, es el UASB.

Tabla No. II.5.1: Destilerías del Ministerio de la Industria Azucarera.

Destilerías	Produc. Alcohol (hL.día ⁻¹)	Vinaza (m ³ .día ⁻¹)	Carga Orgánica (t . día ⁻¹)
Héctor Molina	500	800	56,0
Habana	500	800	56,0

Heriberto Duquezne	500	800	56,0
Melanio Hernández	700	1 184	77,0
Enrique Varona	500	750	48,8
Antonio Guitera	800	1 360	95,2
Amancio Rodríguez	500	800	56,0
Antonio Maceo	250	416	27,0
Alberto Colina	500	800	56,0
Arnaldo Martínez	200	320	22,4
Jesús Rabí	500	800	56,0
Urbano Noris	500	800	56,0
Total	5 950	9 680	417,4

Fuente: MINAZ, 1995

Este reactor genera de 5 - 10 m³ de biogás . m⁻³ de digestor y tiene un costo de producción de metano de 0,06 - 0,16 USD. m⁻³. Estas y otras ventajas ya señaladas han permitido que hasta principios de la presente década se hayan instalado 205 digestores en el mundo (Tabla II.5.2) con un volumen de digestión de 287 722 m³, de ellos 28 en destilerías.

Tabla No. II.5.2: Volumen de digestión en reactores UASB

Residual	No. de reactores	Volumen/m ³
Destilerías	28	76 000
Fábrica de levaduras	5	9 900
Panaderías	2	347
Cervecerías	30	6 600
Fábrica de caramelos	2	350
Industria química	2	600
Fábrica de chocolate	1	285
Fábrica de ácido cítrico	2	6 700
Fábrica de conservas de alimentos	3	800
Pulpa de café	2	1 300
Productos lácteos	6	2 300
Vinateras	4	1 380
Industria azucarera	19	21 100
Levadura	4	8 550
Fermentaciones	1	750
Jugo de frutas	3	4 600
Producción de fructuosa	1	240

Lixiviados sanitarios	6	2 500
Pulpa y papel	28	87 200
Industria farmacéutica	2	1 720
Pulpa de papa	27	25 600
Industria del caucho	1	650
Lodos albañales	10	10 000
Mataderos	3	950
Fábrica de almidón	16	33 500
Frutas y vegetales	3	2 800

Fuente: Lettinga, 1991

Nacionalmente ya se dan los primeros pasos para el establecimiento de esta tecnología, estando próximo a terminarse una planta en la destilería del CAI "Heriberto Duquezne" de Villa Clara y otras están en proyección.

III.- PARTE EXPERIMENTAL

III.1. Caracterización de la destilería "Nauyú"

El trabajo experimental se desarrolló utilizando la vinaza de la destilería "Nauyú", perteneciente al Complejo Agroindustrial "Enrique Varona", en la provincia de Ciego de Avila. Esta planta se alimenta, fundamentalmente, de las mieles finales del central azucarero "Enrique Varona".

La destilería al igual que el central azucarero, fueron construidos antes de 1959 y vierte sus residuales a través de un canal de aproximadamente 40 Km de largo, al mar en la costa norte de la provincia; este canal atraviesa la cuenca hidrográfica "El Calvario" compuesta, fundamentalmente, de aguas subterráneas que constituyen la fuente de abasto de los poblados "Enrique Varona" y "El Calvario"

En las instalaciones de la destilería se ubica además una planta recuperadora de levadura que produce $3,6 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$ y consume $4,35 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$ de fuel-oil.

Las principales características de la destilería son las siguientes:

- Régimen de fermentación: discontinuo
- Producción de alcohol : $500 \text{ hL} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de miel final : $215 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de vapor : $360 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de fuel-oil : $18,9 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de energía eléctrica : $3 \text{ Mwh} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de ácido sulfúrico : $0,15 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de urea: $0,25 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de fosfato de amonio: $0,5 \text{ t} \cdot \text{día}^{-1}$
- Consumo de aire: $48\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$
- Cantidad de vinaza que vierte: $750 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$

III.2. Análisis Ambientales

Las muestras se tomaron de manera puntual y aleatoria del canal de salida de la columna de destilación durante 30 días, preservándose a 4°C. El intervalo entre el momento del muestreo y las determinaciones analíticas, no excedió las 24 h.

Para la caracterización de la vinaza se realizaron 56 corridas analíticas, con tres repeticiones para cada tipo de análisis, que comprendió la determinación de los siguientes componentes, según los métodos estándares (APHH-AWWA-WPCF, 19987):

- Sólidos totales, volátiles, fijos, disueltos y suspendidos.
- Fósforo total.
- Nitrógeno total.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- pH.
- Acidez total.
- Alcalinidad.
- Acidos volátiles.
- Calcio total.
- Magnesio total
- Sodio total.
- Potasio total.

La temperatura se midió inmediatamente después de tomada la muestra.

III.3. Digestión Anaerobia de la Vinaza

Para esto se utilizaron dos reactores de segunda generación tipo Lecho Empacado de Flujo Descendente, de acuerdo con lo sugerido por Young (1991) (ver anexos, Fig. 7). Se utilizó como soporte piedras de 4-5 cm de diámetro.

La elección de este reactor se basó en la disponibilidad de recursos para su construcción, fácil manipulación y posibilidad de utilizar los resultados, en cuanto a sus porcentajes de remoción de la materia orgánica, para el escalado de cualquier digestor de segunda generación.

Este reactor puede ser alimentado con un flujo descendente o ascendente, con resultados similares. En nuestro caso se opero con un flujo descendente.

El influente es introducido en el medio de fermentación a través de un distribuidor, a fin de lograr la homogenización requerida y evitar fenomenos de canalización dentro del soporte. La función de este último es retener la biomasa en el interior del reactor, minimizando el lavado celular.

El lodo generado sedimenta en la zona inferior y es extraído periódicamente, mediante una válvula, para su análisis posterior.

Se empleó como inóculo excretas vacunas frescas, diluidas en agua a partes iguales. Esta decisión se tomó atendiendo a la recomendaciones de diferentes autores respecto a la buena calidad de este inóculo, pues contiene en cantidades suficientes las bacterias participantes en el proceso. (Alfonso y Sánchez, 1981; Hashimoto, 1982 y Hernández, 1988).

La carga de los digestores se realizó llenando su interior con el inóculo y una vez comprobada la producción de biogás por el método de la llama (Rodríguez *et. al.*, 1997), se adicionó $0,010 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$ del residual neutralizado con suspensión de hidrato de cal (10 % m/v), hasta completar un volumen de $0,200 \text{ m}^3$. El tiempo transcurrido desde la carga hasta la etapa final de la adaptación fue de 60 días.

Los parámetros de operación fueron los siguientes:

- Régimen de trabajo: semicontinuo, alimentandose 3 veces cada 24 h.
- Carga orgánica aplicada: 3,25 kg · día⁻¹ de DQO.
- Velocidad de carga orgánica volumétrica: 16,25 kg · m⁻³ reactor · día⁻¹
- Volumen de digestión: 0,200 m³.
- Concentración del influente (vinaza diluída): 16,25 kg · m⁻³ de DQO.
- Flujo de alimentación: 0,200 m³ · día⁻¹.
- Tiempo de retención hidráulico: 1 día.
- pH del influente: 7,00
- Volumen de recirculación del influente: 0,05 m³ · día⁻¹.

El efluente de los reactores se caracterizó de igual forma que la vinaza; excluyendo los análisis de acidez total, alcalinidad, sólidos disueltos y suspendidos.

El lodo se caracterizó mediante la determinación de: sólidos totales, sólidos volátiles, nitrógeno total y pH (APHH-AWWA-WPCF, 1987) y cenizas, fibra bruta y grasa bruta (AOAC, 1980).

La eficiencia de la remoción de la materia orgánica se calculó (n=20) determinando la DQO del influente y del efluente, mediante la expresión:

$$\% \text{ Eficiencia} = \frac{\text{DQO}_{\text{influyente}} - \text{DQO}_{\text{efluente}}}{\text{DQO}_{\text{influyente}}} \cdot 100$$

Los resultados fueron procesados estadísticamente mediante el cálculo del valor medio (x), la desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (Cv).

III.4. Viabilidad económica

Además de los análisis anteriores, se tomó la información suministrada por Lettinga (1991) sobre el estimado de los costos de operación y producción de metano para un reactor industrial tipo UASB (Tabla III.4.1) y la revisión del estudio realizado por Santiesteban (1992), para una planta de características similares

Tabla No. III.4.1: Estimación de los costos de operación y producción de metano para una planta industrial, tipo UASB.

Bases y supuestos de la estimación		
Carga DQO	10 y 15 kg · m ⁻³ ·día ⁻¹	
Eficiencia del tratamiento	90 % de reducción de DQO	
Rendimiento de metano	0,9 kg DQO-matano·kg ⁻¹ DQO removido	
Producción de metano (m ³ /m ³ r/año)	1 550 con carga de 15 kg DQO·m ⁻³ ·día ⁻¹ 1 030 con carga de 10 kg DQO·m ⁻³ ·día ⁻¹	
Intereses y depreciación	15 % del costo de capital	
Mantenimiento y reparación	2 % del costo de capital	
Demanda de energía	10 % de la producción de metano	
Costo de inversión	Planta de 1000 m ³ -500 000-750 000 USD de 5 000 m ³ -- 2 000 000-3 000 000 USD	
Costos de operación (en USD 1 000 x)		
I.-Operación continua (365 días·año ⁻¹ , 24 horas·día ⁻¹)		
	Planta de 1 000m ³	Planta de 5 000 m ³
Intereses + depreciación	75 - 112,5	300 - 450
Mantenimiento + reparación	10 - 15	40 - 60
Producción + supervisión	15	40
Análisis + control	15	40
Costo total	115 - 147,5	420 - 500
Costo del gas metano (USD/m ³ STP) (producción neta)		
1. Carga: 15 kg DQO·m ⁻³ ·día ⁻¹	0,080 - 0,105	0,060 - 0,085
2. Carga: 10 kg DQO·m ⁻³ ·día ⁻¹	0,125 - 0,160	0,090 - 0,125
II.-Operación continua (365 días·año ⁻¹ , 24 horas·día ⁻¹)		
	Planta de 1 000m ³	Planta de 5 000 m ³
Intereses + depreciación	75 - 112,5	300 - 450
Mantenimiento + reparación	3 - 5	15 - 20
Producción + supervisión	5	15
Análisis + control	5	15
Costo total	88 - 127,5	335 - 500

Costo del gas metano (USD/m ³ STP)		
1. Carga: 15 kg DQO·m ⁻³ ·día ⁻¹	0,250 - 0,360	0,190 - 0,290
2. Carga: 10 kg DQO·m ⁻³ ·día ⁻¹	0,380 - 0,550	0,290 - 0,430

Fuente: Lettinga, 1991

Los costos se actualizaron según los índices anuales de Marschall y Stevens que aparecen publicados en Chemical Engineering Journal (1998).

En el cálculo de los costos se utilizó el método del coeficiente de escala que parte de la ecuación:

$$I_2/I_1 = (S_2/S_1)^a$$

Donde: I₁ e I₂: Costo de Inversión

S₁ y S₂: Capacidad de la planta

a: Coeficiente de escala

Se tomó a= 0,6 por ser el coeficiente de escala promedio que se emplea en la industria química y las plantas de procesamiento de residuos (Peters y Timmerchaus, 1969).

Teniendo en cuenta las características del lugar donde se localiza el vertimiento del residuo así como los intereses de la dirección del Complejo Agroindustrial "Enrique Varona", se analizará la implementación de un sistema integral que contemple el uso del biogás, los lodos y los efluentes líquidos. En el caso particular de los lodos se considera su uso sólo en la alimentación de animales monogástricos, debido a su bajo contenido en fibra y la presencia de otros componentes importantes para este tipo de animal.

Para la evaluación económica del sistema integral se consideran los indicadores: costo de inversión, valor de la producción, costo de operación, ganancia, relación ganancia/costo de operación, tasa de rentabilidad y período de recuperación.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSION

IV.1. Composición de la vinaza

Como resultado de la caracterización de los efluentes de esta planta, se obtuvo la composición de la vinaza (Tabla IV.1.1). Como se observa, estas aguas presentan altas concentraciones de materia orgánica, sales y propiedades ácidas acusadas. El valor medio de la temperatura de salida fue de 98,31°C con un coeficiente de variación de 9 %. A pesar de esto, nunca se han realizado estudios que pudieran medir su impacto sobre el medio ambiente y fundamentalmente, sobre la salud humana y los suelos los que casi en su totalidad se ocupan en el cultivo de la caña de azúcar.

Tabla No.IV.1.1: Composición de las vinazas (n=56) de la destilería Nauyú

Componente	x (kg.m ⁻³)	Cv (%)
Sólidos totales	74,670	14,52
Sólidos totales volátiles	56,920	18,95
Sólidos totales fijos	17,780	14,31
Sólidos totales disueltos	71,580	15,19
Sólidos totales suspendidos	2,710	64,07
Sólidos disueltos fijos	17,070	15,33
Sólidos disueltos volátiles	54,450	19,56
DQO	65,000	20,23
Fósforo	0,065	21,30
Nitrógeno	0,590	13,57
Nitrógeno orgánico	0,598	9,55
pH	4,640	4,44
Acidez total	4,650	17,25
Alcalinidad (pH = 3.8)	4,450	16,00
Calcio	1,880	13,55
Magnesio	1,020	18,24
Sodio	2,210	17,01
Potasio	6,400	19,28

Estas características convierten a la destilería Nauyú en un punto focal de contaminación ambiental, donde la aplicación de un sistema integral de tratamiento y aprovechamiento de sus residuos permitiría:

- Eliminar el vertimiento de residuales agresivos sobre suelos y aguas costeras de la zona norte de la provincia de Ciego de Avila.
- Obtener energía en forma de biogás, que al utilizarse en el propio proceso de obtención de alcohol, ahorraría una cantidad considerable de combustible, optimizando los índices técnico-económicos de producción.
- Generar como subproducto determinadas cantidades de lodos estabilizados con potencialidad para ser usados como alimento animal.
- Convertir la vinaza luego del tratamiento, en un líquido con baja carga orgánica factible a ser usado para el fertiriego de los campos de caña.

IV.2. Digestión Anaerobia de la vinaza

Los resultados de la evaluación del grado de remoción de la materia orgánica arrojaron como promedio un valor de 88 % con un coeficiente de variación del 12 %. Esto confirma lo planteado acerca del alto grado de eficiencia que es posible alcanzar con esta generación de reactores. (Young y Mac Carty, 1969; Lettinga y Hulshoff, 1991; Young, 1991; Monroy, 1997 y Rodríguez *et. al.*, 1997)

La composición del efluente líquido (Tabla IV.2.1) muestra las bajas concentraciones de sólidos totales y de carga orgánica a la salida del reactor, correspondiéndose con la eficiencia alcanzada en el proceso.

En los lodos (Tabla IV.2.2) más del 75 % de los sólidos son de naturaleza orgánica, siendo llamativo el alto contenido de proteína bruta (40 %) y las bajas concentraciones de fibra

bruta (8 %), estos valores se encuentran en los intervalos recomendados para la alimentación de monogástricos. (Figuroa y Ly, 1990; Rodríguez, 1992 y Figuroa 1993).

Tabla No. IV.2.1: Composición del efluente (n=20) del digestor de vinaza de la destilería "Nauyú".

Componente	x / kg · m ⁻³	Cv / %
Sólidos totales	4,74	10,30
Sólidos totales volátiles	1,18	8,55
Sólidos totales fijos	3,55	9,87
DQO	1,80	8,47
Nitrógeno	0,15	11,45
Fósforo	0,02	13,76
Potasio	1,40	17,45
Sodio	0,54	15,00
Magnesio	0,10	16,45
Calcio	0,50	10,30
Sulfato	0,20	9,67
.pH	7,10	5,20

Tabla No. IV.2.2: Características del lodo anaerobio (n=20) de las vinazas de la destilería "Nauyú".

Componente	x / %	Cv / %
Sólidos totales	15,00	12,45
Sólidos totales volátiles	76,80	7,95
Cenizas (b.s.)	23,10	10,00
Nitrógeno (b.s.)	6,40	7,54
Proteína bruta (N . 6,25)	40,00	7,54
.pH	7,30	4,90

Fibra bruta (b.s.)	8,00	10,50
Grasa bruta (b.s)	3,15	12,48

IV.3. Propuesta de un sistema de tratamiento con reactores UASB

Considerando las ventajas anteriormente señaladas de la tecnología UASB y la posibilidad de utilizar los resultados obtenidos en las pruebas a escala de banco con digestores de lecho empacado, se propone la implementación de esta tecnología para el tratamiento de la vinaza de la destilería "Nauyú".

El esquema de este tipo de reactor se ilustra en la Fig. 8 (ver anexos). En su parte inferior existe un sistema que permite distribuir homogéneamente el agua residual hacia el lecho de lodos, donde se realiza la digestión de la materia orgánica. La distribución adecuada de la alimentación garantiza uniformidad en el flujo; esto disminuye las probabilidades de tener caminos preferenciales que originan la presencia de zonas biológicamente inactivas.

Debido al flujo ascendente y a la producción de biogás, la biomasa que forma el lecho se expande en cierto grado. Esto permite por una parte, un mayor contacto entre el lodo y la materia orgánica, favoreciendo su degradación y por otra, promueve el desarrollo de agregados de biomasa con buenas características de sedimentación, lo cual evita que sea lavada con el efluente. Los microorganismos se agregan en forma de "pellets" de aproximadamente 1 a 3 mm de diámetro, o en su defecto, se aglomeran en flóculos de alta sedimentabilidad.

En la parte superior, existe un separador de tres fases cuya función es permitir la sedimentación de las partículas suspendidas así como facilitar la liberación del biogás. De este modo se obtiene un efluente clarificado, se favorece la retención celular dentro del reactor y el biogás producido se puede almacenar para su uso posterior.

De acuerdo con el proceso tecnológico establecido por Lettinga (1991), el volumen total de vinaza que se genera diariamente ($750 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$), debe ser tratado previamente para aumentar su pH a un valor de 7,00. Esta operación se realiza en tanques neutralizadores mediante la adición de suspensión de hidrato de cal al 10 % (m/v).

Al mosto neutralizado se adiciona agua con el fin de disminuir la DQO hasta un valor de 16 kg/m^3 , que es la carga de trabajo del digestor, diluyéndose aproximadamente más de cuatro veces; luego pasa a los tanques buffer donde se homogeniza y se completa la dilución.

La vinaza tratada es bombeada a los reactores UASB donde se efectúa el proceso de digestión anaerobia, obteniéndose biogás y un volumen de efluente igual al de entrada. El biogás producido se le elimina la humedad y pasa a los sistemas de almacenamiento para su uso posterior.

El efluente va a un filtro rotatorio, en el cual se separa la fracción líquida de la sólida. La parte sólida se transporta hacia el área de secado conjuntamente con los lodos de purga de la planta. Del total de la parte líquida, un porcentaje se recircula al proceso y el resto pasa a la cisterna de almacenamiento, para su uso final.

Para residuales líquidos de alta carga, el volumen de digestión se determina por la relación entre la carga orgánica a aplicar y la velocidad de carga volumétrica. Esta relación, conjuntamente con el resto de los parámetros operacionales, es la siguiente:

- Carga orgánica total a aplicar: $48\,750 \text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$
- Velocidad de carga orgánica volumétrica: $16,25 \text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{día}^{-1}$
- Volumen de digestión: $3\,000 \text{ m}^3$
- Carga orgánica de la vinaza: $65 \text{ kg DQO} \cdot \text{m}^{-3}$
- Flujo de vinaza: $750 \text{ m}^3 \cdot \text{día}^{-1}$

- Flujo de alimentación : 3 000 m³
- Volumen de digestión: 3 000 m³
- Flujo de alimentación: 3 000 m³
- Tiempo de retención hidráulico (TRH): 1 día
- Eficiencia del tratamiento: 90 % de reducción de la DQO
- DQO inicial: 16 kg·m⁻³
- DQO final: 1,6 kg·m⁻³
- Volumen de efluente (líquido): 2 250 m³·día (821 250 m³·año⁻¹)
- Volumen de efluente recirculado (25 %): 750 m³·día⁻¹)
- Producción de metano: 12 739 m³·día⁻¹ (4 650 000 m³·año⁻¹)
- Producción de lodo húmedo (12 - 15 % de materia seca): 27 m³·día (9 855 m³·año⁻¹)
- Producción de lodo seco: 4,0 t·día⁻¹ (1 460 t·año⁻¹)

IV.4. Viabilidad económica de un sistema integral para el tratamiento de la vinaza.

Los costos de inversión de una planta UASB dependen de su tamaño, las características del residual a tratar, el equipamiento auxiliar, facilidades de postratamiento, entre otros aspectos. Se ha demostrado que en el costo influye notablemente la situación local.

Teniendo en cuenta que el consumo energético es bajo y que la operación no es compleja, los costos totales de operación son bajos; esto unido a nuestro clima tropical donde la producción de metano se maximiza, hace que la digestión anaerobia con estos reactores se convierta en una alternativa atractiva desde el punto de vista técnico-económico y social.

Aunque los costos de producción unitarios, por la incidencia del principio de economía de escala, sean menores para la operación con un solo digestor 3 000 m³, se decide utilizar tres unidades de 1 000 m³ cada uno. Esto se debe a que un reactor UASB de 3 000 m³ puede

confrontar problemas operacionales debido a que su altura excede los 7 m, lo que da lugar a que la distribución para la alimentación sea costosa y compleja. Además, se corre el riesgo de no distribuir uniformemente la carga, ocasionando la formación de zonas muertas y canalización.

Cálculo del costo de inversión

Tomando como base la planta de 5 000 m³ (Tabla III.4.1) y el valor promedio de su costo de inversión, se tiene:

$$I_{(3\,000\text{m}^3)} = (3\,000/5\,000)^{0,6} * 2\,500\,000$$

$$I_{(3\,000\text{m}^3)} = 1\,840\,055 \text{ USD}$$

Para actualizar este valor con los índices de costo, tenemos:

$$I_{(\text{actual})} = I_{(3\,000\text{m}^3)} * I_{(1997)} / I_{(1991)}$$

$$I_{(\text{actual})} = 1\,840\,055 * 382,3 / 361,3$$

$$I_{(\text{actual})} = 1\,947\,005 \text{ USD}$$

Según Santiesteban (1992), para una planta UASB de igual tamaño cuyo costo total era de 1 900 000 (60 % divisas y 40 % moneda nacional), dado los cambios económicos sufridos en el tiempo transcurrido y conociendo las características de este tipo de instalación, se estima que el valor calculado se corresponde con la realidad y cumple con los requisitos para este trabajo. Este valor incluye el costo del quemador de la caldera y sus accesorios así como el área de secado solar de los lodos digeridos. El costo de inversión por m³ de biogás a producir es de 0,35 USD.

Por lo anterior el costo de inversión en MN puede considerarse como un 20 % del total, para el pago de la mano de obra, fundamentalmente.

Cálculo del costo de operación:

Para esto se toma como base que la instalación trabajará en régimen continuo, o sea 365 días/año y $24 \text{ h}\cdot\text{día}^{-1}$. Teniendo en consideración los costos de las plantas de $1\ 000$ y $5\ 000 \text{ m}^3$, se arriba a:

a) Depreciación + intereses:	220 806 - 331 209 USD
b) Mantenimiento + reparación:	29 400 - 44 161 USD
c) Producción + supervisión:	29 440 USD
d) Análisis y control:	29 440 USD
Costo total estimado:	309 126 - 434 250 USD
Costo total actualizado:	327 093 - 459 490 USD
Costo promedio:	393 292 USD

En el costo de producción se incluye la fuerza de trabajo, el consumo de electricidad y el agua. Las plantas UASB trabajan en un sistema automatizado por lo que los gastos en fuerza de trabajo son bajos.

Por las características de este tipo de instalación las partidas a y b se comportan como fijas y las c y d como variables, por lo que:

Costo fijo promedio actualizado:	330 989,5 USD
Costo variable actualizado:	62 302,3 USD
Costo variable unitario	0,013 USD

Tomando en consideración que la producción de metano en este tipo de reactor, es de $1\ 550 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}_{\text{reactor}}\cdot\text{año}^{-1}$, se obtiene un volumen de producción de $12\ 739 \text{ m}^3$ de metano $\cdot\text{día}^{-1}$, lo que es igual a $4\ 550\ 000 \text{ m}^3\cdot\text{año}^{-1}$, infiriéndose que el costo unitario oscila entre $0,070$ y $0,098 \text{ USD}\cdot\text{m}^{-3}$. Esto se corresponde con lo reportado por Lettinga (1991); para el biogás (60 % de metano) el costo unitario sería de $0,042 - 0,059 \text{ USD}\cdot\text{m}^{-3}$.

Valor de producción

El biogás, el lodo y el efluente líquido, pueden ser utilizados de diferentes formas. Para el caso de la destilería "Nauyú", por las razones anteriormente indicadas, se propone el sistema ilustrado en la Fig. 9 (ver anexos)

Biogás: Según los reportes energéticos 1 m³ de biogás equivale a 0,55 L de fuel-oil. Los 7 500 000 m³ de biogás que se producen por año, representan 4 262 500 L de fuel-oil. Teniendo en cuenta que la densidad de esye último es de 1 020 kg·m⁻³, se reportaría un ahorro

anual de 4 349 t de combustible, que a un precio de 68,97 USD/t, arroja un valor de 299 950 USD·año⁻¹. Esta cantidad de biogás permite sustituir el 63 % del combustible que se consume en la caldera.

El comportamiento del valor de la producción de biogás se ve influenciado notablemente por la baja del precio del petróleo en los últimos tiempos, lo que hace que su precio esté por debajo del costo unitario de producción. Esto obedece además a las propias características del sistema donde no puede fijarse un precio de venta que amortigüe los costos.

Lodos: Acorde con su composición, este producto presenta potencialidades para la alimentación de cerdos y aves, como fuente de proteínas, sustituyendo parte de la soya que se emplea en la formulación de los piensos. Por las características puntuales de cada dieta, se analizan los ahorros que se obtendrían con su uso en diferentes tipos y categoría animal.

a) Alimentación de aves:

Para un sistema de alimentación convencional a base de soya, trigo y suplementos minero-vitamínicos; la cantidad de soya requerida para la crianza de gallinas ponedoras y pollos de ceba, según UECAN (1985) es de:

Gallina Ponedora: 10 kg·animal⁻¹

Pollo de Ceba: 1,05 kg·animal⁻¹

La cantidad de lodo que se genera anualmente en la planta de tratamiento (1 478 t) permite alimentar 739 000 gallinas o 7 038 095 pollos, sustituyéndose el 20 % de soya en la dieta. Esto permite ahorrar 1 478 t de soya con un valor de 372 456 USD ($252 \text{ USD} \cdot \text{t}^{-1}$ soya).

b) Alimentación de cerdos:

b.1) Alimentación convencional:

Los requerimientos porcinos (NRC, 1988), establecen que como media, independientemente de la categoría, los cerdos consumen de 4 - 4,5 % de su peso vivo en materia seca por día. Una explotación bien organizada, bajo un sistema de alimentación eficiente, permitiría obtener una tonelada de carne limpia a partir de 5,5 - 6,0 t de alimento.

La cantidad de alimento que consume un cerdo, desde el destete (8 kg) hasta el sacrificio (90 kg), es de 328 kg de materia seca lo que equivale a 364,4 kg en base húmeda. Si consideramos como promedio, un 20 % de inclusión de soya en la dieta, esto representa un consumo de 74 kg por animal. De esta forma, si asumimos que el lodo puede sustituir el 25 % de la soya, esto permitiría alimentar 79 892 animales, ahorrándose un valor igual al caso de las aves.

b.2) Alimentación no convencional:

El cerdo es la especie más indicada para lograr, en el menor tiempo posible, incrementos en la producción de carne, debido a su alta productividad y fácil adaptación al consumo de alimento no convencionales (Figueroa y Ly, 1990).

En nuestro país se han desarrollado tecnologías de alimentación en base a mieles de caña, soya y suplementos minero-vitamínicos.

En la tabla IV.4.1 se muestran los componentes de 3 posibles variantes de alimentación para la etapa de la ceba donde el lodo se incluye en diferentes proporciones. En todos los casos se consideró constante el consumo de alimento y la proteína bruta.

Tabla No. IV.4.1: Variante de dietas no convencionales para la ceba porcina

empleando los lodos anaerobios.

Alimento/kg	100% S - 0% L	75% S - 25% L	50% S - 50% L	25% S - 75% L
Harina de soya	0,860	0,645	0,430	0,215
Lodo anaerobio	-	0,229	0,453	0,676
Miel B	2,300	2,391	2,371	2,359
Premezcla	0,030	0,030	0,030	0,030
Fosfato dicálcico	0,014	0,014	0,014	0,014
Sal común	0,014	0,014	0,014	0,014
Proteína bruta	0,360	0,360	0,360	0,360

S- soya

L- lodo

De acuerdo con esta propuesta, podrían obtenerse los siguientes resultados: (Tabla IV.4.2)

Tabla No. IV.4.2: Consumo de soya por animal en la ceba y ahorros con suplementación de lodo.

Indicadores	Lodo / %			
	0	25	50	75
Consumo de soya (kg por animal)	129	96,75	64,50	32,25
Ahorro de soya (kg por animal)	-	32,50	64,50	96,75
Ahorro en valor (USD por animal)	-	8,12	16,25	24,38
Cant. de animales a alimentar por año	-	17 467	8 830	5 917
Cant. de animales alimentados por año	-	34 934	17 660	11 834
AHORRO TOTAL	-	238 664	286 975	288 512

Como se observa, los ahorros totales cambiando el porcentaje de inclusión del lodo en la dieta son bastante aproximados, esto se debe a que la cantidad que se produce es constante, de aquí que el factor de variación para todos los casos es la cantidad de animales a alimentar en dos cebas anuales. Para los cálculos se tomó un período de 150 días, que es el tiempo promedio para alcanzar el peso de sacrificio, en un sistema no convencional de alimentación.

Efluente líquido: Según los resultados obtenidos el contenido promedio de nitrógeno, fósforo y potasio en el efluente líquido es: 0,0226; 0,00098 y 0,154 %, respectivamente; con coeficientes de variación inferiores al 17 %.

Considerando un volumen anual de 821 250 m³ de residual líquido, se obtienen los siguientes resultados:

N	Contenido (t · año ⁻¹)		Fertilizante equivalente (t · año ⁻¹)		
	P	K	Urea	S.S.	KCl
125,4	17,45	1 149,7	272,6	87,25	3 026,0

Para establecer la equivalencia se tuvo en cuenta que:

Urea: 46 % de nitrógeno

S.S: superfosfatos simple, 20 % de fósforo

KCl: cloruro de potasio, 38 % de potasio.

Teniendo en cuenta el precio unitario equivalente de los fertilizantes, el valor total del ahorro anual viene dado por:

	Cantidad Anual (t)	Precio unitario (USD·t ⁻¹)	Valor Total
Urea	272,6	154,42	43 457,8
S.S	87,2	64,33	5 612,7
KCl	3 026,0	105,63	319 636,38
Total	3 385,8		368 706,88

El empleo de estos efluentes en el fertiriego de las áreas cañeras del CAI "Enrique Varona", conllevan a un ahorro de 368 706, 8 USD por concepto de importación de fertilizantes químicos. En este estimado se asume que los rendimientos en caña se mantendrán, sin embargo, la aplicación sistemática y adecuada de estas aguas no excluye la posibilidad de aumentos en los rendimientos con el tiempo (CNB, 1993). No obstante, por su alto contenido de potasio se recomienda que estos no se suministren en dosis mayores de 100 m³·ha⁻¹ en un solo riego, preferiblemente antes de la siembra, pudiéndose beneficiar unas 1 098 ha/año, que es aproximadamente el área cañera de este complejo agroindustrial. Otro elemento a considerar es la cantidad de agua que se ahorra, la que representa unos 438 519 m³ · año⁻¹.

De forma general el valor de la producción anual para cada uno de los productos de los reactores arroja los siguientes índices (Tabla IV.4.3):

Tabla IV.4.3: Valor anual de la producción

Producto	Usos	Valor de la producción/ M USD
Biogás	Combustible	299,950
Lodo	Alimento animal	372,456
Efluente	Fertiriego	368,706
Total	-	1 041,112

Resulta de interés notar que más del 70% del valor total de la producción se corresponde con el aprovechamiento de los lodos y los efluentes líquidos, incidiendo determinadamente en el beneficio total de la producción.

En la tabla IV.4.4 se muestran los valores de los indicadores considerados para el análisis de la viabilidad económica del sistema integral.

Tabla No. IV.4.4: Indicadores económicos

Indicadores	Valor/M USD
A. Costo de Inversión	1 947,00
B. Valor de la producción	1 041,11
C. Costo de operación	393,29
D. Ganancia	647,81
E. Relación D/C	1,65
F. Tasa de rentabilidad (D/A)	0,33
G. Período recuperación (A/D) /año	3,00

Como se observa las alternativas de tratamiento y aprovechamiento consideradas, a la luz de los indicadores estáticos estimados, proporcionan un sistema factible de ejecutar. Existen elementos que inciden tanto en el costo como en el valor de la producción pudiendo influir en estos resultados. No obstante en su carácter de estudio de viabilidad, la información obtenida permite sentar bases sólidas, para estudios posteriores más profundos y detallados.

Es innegable que todo esfuerzo que se realice en aras de eliminar focos de contaminación ambiental y que a su vez permita obtener beneficios económicos, más si sustituyen insumos

importados, constituye un motor impulsor para desarrollar con mayor eficiencia nuestra economía.

5.- CONCLUSIONES

1- El estado actual del conocimiento de la digestión anaerobia permite la implementación de sistemas técnicamente avanzados, para el tratamiento de residuales de alta carga, perfilándose como líneas de desarrollo el perfeccionamiento de tecnologías de inmovilización de bacterias y la introducción de técnicas de mejoramiento genético.

2- La calidad proteica, vitamínica y sanitaria de los lodos anaerobios, hacen que puedan ser considerados una fuente potencial para la alimentación animal.

3- El sistema integral para el tratamiento y aprovechamiento de la vinaza de la destilería "Nauyú", constituye una alternativa técnico-económica atractiva, sostenible y sustentable dado los beneficios que se alcanzan con su implementación, siendo aplicable al resto de las destilerías del MINAZ.

4- La información obtenida permite elaborar un proyecto para la gestión de financiamiento, nacional o internacional.

6.- RECOMENDACIONES

Continuar los trabajos de caracterización de los lodos anaerobios e introducirlos en pruebas de comportamiento animal.

7. -BIBLIOGRAFIA

Alfonso, F. y S. Sánchez (1981): Tecnología para el aprovechamiento del biogás, A.G.T., Ed. S.A., México, 260 p.

Alibhai K.R. and E.F. Foster (1986): "An examination of granulation process in UASB Reactors". In *Env. Tech. Lett.*, 7:2 193 - 2 200 p.

AOAC (1980): *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*, 13 Edit. Washington D.C., EUA.

APHH-AWWA-WPCF (1987): *Estándar Methods for the examination of water and wastewater*, XVII Edición, Washington, D.C., EUA.

Aspiazu, J., E. Moreno, E. Andrade, J. Miranda, S. Citalán, G. Moeller and F. Soler (1996): "Analysis of sludge using proton induced X ray emission" In *Rev. Int. De Cont. Amb., Cent. Inv. En Gen. y Medio Amb., Univ. Tlaxcala*, 12:1 p.

Beauduim, J. (1980): "Animal food and wastewaters". In *Journal of Animal Science*, 50:4:328 p.

Berg L. and C.P. Lentz (1979): "Comparason between up and down flow anaerobic fixed film reactors of varying surface-to-volumen ratios for the treatment of bean blanching waste". In *Proc. 34 th Purdue. Indust. Wast, Conf.*, 319-325 p.

Bermúdez, J.J. (1988). "Stability of a downflow anaerobic fixed-film reactor to feed charge". In *App. Microb. Bioth.*, 27:501-506 p.

Bermúdez, R.C. (1995): "Aprovechamiento biotecnológico de residuos por fermentación anaerobia, en obtención de biogás y otros metabolitos". Curso de postgrado, ESPOCH, Riomamba, Ecuador.

Bermúdez, R.C., W. Valdés y E. Díaz (1993): *Compilación bibliográfica sobre fermentación anaerobia en la producción de biogás*, Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Univ. de Oriente, Cuba.

Blum, J.C. (1985): Alimentación de los animales monogástricos. Cerdos, Conejos y Aves, Ed. mundi-prensa, Madrid, España, 283 p.

Bello, R. (1994): "Anaerobic digestion of waste-water from caffè processing plants, a review of the process implementation at an industrial level". In BIOGAS-FORUM, Ed. Borda, 3:58:4-11 p.

Bravo, Alejandra. (1996): "Biopesticidas". In *VII Curso Avanzado sobre procesos biotecnológicos, Biotecnología Ambiental. Compendio de Artículos*. Morelos, México.

Briones R. y I. Kuppasamy (1997): "Tratamiento anaerobio de efluentes textiles empleando un reactor EGSB". En Memorias, VII Cong. Nac. De Biotec. y Bioing. y II Simp. Int. Sobre Ing. de Bioproc., México, 245 p.

Brock T.Q. and M.T. Madigan (1991): Biology of Microorganism, Edit.Prentice-Hall, 6 th Ed., 325 p.

Bryant, M.P. (1968): "Hydrogen oxidizing, methano bacteria". In J. Bact., 95: 1 118 - 1 123 p.

Burlage, R.S.; Z. Yang and Tonia Mehlhorn (1996): "Reprinted from GENE, an international journal focusing on gene cloning and gene structure and function." In VII Curso Avanzado sobre procesos biotecnológicos, Biotecnología Ambiental. Compendio de Artículos. Morelos, México.

Chemical Engineering Journal (1998): Plant Cost Index, De Mc Graw-Hill Companies, London, 188 p.

Chung, Y.C. and J.B. Neethling (1990): "Viability of anaerobic digester sludge". In J. of Environ. Eng., 116:2:331-335 p.

Comisión Nacional de Energía (1998): Tablas de equivalencia de biogás a los precios actuales de combustible, MINBAS (Inédito) Centro de Ref. Biblioteca del MINBAS, La Habana, 8 p.

De Basilio, V. (1994): Encuentro Regional de Monogástricos, Memorias, Inst. de Ciencia Animal - Univ. Central de Venezuela, La Habana, 238 p.

Dochain D. (1995): "Recent approaches for the modelling monitoring and control of anaerobic digestion processes". In International Workshop on Monitoring and Control of Anaerobic Digestion Processes. December, 6th and 7th. USD, 85-89 p.

Elías A. (1997): "Procesos biotecnológicos a emplear en la producción de alimentos". Sem. Cient. Intern., Resúmenes, Inst. de Ciencia Animal, 216-217 p.

Eng, F. y T S. Martínez (1993): "Propiedades agrobiológicas de lodos procedentes de la digestión anaerobia de vinazas de destilería". En Rev. ICIDCA, 27:1:32-40 p.

Erickson, L.G. and H.E. Worne (1985): "Bio-protein feed manufacturing method", Patente Nro. 4041182, EEUU.

FAO (1987): "Tecnología y utilización del biogás". En Boletín de Suelos, 4:47-63 p.

FAO (1989): "Reciclaje de residuos". En Boletín Suelos, 6: 28-33 p.

- FAO (1993): "Biogás. Uso de sus subproductos". En Boletín Suelos, 7: 79-87 p.
- FAO (1997): "Perspectivas Alimentarias", marzo-abril, Roma, Italia, 19 p.
- FAO (1998): "Perspectivas Alimentarias", mayo-junio, Roma, Italia, 21 p.
- Fanaka, S. and T. Matsno (1986): "Treatment characteristics of the two-phase anaerobic digestion system using an up flow filter". In Wat. Sci. Tech., 18:217 p.
- Figarola, A. (1992): "Ingeniería Básica para la Fermentación Anaerobia y Composteo", Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, ITESM, Monterrey, México, 63 p.
- Figueroa, Vilda. (1993): "La producción porcina en Cuba". En Rev. ACPA, 1:31-33 p.
- Figueroa, Vilda y J. Ly (1990): Alimentación Porcina No Convencional, Colección GEPLACEA-PNUD, Serie DIVERSIFICACION, Impreso en México, D.F, 215 p.
- Guillermo, A. y M. Leal (1985): "Biogás del tratamiento de residuos azucareros en un reactor horizontal". En Rev. Cuba-Azúcar, ene-marz., 13-16 p.
- Guiot, S.R., F.A. Macleod and A. Pouss (1989): Microbiology and Biochemistry of strict anaerobes involved in interspecies H₂ transfer, New York, EUA. 173-183 p.
- Gujer W. And A.J. Zchder (1983): "Conversion processes in anaerobic digestion". In Wat. Sci. Tech., 15:8-9:127-167 p.
- Guyot J.P. (1992): "Digestión Anaeróbica, Curso de Bioprocesos Anaerobios para el tratamiento de efluentes industriales", México, 65 p.
- Guyot J.P. y O. Monroy (1993): "Bases fisiológicas del control de los digestores anaerobios", Conferencia, V Cong. de Biotec. y Bioing., México, 22 p.
- Guyot, S.R. (1994): "Digestion Anaerobic", Conferencia, Env. Eng. Group, Biotech. Res. Inst., NRC, Montreal, Canada, 27 p.
- Handel A. and P.F. Cavalcanti (1977): "Direct anaerobic sewage treatment in UASB reactors and post treatment in waste stabilisation ponds", Memorias, VII Cong. Nac. De Biotec. y Bioing., México, 38 p.
- Hashimoto, A. (1982): "Methane from cattle manure", Biotech, Bioing., 24: 2 039 p.
- Hamkes, D.I.; S.J. Wilcox; A.J. Guwy; F.R. Hawkes; A.G.Rozzi (1995): "Use of an on line bicarbonate sensor to monitor and control organic overloads in an anaerobic". In, International Workshop on Monitoring and Control of Anaerobic Digestion Processes. December, 6th and 7th Italy, 13-18 p.

Hedges, J. and K. Kornogay (1974): "Animal food from waste-water". In *Animal Science*, 21: 772 p.

Heijnen, J.J., A. Mulder, W. Enger and F. Hoeks (1989): "Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in waste-water treatment". In *J. Chem. Eng.*, 41: 37-50 p.

Hernández, C.A. (1988): Biogás, Segundo Forum Nacional de Energía, CNE, La Habana, 125 p.

Henze M. and P. Harremoes (1983): "Anaerobic treatment of wastewaters in fixed film reactors-A Literature Review". In *Wat. Tech.* 15:8-9:1-101 p.

IIA (1990): Tablas de Requerimientos, Producción Industrial, Inst. de Inv. Avícolas, La Habana, Cuba.

Ilangovan K. (1995): "Impacto ambiental de la industria textil en México: avances en la biodegradación anaerobia y precipitación de colorantes tipo A20", *Memorias, II Simp. Int. Sobre Remoción de Contaminantes en aguas y suelos*, Inst. de Ing., UNAM, 2:144-158 p.

Iza J., E. Collieran and J.M. Pariz (1991): "International workshop on anaerobic treatment technology for municipal and industrial wastewaters: Summary paper". In *Wat. Sci. Tech.*, 24:8:1-16 p.

Jers, J.S. and P.L. Mc Carty (1965): "The biochemistry of methane fermentation using C¹⁴ tracers", *JWPCF*, 37:178 p.

Kienhalz, J. (1976): "Sewage sludge metals in cattle tissues". In *J. Sci.*, 43: 230 p.

Kispert, R.G.; D.A. Stafford and R.L. Wentworth (1995): "Development and Installation of Remote Process Control System for Anaerobic Digestion". In *International Workshop on Monitoring and Control of Anaerobic Digestion Processes*. December, 6th and 7th, USA, 85 - 89p.

Knoblech, E. (1989): Fodder biofactors, their methods of determination, Acad. Praha, 450 p.

La Serna, G., P. Villa y L. Díaz (1988): "Microorganismos en los procesos de digestión anaerobia". En *Rev. ICIDCA*, 22:2:15-17 p.

Lasseur, C., J. Richalet and W. Verstraete (1996): "Organic waste of said method", *Patente Nro. 9731120*, EEUU.

Lema, J.M. (1986): "Selección de tecnología en digestión anaerobia", *III Sem. Sobre Digest. Anaerob. de Aguas Residuales*, Valladolid, España.

Lettinga, G. (1983): "Desing operation and economy of anaerobic treatment" In *Wat. Sci. And Tech.*, 15:8-9:177-195 p.

Lettinga G., A.F.M. van Velsen, S.W. Hobma, W.J. de Zeew y A. Klapwijk (1980): "Use of upflow Sludge Blanket (UASB) reactor concept for biological wastewater treatment". In *Biotech. Bioeng.*, 25: 1 701 - 1 723 p.

Lettinga G. and L. Hulshoff (1991): "UASB-process design for various types of wastewaters". In *Wat. Sci., Tech.* 24: 8 : 87- 107 p.

Liebholtz, J. (1962): "Animal food from surce anaerobic sludge". In *J. Animal Science*, 21: 772 p.

Litchfield, J. H. (1979): "Production of single cell protein for use in food or feed", *Mirob. Tech., Acad. Press., New York., EUA*, 21 p.

López, J.L., A. Borroto, C. Mazorra, A. Arencibia y N. Hernández (1994): "Use mejor los recursos disponibles para criar sus cerdos" (Inédito), Centro de Ref. Biblioteca del Centro de Investigaciones en Bioalimentos, Cuba, 34 p.

Lyn, H. (1976): "Feedlot animal wastes into useful materials", Patente Nro. 3973043, EEUU.

Marcet, M.E. (1981): Tesis de Candidato a Doctor en Ciencias, Depart. Of Water Tech. And Env. Eng., Inst. of Chem. Tecnol., Praga, Vol. I y II.

Marcet, M.E (1982): "Contenido de aminoácidos en lodos porcinos digeridos anaeróbicamente". En *Rev. Cienc. Biolog.*, 13: 2 : 243-250 p.

Marcet, M.E. (1983): "Cromatografía gaseosa e intercambio iónico como métodos de determinación de aminoácidos en lodos porcinos". En *Rev. Cienc. Biolog.*, 14 : 1 : 59-64 p.

Maylín, A. (1991): "Requerimientos nutricionales", Inst. de Inv. Porcinas, MINAG, La Habana, 11 p.

Meraz, M., O. Monroy, A. Noyola and K. Ilangovan (1995): "Studies on the dynamics of immobilization of anaerobic bacteria on plastic suport". In *Wat. Sci.* 32: 8 : 243-250 p.

Milan, Z. y M. Cruz (1992): "Efecto de la adición de asociaciones metanogénicas a reactores anaerobios", *Avances en Biotecnología Moderna, Cong. De Biotec. 92, La Habana, Cuba*.

MINAZ (1995): "Tablas de registros de plantas de derivados", (Material Impreso) Centro de Ref. Delegación Territorial del MINAZ, Ciego de Avila, 33 p.

Monroy, O. (1992): "Cinética de la digestión Anaerobia", Conferencia, Curso sobre Bioprocesos Anaerobios para el tratamiento de efluentes industriales, UNAM-ORSTOM-IMP, Mexico, 14 p.

Monroy, O. (1997): "Control del arranque y operación de digestores anaerobios", Memorias VII Cong. Nac. de Biotec. y Bioing., Mazatlan 97, México, 44 p.

Noyola, A. (1989): "Los procesos anaerobios en el tratamiento de aguas residuales", Memorias I Sem. Int. Sobre Biotec. de la Agroindustria Cafetalera, Xapala, Ver., México, 95 - 109 p.

Noyola, A. (1992): "Reactores anaerobios de segunda y tercera generación", Conferencia, Bioproses Anaerobios para el Tratamiento de Efluentes Industriales, UAM-ORSTOM-IMP, Iztapalapa, México 15 p.

Noyola, A. (1994): "Escalado de bioreactores anaeróbicos", Conferencia, Inst. de Ing., UNAM, México, DF, 20 p.

NRC (1984): Nutrient requirements of domestic animals. Nutrient requirements of poultry, Nat. Acad. Sci. Publ., Washington, DC.

NRC (1988): Nutrient requirements of swine, No. 2, Nat. Acad. Sci. Publ., Washington, DC.

Oficina Cubana de Patentes e Invenções (1998): Documento de búsqueda de registros sobre lodos anaerobios en alimentación animal, Bases de datos de la Oficinas de EEUU, España, Francia y Europa, La Habana, Cuba.

Olgún E. (1996): "El potencial de la biotecnología ambiental dentro de un contexto de desarrollo sostenible", Apuntes VII Curso Avanzado sobre Procesos Biotecnológicos, Morelo, México, 11 p.

Peavy, H.S., D.R. Rowe and G. Tchobanoglous (1985): Environmental Engineering, Edit. Graw Hill, London, Inglaterra 342 p.

Pérez, J.P. (1997): "Alimentos fermentados para animales", Memorias, II Simp. Inter. Sobre Ing. de Bioproc., México, 58 p.

Pérez, J.L., L. Rodríguez, F. Quintero y F. Reyes (1985): "Aprovechamiento de la vinaza de la destilería Nauyú como fuente de energía", Resúmenes, IX Sem. Cient. Del CENIC, La Habana, Cuba, 393 p.

Peters, M.S. and K.S. Timmerhaus (1969): Plant design and economics for Chemical Engineers.

Ramos, J. (1988): Biogás en doble etapa, Informe Técnico. Centro de Ref. Dpto. de Bioingeniería, ICIDCA, La Habana, 24 p.

Ramos, J., M.C. Obaya y M.E. Valdés (1992): "Selección de una microflora acidogénica para un proceso difásico de digestión anaerobia". En Rev. ICIDCA, 26 : 2 : 23-27 p.

Rodríguez, J.R. (1992): "Raciones prácticas para aves" En Rev. ACPA, 2:20-27 p.

Rodríguez, I., M.L. Delgado y M. Rito (1997): "Digestión anaerobia de lodos activados y desechos orgánicos en un reactor UASB" En VII Cong. Nac. de Biotec. y Bioing., Mazatlan 97, Mexico, 295 p.

Saendrey, L.M. (1992): Startup and operation of the Bacardí Corporation Anaerobic Filter, Puerto Rico, 8 p.

Sánchez, E. (1986): "Tratamiento de aguas residuales", Curso de Postgrado, CENIC, La Habana, 125 p.

Sánchez, E. (1990): Tarea técnica preliminar de la tecnología para la producción de biogás a partir de residuales de destilería (Inédito) Centro de Ref. Biblioteca del CENIC, 8 p.

Santiesteban, C.M. (1992): "Estimado preliminar de inversión de la planta de biogás de la destilería Heriberto Duquesne" Informe técnico, Centro de Ref. Subdirección de Inv. Bibliog. y Económicas, ICIDCA, La Habana, 5 p.

Santiesteban, C.M. (1993): "Los residuales como fuente de energía y biofertilizantes en complejos agroindustriales y plantas de derivados" Informe técnico, Centro de Ref. Subdirección de Inv. Bibliog. y Económicas, ICIDCA, La Habana, 10 p.

Schmidt, J.E. and B.K. Ahring (1994): "Extracellular polymers in granular sludge from different upflow anaerobics ludge blanket (UASB) reactor". In Appl. Microbiol. Biotech., 42 : 457-462 p.

Schoberth S.M. (1992): "Methanogenic flore and their metabolic routes", Memorias, Simp. Pan. De Comb. y Prod. Quím. Vía ferment., Ed. ICAITI/IMETA, México, 249 p.

Seckler, D.W., J.M. Harper and W. Wayne (1985): "Process for recovering feed products from animal manure", Patente Nro. 542969, EEUU.

Speece, R.E. (1990): "Toxicity fate in anaerobic digestión". En Trat. Anaerob. de aguas residuales en América Latina, Ed. UNAM/ORSTOM/ICAITI/UAM/SEDUE, México.

Stout, B.A. (1980): Energía para la Agricultura Mundial, FAO, Italia, 303 p.

Stryer, L. (1995): Biochemistry, Secound Printing, Stanford Univ., New York, 1 975 p.

Sudhakar, K., K. Nand, H. R. Srilatha, K. Srinath and K. Madhukara (1994): "Improvement in biomethanation of mango processing wastes by addition of plant derived additives", BIOGAS-FORUM, Ed. Borda, 3:58:16-19 p.

Tirumale S. and K. Nand (1994): "Influence of anaerobic cellulolytic bacterial consortia in the anaerobic digesters on biogas production", Boll. BIOGAS-FORUM, Ed. Borda, 3:58:12-15 p.

Trevan, M.D., S. Boffey, K.H. Goulding y P. Stanbury (1990): Biotecnología: Principios Biológicos, Ed. Acirbia, S.A. Zaragoza, España, 357 p.

UECAN (1985): Normas Nacionales de Alimentación, Unión de Empresas del Combinado Avícola Nacional, Centro de Ref. Biblioteca del IIA, La Habana, 22 p.

Valdés, E., p. Gonzalez y M.C. Obaya (1991): "Evaluación preliminar de lodos anaerobios como complemento en la dieta animal". En Rev. ICIDCA, 25 : 1-2 : 1-4 p.

Valdés, E., M.C. Obaya, J. Ramos y O.L. León (1990): "Definición de parámetros tecnológicos para el tratamiento de mostos de destilería en reactores UASB con lecho empacado", Informe Interno, Centro de Ref. Dpto. Bioingeniería, ICIDCA, La Habana, 12 p.

Valdés, E., M.C. Obaya, F. Rodríguez y J. Ramos (1993): "Tarea Técnica: Tratamiento de los residuales mediante la producción de biogás en la destilería del CAI Heriberto Duquesne", Dpto. Bioingeniería, ICIDCA, La Habana, 15 p.

Valdés, E., M.C. Obaya, F. Rodríguez y C. Santiesteban (1993): "Obtención de biogás en la industria azucarera", Comisión Nacional de Biogás, Grupo Estatal No. 4, La Habana, 32 p.

Valdivié, M. (1990): "Requerimientos en energía metabolizable, proteína y aminoácidos en la alimentación avícola". En Memorias del XXV Aniversario del ICA. La Habana 1 - 34 p.

Vanrolleghem, P.A. (1995): "Sensors for anaerobic digestion: An overview". In International Workshop on Monitoring and Control of Anaerobic Digestion Processes. December, 6th and 7th Belgium, 1 - 8 p.

Vázquez, R. (1996): "Biodesulfuración de Combustible" In VII Curso Avanzado sobre procesos biotecnológicos, Biotecnología Ambiental. Compendio de Artículos. Morelos, México.

Villa, P. (1990): "Estudio microbiológico de los lodos anaerobios y los efluentes de los reactores UASB", Informe Técnico, Centro de Ref. Dpto. Bioingeniería, ICIDCA, La Habana, 20 p.

Viñas, M., N. Rubio y R. García (1995): "Tratamiento de residuales agropecuarios", II Cong. AIDIS de Norteamérica y el Caribe, Santiago de Cuba, 20 p.

Vogel, G.D., C. Van Der Drift, C.K. Stumm, J.T.M. Keltje and K.B. Zwart (1984): *Antonie van Leeuwenhoek*, 50 : 557 - 567 p.

Young J.C. (1991): "Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters". In *Wat. Sci. Tech.*, 24 : 8 : 133 - 155 p.

Young, J.C. and P.L. Mc Carty (1969): "The anaerobic filter for waste treatment" In *J. Wat. Pollut. Control Fed*, 41 : 160 p.

Ward, O. (1990): Biotecnología de las Fermentaciones, Ed. Acribia, SA. Zaragoza, España, 420 p.

Wasser, R. (1995): "Reducing water contamination caused by coffee industries with anaerobic digestion technology", *BIOGAS-FORUM*, Ed. Borda, 2:61:8-14 p.

Weigandt, K., K. Popping haus, M. Einbrodt y B. Bohnke (1986): "Method for obtaining protein-containing animal feed from organic matter", Patente Nro. 4473590, European.

Whalen, R. (1998): "Adsorption protein". In *Biotech. App.*, 15 : 2 : 12 p.

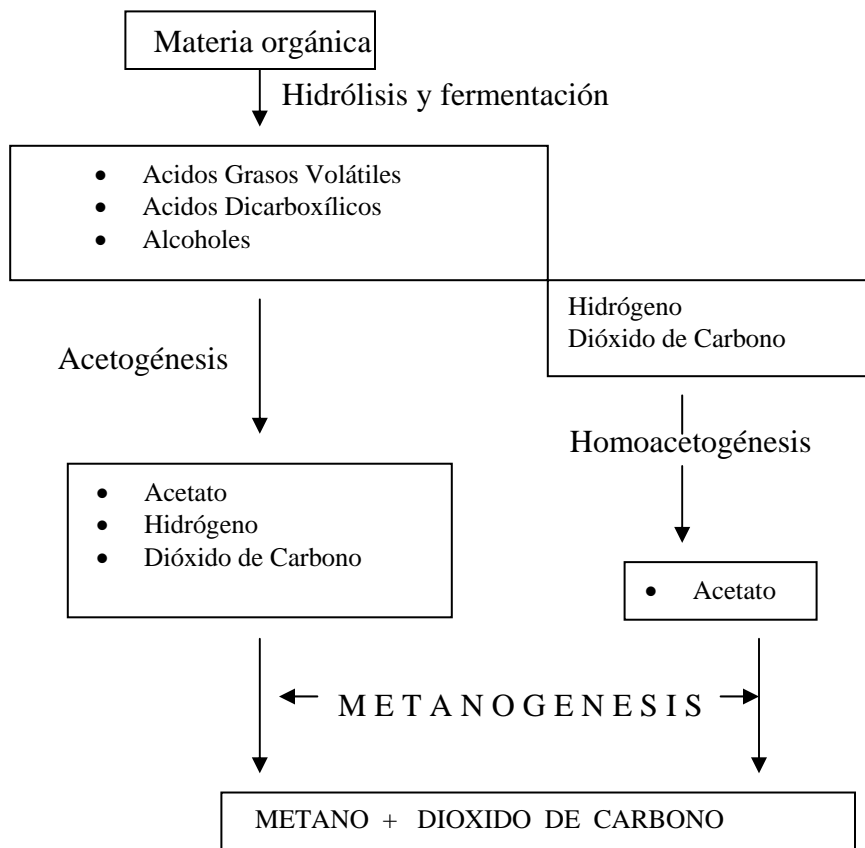


Fig. 1: Esquema de la biodegradación anaerobia de la materia orgánica (Guyot, 1992).

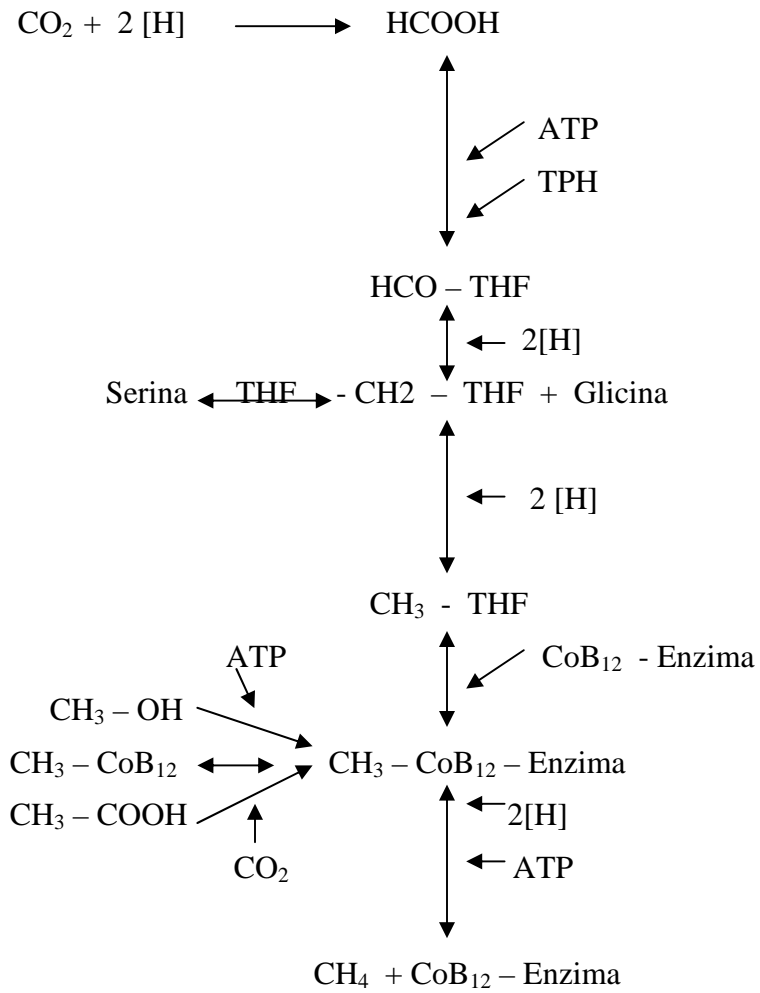


Fig. 2: Formación de CH₄ a partir de CO₂, CH₃OH y acetato por bacterias metanogénicas.

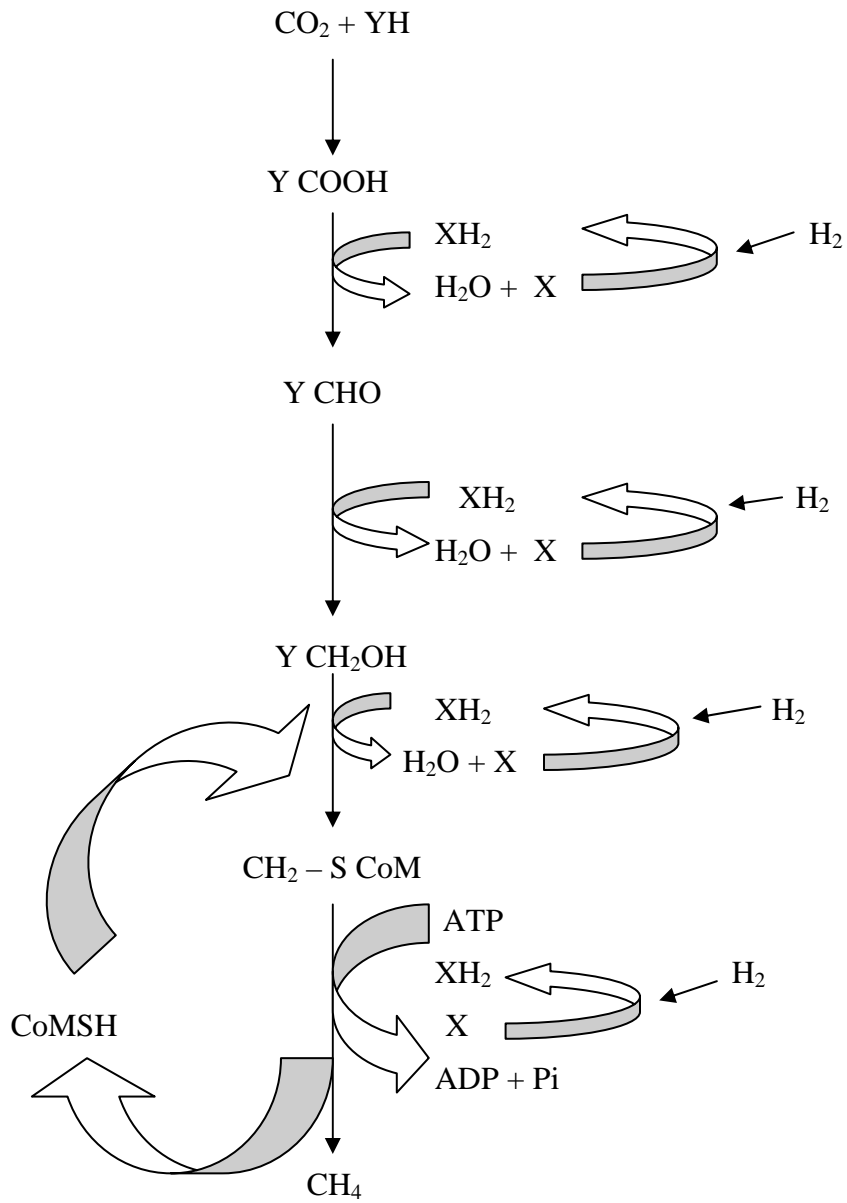


Fig. 3: Ruta de producción de CH_4 (Trevan et. al., 1990).

Y...es un portador de electrones

XH_2 ...representa uno o más portadores de electrones

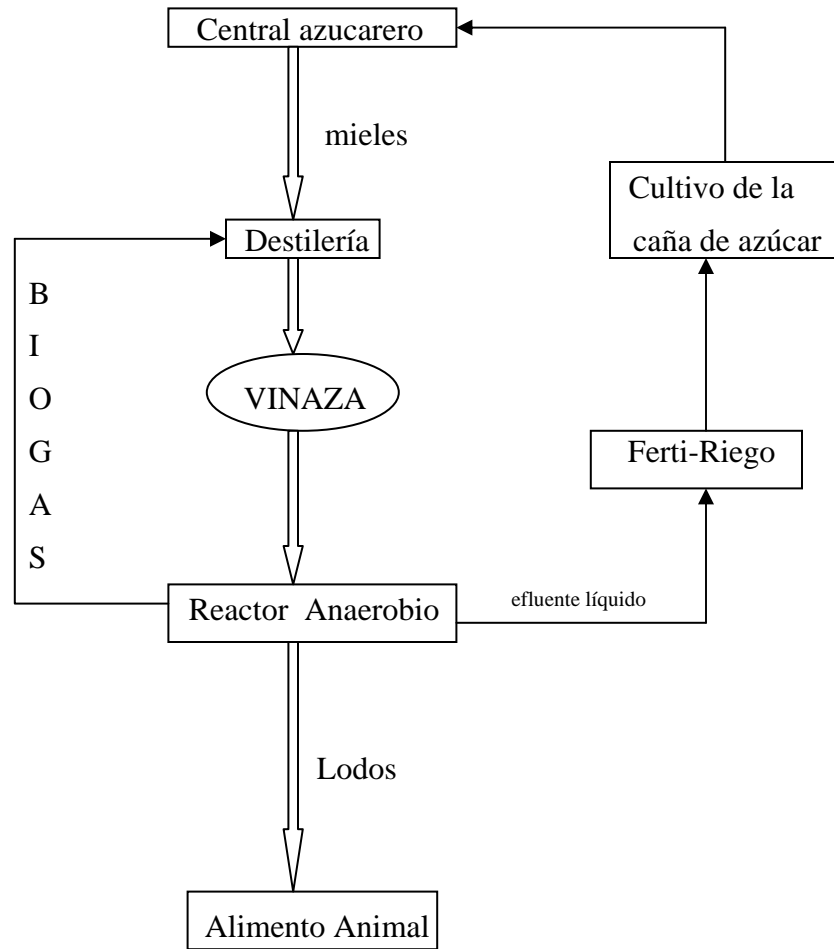


Fig. 9: Sistema integral de tratamiento y reciclaje de la vinaza en la destilería Nauyú.

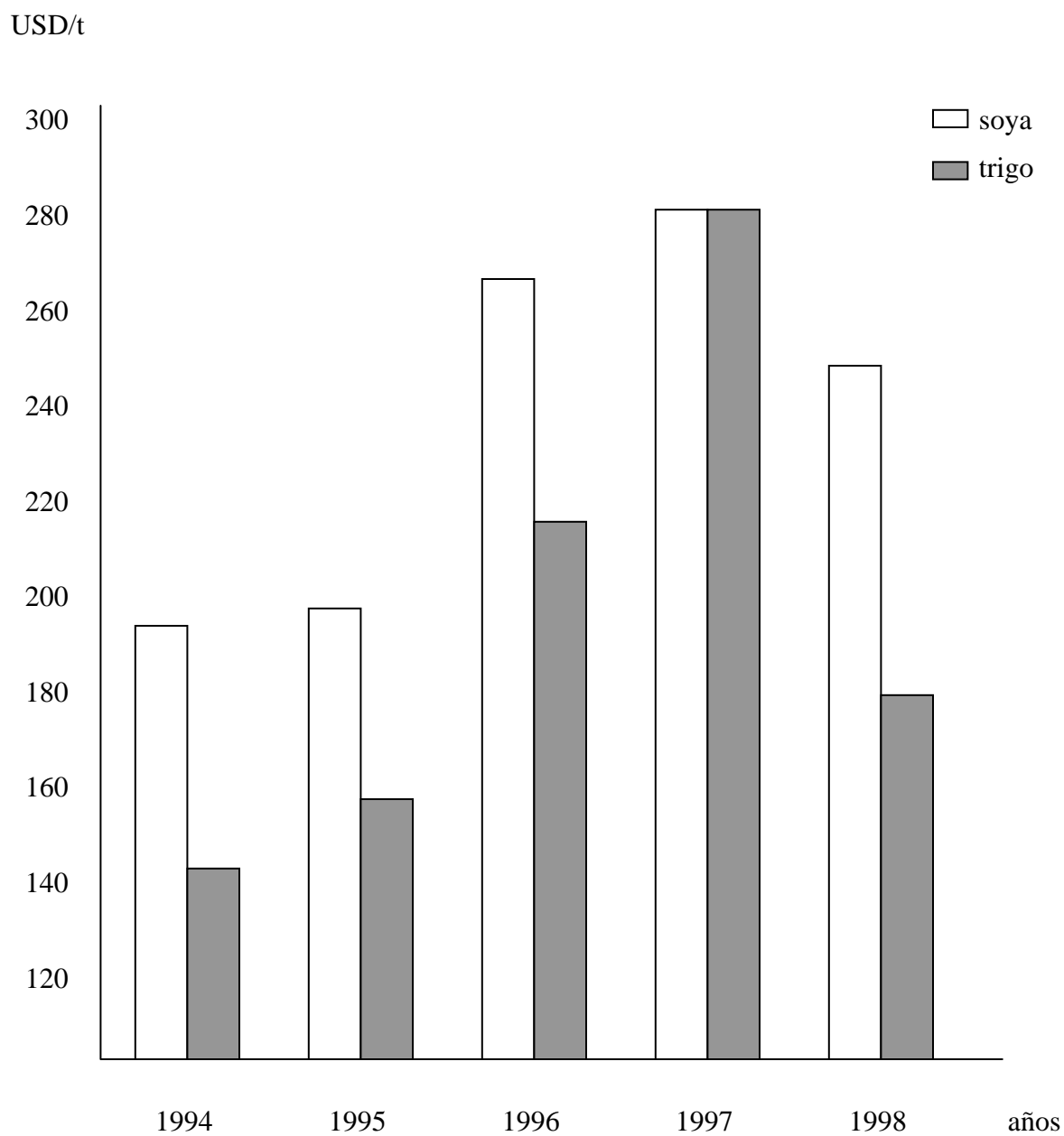


Fig.6: Variación del precio de la harina de soya y trigo en el mercado internacional.

Costo/USD

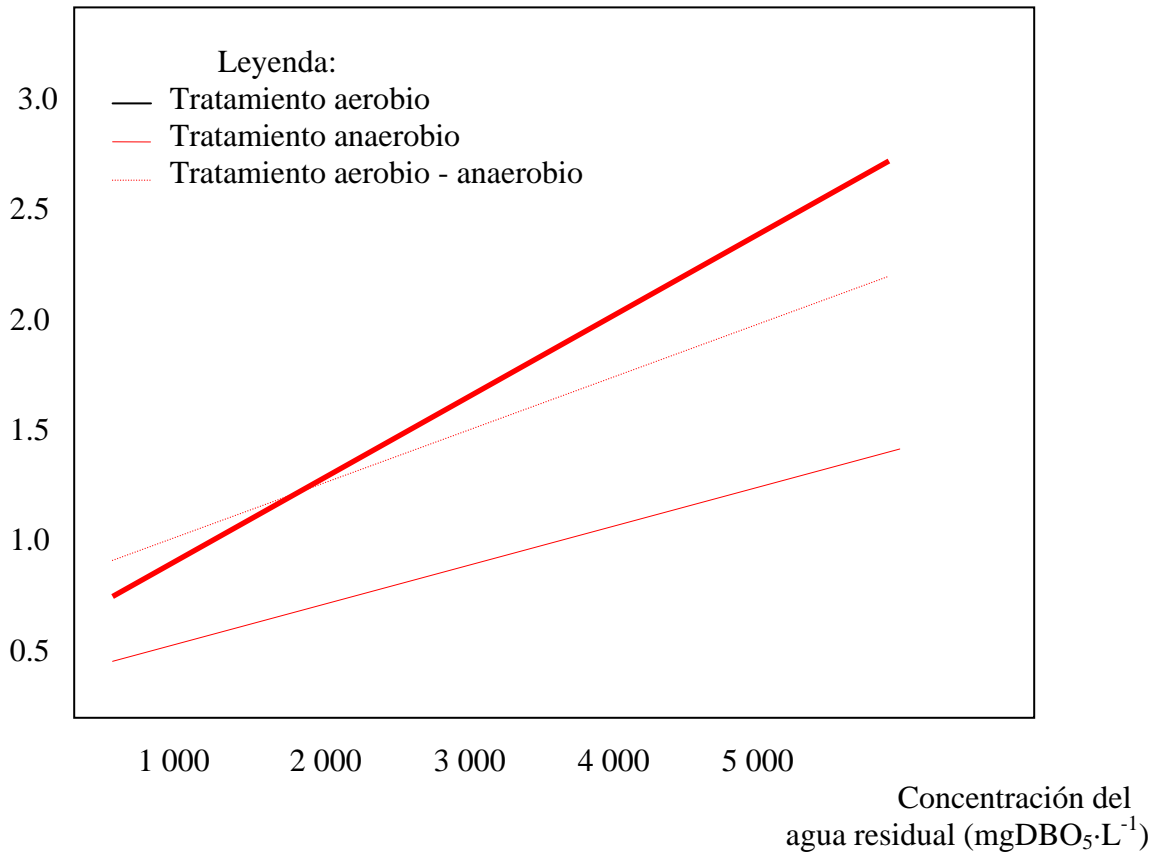


Fig. 4 : Comparación de los costos de inversión para plantas de tratamiento de residuales (Eckenfelder, 1988; citado por Noyola, 1992).

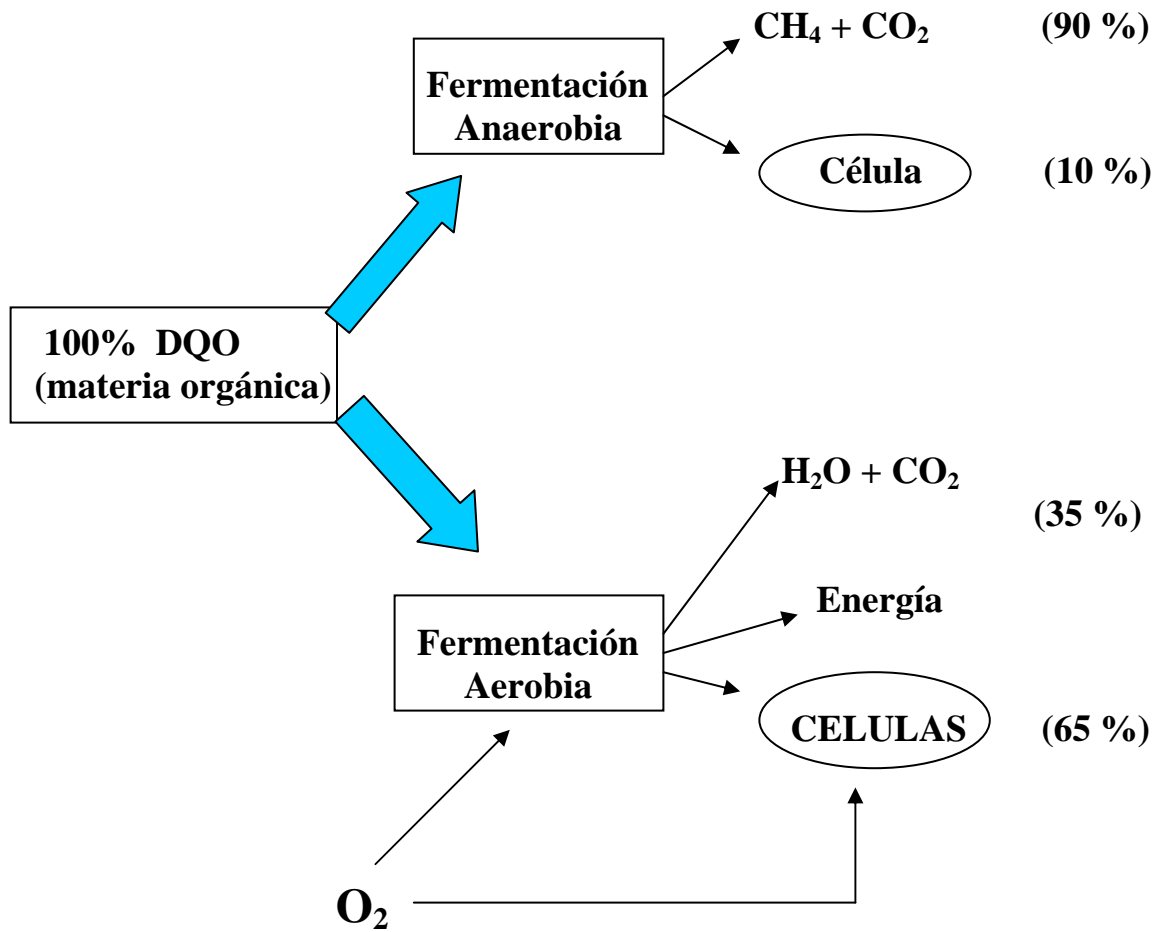


Fig. 5: Balance de energía en los procesos anaerobios y aerobios.
(Noyola, 1989)

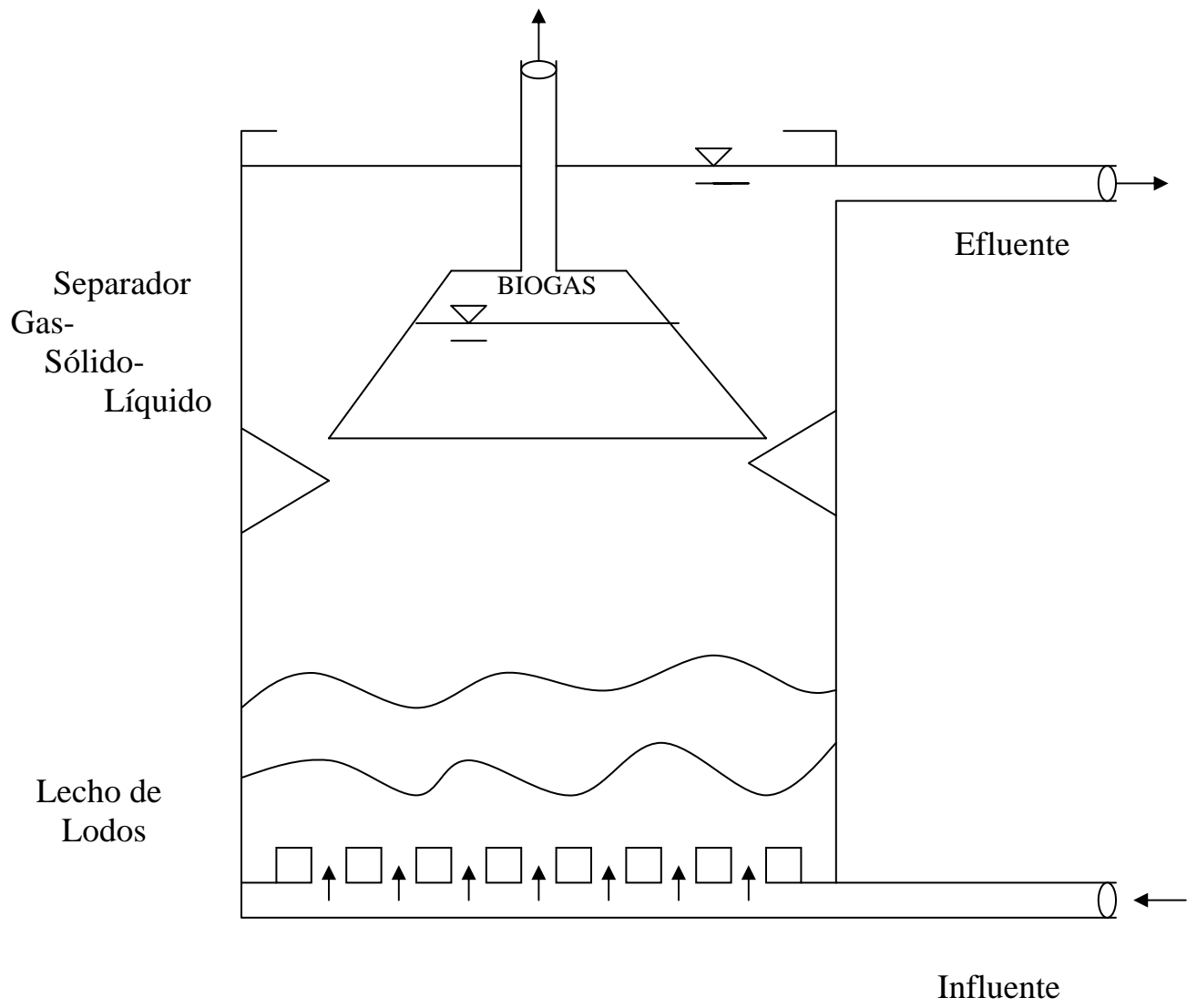


Fig. 8: Esquema de un reactor UASB.

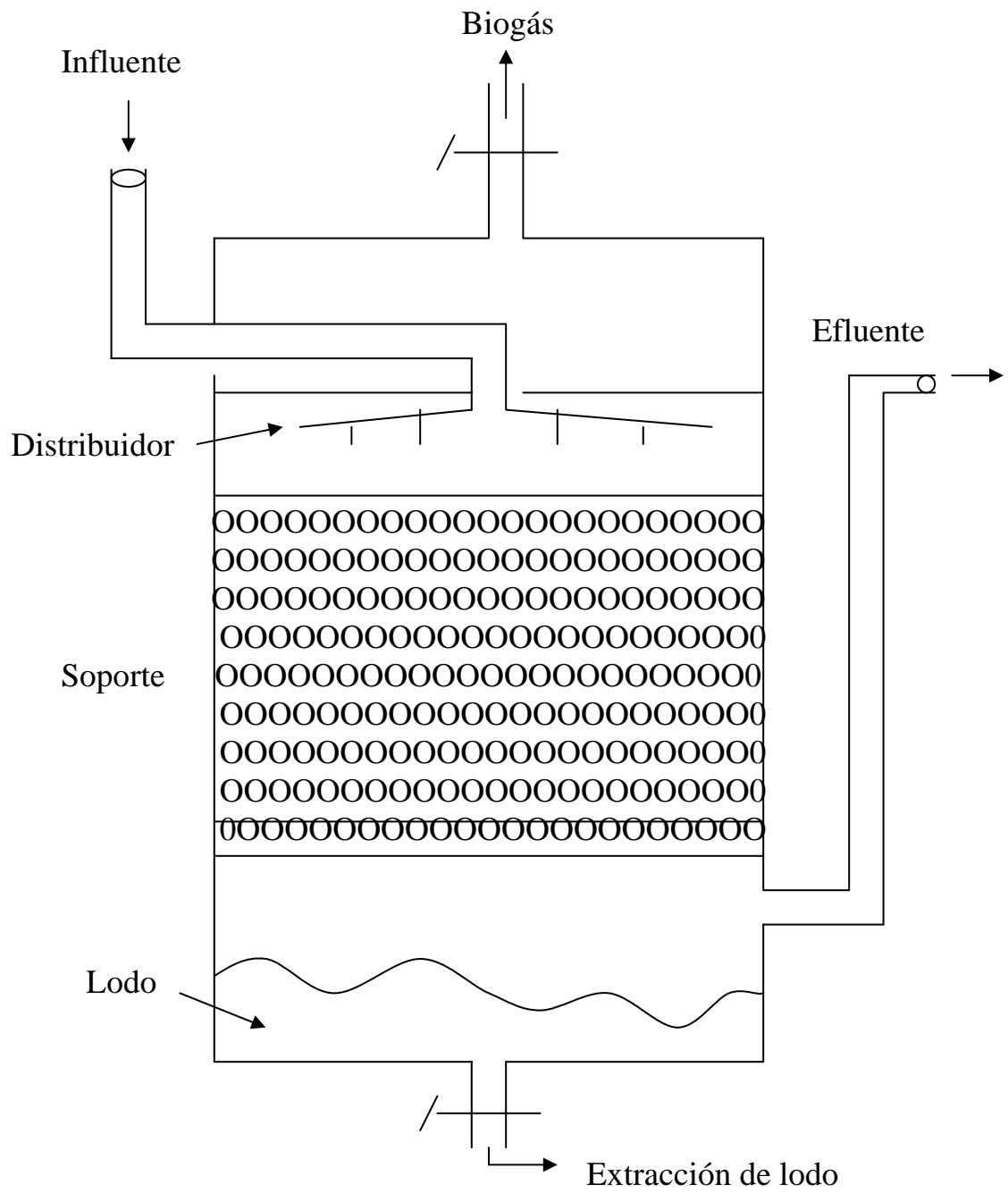


Fig. 7: Esquema del reactor de Lecho Empacado.