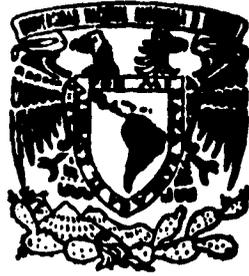


UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

SS  
Res

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

**DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS RESIDUALES  
DOMESTICOS:**

**Optimización del proceso por pretratamientos y/o  
adición de estimulantes de crecimiento**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO QUIMICO**

PRESENTA:

**JUAN GARCIA TREJO**



MEXICO, D.F.

1998

FALLA DE ORIGEN

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO**

Presidente. Prof . JESUS GONZALEZ PEREZ  
Vocal. Profa. GABRIELA ELEONORA MOELLER CHAVEZ  
Secretario. Prof . RODOLFO TORRES BARRERA  
1er. suplente. Prof . HUMBERTO RANGEL DAVALOS  
2do. suplente. Prof . VICTOR MANUEL LUNA PABELLO

Sitio donde se desarrolló el tema:

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
EDIFICIO "A"**



---

**M. en I. Gabriela Eleonora Moeller Chavez  
Asesor del tema**



---

**Juan García Trejo  
Sustentante**

## **AGRADECIMIENTOS**

**A mis padres: José Eliseo García Galeote e Inés Trejo Reyes.**

**A mis hermanos: Guadalupe, Teresa, Enriqueta y Noé.**

**A mi familia y amigos.**

**G R A C I A S .**

**Agradezco la colaboración en el desarrollo de este trabajo:**

**A la Sección de Ingeniería Ambiental de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.**

**Y el Departamento de Operación de la Dirección de Telecomunicaciones Digitales de la Dirección General de Servicios de Cómputo Académico de la UNAM.**

**En particular al Sr. Adolfo Quintana Teruel.**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GENERALIDADES</b>	
<b>I. ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES.....</b>	<b>2</b>
<b>II. ORIGEN DE LOS LODOS.....</b>	<b>7</b>
<b>III. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS.....</b>	<b>16</b>
<b>IV. TRATAMIENTO DE LOS LODOS.....</b>	<b>22</b>
<b>V. DIGESTIÓN ANAEROBIA.....</b>	<b>33</b>
<b>VI. PRETRATAMIENTO AL LODO.....</b>	<b>46</b>
<b>VII. ANTECEDENTES EXPERIMENTALES.....</b>	<b>53</b>
<b>3. PARTE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>65</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>84</b>
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>7. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>91</b>
<b>9. ANEXOS.....</b>	<b>A1</b>

## **1. INTRODUCCIÓN**

**Actualmente, la alta demanda en el consumo del agua, debido al crecimiento de la población, ha puesto en evidencia la importancia del problema de la contaminación del agua.**

**La solución a éste problema es el adecuado tratamiento del agua; existen métodos de tratamiento para el agua residual doméstica que son bien conocidos. Los productos del tratamiento del agua son:**

**Agua tratada, y puesto que el agua residual contiene una cantidad de sólidos suspendidos, al depurarla el producto final será una fracción sólida denominada lodos residuales.**

**Esta tesis forma parte de una serie de trabajos realizados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, con el propósito de contribuir a la solución del problema del tratamiento de lodos por el proceso de digestión anaerobia.**

**El objetivo de esta tesis es:**

**Favorecer el proceso de la digestión anaerobia convirtiendo el sustrato en un material más biodegradable, por la aplicación de pretratamientos, y/o suplementando el crecimiento de la flora microbiana por la adición de estimulantes de crecimiento.**

## I. ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES

**"Una definición de contaminación es la de una condición en la que un medio o el ambiente se vuelve inadecuado para el fin que se le destinó"<sup>(20)</sup>.**

**La definición de contaminación tiene dos implicaciones importantes :**

**1. La contaminación no es una condición absoluta, sino que depende del medio y el fin propuesto.**

**2. Resulta un desperdicio de recursos económicos purificar el agua más allá de la calidad necesaria para el fin destinado .**

**Las fuentes de contaminación se clasifican según Gurnham<sup>(7)</sup> como:**

- contaminación municipal,**
- contaminación industrial,**
- contaminación agrícola,**
- y contaminación natural.**

### A. CONTAMINACIÓN MUNICIPAL

**La adecuada disposición de los desperdicios municipales, específicamente, los desechos humanos y domésticos son considerados como un factor importante para mantener la Salud Pública.**

Los procesos de tratamiento de aguas residuales domésticas han sido desarrollados, y puesto en práctica en ciudades y comunidades pequeñas de todos tamaños. Por consiguiente, la eliminación de la contaminación es un problema económico, además un problema técnico de Ingeniería.

Una definición de aguas residuales domésticas es la siguiente<sup>(1)</sup>:

"Estas aguas son las que contienen desechos humanos, animales y domésticas. También se incluyen la infiltración de aguas subterráneas. Estas aguas son típicas de las zonas residenciales en las que no se efectúan operaciones industriales, o solo en muy corta escala."

#### **1. Desechos humanos y animales**

Son los desechos que llegan a formar parte de las aguas negras, mediante los sistemas hidráulicos de los retretes, y en cierto grado los desechos que proceden de los animales, y son arrastrados a las alcantarillas por el lavado del suelo o las calles. El tratamiento seguro y eficaz de los desechos humanos y animales constituye el problema principal del acondicionamiento de las aguas negras para su disposición.

#### **2. Desperdicios domésticos**

Proceden de las manipulaciones domésticas como el lavado de ropa, baño, desperdicios de cocina, limpieza y preparación de los alimentos, además, del lavado de loza.

La mayoría de éstos desechos contienen jabones y detergentes sintéticos (agentes espumantes), cuyo uso es común en las labores domésticas.

Los desechos de cocina contienen desperdicios de alimentos y grasa.

### 3. infiltración de aguas subterráneas

El drenaje o alcantarillado es el dispositivo subterráneo para coleccionar el agua residual, y en época de lluvia queda algunas veces debajo de los mantos de agua subterránea.

Como entre las secciones de tubería las juntas no sellan adecuadamente, existe la posibilidad de infiltraciones del agua subterránea al drenaje.

## B. CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL

Las aguas residuales industriales son las aguas de desecho resultantes de las operaciones de los procesos industriales.

En la industria manufacturera el agua es primordial, aunque solo una parte pequeña aparezca en el producto final.

El agua remanente producto de los procesos industriales posiblemente este contaminada. Sin embargo, esta contaminación no necesariamente indica operaciones derrochadoras de agua o un manejo ineficiente de la planta industrial.

Prácticamente, todos los procesos consumidores de agua generan aguas contaminadas, excepto, algunas industrias que únicamente moldean materiales o

ensamblan partes, y las operaciones químicas completamente secas, como algunas industrias dedicadas a la cerámica.

### **C. CONTAMINACIÓN MINERA**

Las operaciones efectuadas en la industria minera son una fuente de contaminación, a menos que sus desechos se controlan cuidadosamente, pero, un control adecuado es difícil.

Para proteger corrientes de agua cercana, se colocan recipientes grandes para captar los residuos del lavado de la mena ( parte de terreno que contiene minerales en alta concentración), separación por filtración, y otros procesos de separación.

### **D. CONTAMINACIÓN AGRÍCOLA**

La remoción del suelo por erosión contamina las corrientes de agua, y pueden tener serios efectos sobre los peces, la fotosíntesis y en un caso extremo sobre la navegación.

Los fertilizantes son otro contaminante agrícola, no obstante, en cantidades moderadas sus efectos no son objetables.

Los insecticidas y herbicidas químicos tienen efectos más dañinos que los fertilizantes.

## **E. CONTAMINACIÓN NATURAL**

Las fuentes de contaminación clasificadas como " contaminación natural " son generalmente insignificantes, debido a que involucran solamente contaminantes accidentales u ocasionales, cuyos efectos persisten por tiempo limitado y a una distancia corta de la fuente.

Un cuerpo de agua puede recibir contaminantes de la atmósfera en forma de lluvia, la cual acarrea el polvo y otros sólidos, además de los gases disueltos.

En la vecindad de las plantas industriales puede haber una atmósfera contaminada, que se transfiere al agua por asentamiento, absorción o lluvia.

Ejemplo de contaminantes así transferidos estan:

- polvos de fábricas cementeras y fundidoras,
- ácidos de plantas químicas,
- dióxido de azufre,
- y ácidos de fundidoras.

La contaminación natural causada por organismos vivos o muertos puede ignorarse.

## **II. ORIGEN DE LOS LODOS**

Cualquiera que sea el procedimiento utilizado para el tratamiento de las aguas residuales, se genera cierta cantidad de partículas sólidas decantables en las que se encuentran partículas minerales inertes y materia orgánica fermentable, sobre la cual se adsorben sales minerales y algunos microorganismos ( bacterias, virus, parásitos) que se encuentran en las aguas residuales.

Estas sustancias se separan del agua residual y forman un lodo con un alto contenido de agua y biológicamente inestable, en el cual se concentra la "contaminación".

La depuración de las aguas residuales domésticas requiere una serie de operaciones, que incluyen procesos químicos, biológicos y físicos.

### **A. PRETRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL**

Una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas tiene como fin garantizar la calidad de agua requerida para usos posteriores. El primer paso en la depuración consiste en la eliminación de materiales gruesos, grasa y arenas para evitar daños a los equipos e instalaciones de la estación depuradora, e incrementar la eficiencia del proceso de tratamiento.

### **1. Cribado**

Se eliminan los elementos de grandes dimensiones como trapos y materias plásticas que se encuentran en el agua residual, y podrían entorpecer el funcionamiento interno de la planta. Se intercalan con este fin rejillas o mallas.

### **2. Desarenado**

Después del cribado quedarán aún en el agua fragmentos sólidos, cuya dureza y tamaño podrían llevar a la abrasión de ciertos equipos de la planta, en especial las bombas.

Estos fragmentos sólidos se conocen como "arenas", cuyas características son:

- no son putrescibles,
- y tienen velocidades de sedimentación superiores a las de los sólidos orgánicos putrescibles.

Las arenas se eliminan por sedimentación en tanques llamados desarenadores.

### **3. Desengrasado**

Las aguas residuales contienen materias flotantes como aceites, hidrocarburos y restos de grasas que no fueron retenidos en el cribado, estos materiales forman una capa sobre la superficie del agua, que entorpecería la aireación del proceso biológico de lodos activados, el cual posteriormente se efectuará. La diferencia de densidades permite el desengrasado o separación de las

materias flotantes.

#### **4. Desechos del pretratamiento**

**Los residuos recogidos del pretratamiento se eliminan por:**

- incineración,
- relleno sanitario,
- transporte a vertedero.

### **B. TRATAMIENTO PRIMARIO**

El tratamiento primario tiene como objetivo reducir los sólidos en suspensión que sedimentan. Los sólidos en suspensión se eliminan por sedimentación, operación basada en la reducción de la velocidad de la corriente del agua.

Los sólidos suspendidos decantados constituyen los llamados lodos primarios, nombre que reciben por su origen en el proceso primario, y para diferenciarlos de los lodos secundarios.

Los lodos primarios se componen<sup>(61)</sup> :

- materia orgánica ( de 20 a 30% de la materia seca ),
- materia grasa ( 6 a 30% ),
- y celulosa ( 8 a 15% ).

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES					
PROCESO UNITARIO					
REJAS GRUESAS	X				
REJAS FINAS TANQUES		X			
DESARENADO			X		
DECANTACIÓN				X	
FLOTACIÓN					X
<b>PARTÍCULA SÓLIDA ELIMINADA</b>	CUERPOS FLOTANTES	PARTÍCULAS DISCIPITAS	SÓLIDOS SEDIMENTABLES INORGÁNICOS	SÓLIDOS SEDIMENTABLES ORGÁNICOS	SÓLIDOS FLOTANTES ORGÁNICOS
<b>FIGURA No. 1</b>		<b>TRATAMIENTO PRIMARIO</b>			

FUENTE. HERNANDEZ, MOJIB GUZELIO. (10)

## **C. TRATAMIENTO SECUNDARIO**

La finalidad del proceso secundario es eliminar del agua residual, la materia en suspensión y la coloidal hasta una condición adecuada para su uso final.

La depuración secundaria generalmente es un proceso biológico que se fundamenta en el consumo de la materia orgánica, y parte de los nutrientes (nitrógeno y fósforo) por los microorganismos presentes en el agua residual, tanto en presencia como en ausencia de oxígeno (tratamiento aerobio y anaerobio respectivamente).

### **1. Lodos activados**

El fundamento del proceso consiste en el contacto en un sistema aireado y agitado de una población microbiana mixta en forma floculenta con las aguas residuales.

Las aguas residuales contienen sólidos suspendidos y coloidales, que al agitarse en un medio aireado crean núcleos sobre los cuales se desarrolla la vida biológica, al aumentar de tamaño éstos núcleos forman flóculos conocidos como lodos activados.

La materia en suspensión y la coloidal se eliminan por adsorción y aglomeración en los flóculos microbianos. En los flóculos microbianos estas materias y los nutrientes disueltos se descomponen lentamente por metabolismo microbiano, proceso denominado de estabilización.

En el proceso de estabilización parte del material nutriente se oxida a sustancias simples como el anhídrido carbónico ( proceso de mineralización ) y parte se convierte en nueva materia celular (proceso de asimilación ).

## 2. Procesos de película fija

En el proceso de película fija se ponen en contacto las aguas residuales con una población mixta en forma de película adherida a la superficie de un medio sólido de soporte.

El medio sólido de soporte está dispuesto en forma de lecho empacado, a través del cual gotea el agua residual. Las superficies mojadas del medio de empaque desarrollan una película de lama microbiana ( biomasa ) y el agua residual fluye sobre la superficie del empaque, en una capa delgada que está en contacto con la biomasa por un lado, y por el otro con la atmósfera en los espacios intersticiales del empaque.

El oxígeno se disuelve en la superficie de la capa del líquido en movimiento y se transfiere a través de la capa líquida a la capa de biomasa. El oxígeno y los nutrientes del líquido se difunden hacia dentro de la película para ser metabolizados por la biomasa. Las materias en suspensión y las coloidales presentes en el agua residual se aglomeran y adsorben en la biomasa.

### **3. Floculación**

La floculación es un proceso químico, que elimina la materia en suspensión y la coloidal por la adición de sustancias coagulantes. Las sustancias coagulantes aglomeran las materias coloidales en floculos fácilmente decantables.

### **4. Clarificación**

Una vez que se alcanza el grado de tratamiento requerido en el proceso secundario, el lodo secundario es separado del agua residual por sedimentación.

El sobrenadante de la etapa de separación es el agua residual tratada y debe estar libre de lodos.

En el proceso de lodos activados (Biomasa suspendida) y de película fija, parte del lodo sedimentado se regresa a la etapa de aireación, para mantener la concentración de biomasa a un nivel necesario para el tratamiento efectivo, y el resto es desechado.

## **D. TRATAMIENTO TERCIARIO**

Con los tratamientos terciarios se mejoran las características del agua residual después de un tratamiento secundario. En orden creciente de calidad puede distinguirse los siguientes niveles de aplicación:

- necesidades agrícolas-riegos,
- refrigeración industrial,

### **3. Floculación**

La floculación es un proceso químico, que elimina la materia en suspensión y la coloidal por la adición de sustancias coagulantes. Las sustancias coagulantes aglomeran las materias coloidales en floculos fácilmente decantables.

### **4. Clarificación**

Una vez que se alcanza el grado de tratamiento requerido en el proceso secundario, el lodo secundario es separado del agua residual por sedimentación.

El sobrenadante de la etapa de separación es el agua residual tratada y debe estar libre de lodos.

En el proceso de lodos activados (Biomasa suspendida) y de película fija, parte del lodo sedimentado se regresa a la etapa de aireación, para mantener la concentración de biomasa a un nivel necesario para el tratamiento efectivo, y el resto es desechado.

## **D. TRATAMIENTO TERCIARIO**

Con los tratamientos terciarios se mejoran las características del agua residual después de un tratamiento secundario. En orden creciente de calidad puede distinguirse los siguientes niveles de aplicación:

- necesidades agrícolas-riegos,
- refrigeración industrial,

- preservación del equilibrio biótico del medio receptor,
- recirculación en la industria,
- recarga de capas acuíferas,
- piscicultura,
- uso doméstico, que puede llegar hasta el consumo humano.

Según la utilización posterior de las aguas residuales, será la variedad de tratamientos que se apliquen, como son:

- La eliminación de nitrógeno y fósforo, para combatir la eutroficación de los lagos.
- La nitrificación-desnitrificación, destinada a eliminar el nitrógeno orgánico y amoniacal.
- La eliminación de la DBO no biodegradable y de los tóxicos orgánicos o minerales.
- Eliminación del color y los detergentes.
- La desinfección, eliminar los gérmenes patógenos y los parásitos.

Los tratamientos terciarios se aplican en la depuración de aguas residuales domésticas y vertidos industriales.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES		
PROCESOS UNITARIOS	DE INGENIERIA BIOLÓGICA	DE INGENIERIA FÍSICO-QUÍMICA
<b>PELÍCULA FINA</b> a) Reactor biológico b) Separación física	X	
<b>LADOS ACTIVADOS</b> a) Reactor biológico b) Separación física	X	
<b>FLOCULACIÓN-DECANTACIÓN</b> a) Coagulación-floculación b) Separación física		X
<b>PARTÍCULA TÍPICA ELIMINADA</b>	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN

**FIGURA No. 2 TRATAMIENTO MECÁNICO**

FUENTE. NEWMANER, MILES ADELTO. (10)

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES				
PROCESOS UNITARIOS				
AIREACIÓN	X			
ADSORCIÓN POR CARBÓN		X		
FILTRACIÓN			X	
INTERCAMBIO IÓNICO			X	
SEPARACIÓN POR MEMBRANA			X	
DESINFECCIÓN				X
<b>PARTÍCULA TÍPICA ELIMINADA</b>	GASES DISUELTOS	MATERIA ORGÁNICA DISUELTOS	MATERIA TÁNICA DISUELTOS TÁNICO	SUSPENSIONES, DISUELTOS Y OTROS

**FIGURA No. 3 TRATAMIENTO MECÁNICO**

FUENTE. NEWMANER, MILES ADELTO. (10)

### III. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS

Los lodos de origen primario o secundario se presentan en la forma de un líquido que contiene partículas no homogéneas en suspensión.

#### A. PROPIEDADES FÍSICAS

##### 1. Contenido de materia seca

Se trata de medir el peso del residuo seco después de un calentamiento a 105 ° C, hasta peso constante, se le expresa generalmente como un porcentaje que varía de 3% a 8% <sup>(8)</sup> de materia seca.

##### 2. Contenido de materia volátil

Se mide este valor por la diferencia entre el peso del lodo seco (a 105 ° C) y del mismo lodo después de que se calienta hasta peso constante a 500 ° C.

El contenido varía de un 60% a 85% <sup>(8)</sup> de la materia seca.

##### 3. Contenido del agua intersticial

El agua en el lodo se presenta en dos formas:

1. Agua libre que se elimina fácilmente por filtración o decantación.

2. Agua ligada contenida en las moléculas químicas como las sustancias coloidales y las células de materia orgánica, eliminadas por calentamiento.

Se mide la proporción entre el agua ligada y el agua libre, por la pérdida de peso a temperatura constante en función del tiempo, así se obtiene una curva termogravimétrica, la cual proporciona la velocidad de evaporación en función de la sequedad del lodo. Esta curva es básica para el cálculo de los equipos de secado por medio de calor.

#### 4. Viscosidad

Los lodos no son líquidos newtonianos. Su viscosidad se mide en función de la contracción por cizallamiento (viscosidad de Bingham), esta viscosidad permite definir sus caracteres tixotrópicos (capacidad de constituirse en una masa en estado de reposo y volverse fluido después de la mezcla), de gran importancia para su transporte.

#### 5. Carga específica

Este parámetro permite medir la capacidad de sedimentación de los lodos, se expresa en unidades de  $\text{Kg/m}^2/\text{día}$ .

Es la cantidad de materia seca decantada por unidad de superficie.

1. Agua libre que se elimina fácilmente por filtración o decantación.

2. Agua ligada contenida en las moléculas químicas como las sustancias coloidales y las células de materia orgánica, eliminadas por calentamiento.

Se mide la proporción entre el agua ligada y el agua libre, por la pérdida de peso a temperatura constante en función del tiempo, así se obtiene una curva termogravimétrica, la cual proporciona la velocidad de evaporación en función de la sequedad del lodo. Esta curva es básica para el cálculo de los equipos de secado por medio de calor.

#### 4. Viscosidad

Los lodos no son líquidos newtonianos. Su viscosidad se mide en función de la contracción por cizallamiento (viscosidad de Bingham), esta viscosidad permite definir sus caracteres tixotrópicos (capacidad de constituirse en una masa en estado de reposo y volverse fluido después de la mezcla), de gran importancia para su transporte.

#### 5. Carga específica

Este parámetro permite medir la capacidad de sedimentación de los lodos, se expresá en unidades de  $\text{Kg/m}^2/\text{día}$ .

Es la cantidad de materia seca decantada por unidad de superficie.

#### **6. Resistencia específica**

Se mide la capacidad de filtración de los lodos , bajo una presión determinada  
Tiene como unidades m/Kg .

#### **7. Compresibilidad**

Cuando se incrementa la presión en la parte superior de un filtro, se obtiene un aplastamiento de la torte y un aumento de la resistencia a la filtración.

La representación logarítmica de la resistencia específica en función de la presión da una línea recta, en la que se determina el coeficiente de compresibilidad (pendiente de la recta ).

#### **8. Poder calorífico**

El contenido de materia orgánica de los lodos, les proporciona una capacidad de combustión no despreciable para su incineración.

### **B. PROPIEDADES QUÍMICAS**

#### **1. Materia orgánica**

Corresponde a la materia volátil, cuantificada por la diferencia entre el peso del lodo seco ( a 105 °C ), y el mismo después de calentarlo hasta peso constante a 550 °C.

Varía de 60% a 85% <sup>(6)</sup> de la materia seca.

#### **6. Resistencia específica**

Se mide la capacidad de filtración de los lodos , bajo una presión determinada  
Tiene como unidades m/Kg .

#### **7. Compresibilidad**

Cuando se incrementa la presión en la parte superior de un filtro, se obtiene un aplastamiento de la torta y un aumento de la resistencia a la filtración.

La representación logarítmica de la resistencia específica en función de la presión da un línea recta, en la que se determina el coeficiente de compresibilidad (pendiente de la recta ).

#### **8. Poder calorífico**

El contenido de materia orgánica de los lodos, les proporciona una capacidad de combustión no despreciable para su incineración.

### **B. PROPIEDADES QUÍMICAS**

#### **1. Materia orgánica**

Corresponde a la materia volátil, cuantificada por la diferencia entre el peso del lodo seco ( a 105 °C ), y el mismo después de calentarlo hasta peso constante a 550 ° C.

Varía de 60% a 85% <sup>101</sup> de la materia seca.

## **2. Elementos nutrientes**

**Se trata del contenido de nitrógeno total, fósforo expresado como  $P_2O_5$  y potasio expresado como  $K_2O$ .**

**Son sustancias que favorecen el crecimiento de la planta, y tienen gran importancia para la utilización agrícola de los lodos.**

## **3. Microcontaminantes orgánicos**

**Son sustancias que pueden tener acción negativa sobre el tratamiento de los lodos y su utilización en la agricultura.**

**Se trata generalmente de productos químicos de síntesis, y se encuentran contenidos en detergentes y medicinas.**

## **4. Microcontaminantes minerales**

**Se trata esencialmente de los metales pesados, algunos se encuentran en el suelo como el cobre, hierro, zinc, etcétera; y son indispensables para el crecimiento de las plantas, algunos metales pesados son introducidos por el hombre, a través de diversas actividades industriales.**

## **5. Vitaminas**

**El hombre consume muchas vitaminas, contenidas en los alimentos y como medicamentos. Pero, el organismo humano no utiliza todas, solo una parte de ellas, el resto son desechadas por la orina y las materias fecales.**

## **C. CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS**

Las aguas de desecho contienen una flora y fauna variada, se localizó una parte en los lodos. El tratamiento biológico de las aguas residuales modifica la composición biológica, debido a la multiplicación de ciertas especies en detrimento de otras.

### **1. Bacterias**

Se encuentran numerosos tipos de bacterias en los lodos, una parte de éstas es de origen fecal y alguna provienen de portadores de gérmenes, por consiguiente, pueden ser patógenos.

El tratamiento biológico de los lodos favorece el desarrollo de ciertas bacterias en detrimento de otras, y su almacenamiento permite a los organismos anaerobios desarrollarse.

Los microorganismos patógenos se encuentran comúnmente en los lodos y en los efluentes.

### **2. Virus**

Se encuentran enterovirus y reovirus adsorbidos sobre la materia sólida de los lodos, en una proporción no despreciable, alrededor del 30% <sup>(8)</sup> de las muestras de lodos.

No es fácil eliminarlos, por tanto, debe tenerse precaución en su uso posterior.

### **3. Protozoarios y Parásitos**

**Se encuentran numerosos parásitos en los lodos de origen fecal como:**

- huevos de ascaris,
- tricocéfalos,
- helmintos,
- tenias o duelas hepáticas,
- formas enquistadas de Giardia o tricomonas.

Su eliminación es difícil, puesto que toman una forma vegetativa cuando las condiciones les son hostiles, y se desarrollan cuando se encuentran en el hombre.

### **4. Hongos**

Son las levaduras y los saprófitos que están presentes normalmente en el aire, por lo general, no son patógenos para el hombre y los animales. No obstante, algunos pueden llegar a serlo cuando las condiciones son desfavorables (hongos oportunistas).

### **5. Algas**

No se encuentran en gran cantidad en los lodos primarios y secundarios.

#### IV. TRATAMIENTO DE LODOS

Los lodos con alto contenido de agua y biológicamente inestable, concentran una gran proporción de la contaminación de las aguas residuales.

El tratamiento de lodos tiene como objetivo:

- disminuir el volumen por eliminación de agua,
- reducir el poder de descomposición de los sólidos orgánicos putrescibles

(proceso de estabilización),

- y eliminar los microorganismos patógenos.

Algunas de las formas comunes para la disposición de los lodos son:

- Secar el lodo sobre el terreno de la planta depuradora.

Generalmente conviene para las plantas pequeñas, pero, no para las de las grandes ciudades, en donde el metro cuadrado de terreno aumenta constantemente de valor.

-Utilizarlo como fertilizante o mejorador de suelos, tratado o en forma de composta, además de mezclado con desperdicios domésticos u otros desechos orgánicos.

-La digestión anaerobia productora de gas metano aprovechable junto con la incineración de los lodos deshidratados para la producción de energía.

Las soluciones al problema tienen desventajas como:

- grandes inversiones para la instalación de un digestor o un horno de incineración,
- riesgo de contaminación bacteriana o parasitaria de los vegetales, por la utilización de los lodos como fertilizantes,
- acción nociva para la vegetación por parte de ciertos productos contenidos en los lodos,
- la deshidretación de los lodos constituye una operación consumidora de energía.

Por tanto, la solución al problema de los lodos requiere de un estudio profundo, que considere:

- datos técnicos,
- datos económicos,
- aspectos sociales,
- y una política de protección ambiental.

TRATAMIENTO DE LODOS						
	MEJORA Y CONDICIONAMIENTO	CONCENTRACION DE LA MATERIA SOLIDA	ELIMINACION DEL AGUA (FLOCULO)	REDUCCION BIOLÓGICA DE MATERIA ORGÁNICA	DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA	REDUCCION DE PATÓGENOS
CONDICIONAMIENTO	X					
ESPESAMIENTO		X				
DESHIDRATACIÓN			X			
DIGESTIÓN a) AEROBIA b) ANAEROBIA				X		
INCINERACIÓN					X	
DESINFECCIÓN						X

**Figura No. 4 Representación gráfica del tratamiento de lodos**

FUENTE: HERNANDEZ, JULIO AURELIO. (10)

## **A. ESPESAMIENTO**

La finalidad del espesamiento es la reducción del volumen por eliminación de agua. Los métodos usuales para el espesamiento son el asentamiento por gravedad y la flotación.

El asentamiento por gravedad se realiza en tanques equipados con un agitador lento, para aumentar la sedimentación, el líquido sobrenadante se regresa al proceso de tratamiento de aguas.

El espesamiento por flotación se obtiene por la creación de burbujas de gas que se adhieren a las partículas del lodo, dándoles flotación y arrastrándolas a la superficie.

Los lodos se retiran de la superficie y el líquido clarificado se regresa al proceso de tratamiento de agua.

Una vez espesados los lodos contienen una proporción de agua de:

- 97% a 98% <sup>(4)</sup> de las materias secas, que en su mayoría son orgánicas ( de naturaleza protídica).

- 70% a 80% <sup>(4)</sup> si las materias son minerales pesados y granulados.

## **B. ESTABILIZACIÓN**

El proceso de estabilización de los lodos es la aceleración de los procesos biológicos que favorecen las transformaciones bioquímicas del sustrato por medio de los microorganismos.

El propósito de la digestión es concentrar los lodos y descomponer la materia orgánica putrescible, hasta formar compuestos orgánicos estables y compuestos inorgánicos inertes.

La digestión de los lodos se puede realizar en condiciones aerobias y anaerobias.

### **1. Digestión aerobia**

En la digestión aerobia la estabilización de los lodos se efectúa por mineralización de la materia orgánica biodegradable, y la producción de dióxido de carbono, agua y productos solubles inorgánicos, debido a la acción de microorganismos existentes en el lodo y en presencia de oxígeno.

Los microorganismos han adsorbido y comenzado a transformar la materia orgánica en materia celular, esto ocurre durante su estancia en la etapa secundaria.

En el digestor aerobio los microorganismos se encuentran en condiciones endógenas, esto es, prácticamente la totalidad de la materia utilizable como alimento, se ha transformado en materia celular. En la etapa endógena la biomasa se limita a alimentarse e expensas de otros microorganismos o de sus reservas.

**Las variables principales del proceso son:**

- requerimientos de oxígeno,
- características del lodo digerido,
- temperatura,
- y tiempo de retención.

## **2. Digestión anaerobia**

El principio de este proceso reside en favorecer el desarrollo de bacterias metanogénicas, que actúen en anaerobiosis sobre la materia orgánica y la descomponen produciendo gas metano.

## **C. DESINFECCIÓN DE LODOS**

El propósito de la desinfección de los lodos es la destrucción de los microorganismos patógenos.

### **1. Pasteurización**

La pasteurización consiste en mantener los lodos a una temperatura de 80 ° C aproximadamente, por inyección de vapor durante media hora.

## 2. Tratamiento con cal

La cal permite la desinfección de los lodos, por adición de ésta hasta un pH de once. El inconveniente del tratamiento es su alto costo, se necesitan alrededor de 100 g de CaO por kilogramo de materia seca.

## 3. Tratamiento químico

Se utiliza para la desinfección el ozono y el cloro, el ozono es caro y el cloro es perjudicial para la aplicación de los lodos sobre el terreno.

Se usan derivados xilénicos o terpénicos, cuya acción no es nociva para las plantas.

## 4. Otros procesos

La desinfección puede efectuarse por procesos físicos como:

- ultrasonido,
- y los rayos ultravioleta.

## D. ACONDICIONAMIENTO DE LOS LODOS

La necesidad de espacio para el almacenamiento y el tratamiento subsecuente de los lodos son los factores que rigen comúnmente la disposición de los lodos digeridos.

Los lodos contienen sustancias coloidales cuyas propiedades favorecen la retención de agua entre las partículas sólidas, por lo que impiden la separación de los sólidos del líquido.

La separación se consigue desestabilizando los coloides, con procedimientos físicos y químicos.

#### 1. Tratamiento térmico

El calentamiento de un lodo produce una transformación irreversible de su estructura física. Durante el calentamiento se destruyen los geles coloidales, y se realizan dos fenómenos simultáneos:

1. Solubilización de algunas materias en suspensión,
2. y precipitación de materias en solución.

Las grasas se mantienen estables, la celulosa se degrada poco.

El calentamiento solubiliza el 25% de la DQO del lodo bruto, y produce filtrados con una DBO<sub>5</sub> del orden de 2000<sup>(4)</sup> mg/l a 3000<sup>(4)</sup> mg/l para los lodos residuales domésticos y de 5000 mg/l para lodos primarios.

Las ventajas del tratamiento térmico son:

- aplicación a todos los lodos, de preferencia orgánicos,
- control de la operación sencillo,
- desinfección del lodo,
- producción de lodos de espesamiento rápido y de fácil deshidratación.

Desventajas del tratamiento térmico convencional:

- olores producidos durante el tratamiento,
- corrosión y ensuciamiento en los tubos de los cambiadores de calor, por consiguiente, altos costos de mantenimiento,
- requiere energía,
- el líquido recirculado incrementa la DQO del tratamiento secundario.

## 2. Descenso de la temperatura

La solidificación del lodo por congelación reduce la cantidad de agua asociada a la materia. La filtración se mejora y se facilita su drenado. La congelación se realiza en un intervalo de temperaturas de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y durante cuatro horas.

La técnica es costosa<sup>(4)</sup>.

## 3. Tratamiento químico

La adición de productos con propiedades electroquímicas favorecen la desestabilización de los coloides, por coagulación y formación de floculos fácilmente decantables o filtrables.

Se usan para este fin:

- sales minerales,
- y polielectrólitos naturales o sintéticos.

#### **4. Deshidratación de los lodos**

La deshidratación es la remoción de suficiente cantidad de agua de los lodos, para que adquieran características de sólidos.

La deshidratación se realiza con un porcentaje de sólidos del 50% aproximadamente.

Para la deshidratación se utilizan:

- la filtración, empleando filtros al vacío con tambores rotatorios o filtros de placas y marco a presión,
- la centrifugación,
- los lechos de secado de arena, donde el agua se separa por una combinación de drenado y evaporación.

#### **E. DISPOSICIÓN DE LOS LODOS**

##### **1. Incineración**

La incineración es empleada como método último de disposición de los lodos, y cuando los lodos han sido desecados.

La incineración no resuelve el problema de la disposición, puesto que, todavía será necesario disponer de la ceniza residual, descarga al mar o disponiéndola en terreno.

La ceniza puede aprovecharse en el acondicionamiento de lodos y como auxiliar filtrante en la deshidratación.

## **2. Acondicionamiento de suelos**

Dependiendo del tratamiento aplicado a los lodos se obtiene a la salida de las plantas depuradoras lodos líquidos, pastosos, en comprimidos o en polvo.

El alto contenido de materia orgánica y nutrientes hace que se consideren como fertilizantes ideales. Durante su tratamiento pierden nitrógeno y fósforo, dependiendo de la cantidad de agua perdida.

Se obtendrá un fertilizante de mayor valor cuando se use la fase líquida, además, constituye un beneficio al reducir la carga de nitrógeno y fósforo al proceso secundario (biológico).

Una de las limitaciones es la capacidad de adsorción, debido a la acumulación de metales pesados, como estos permanecen junto a los sólidos de los lodos, su concentración aumenta según se reduce el contenido de agua.

## V. DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es la transformación biológica en un medio sin oxígeno de la materia orgánica a productos finales inertes, como son gases y sales minerales.

### A. Microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia

En la naturaleza, por acción microbiana, cualquier desecho, agua residual o tipo de materia orgánica sufre una transformación o degradación biológica espontánea, tanto en condiciones anaerobias como aerobias.

En un digestor anaerobio se identifican los siguientes procesos:

1. hidrólisis de biopolímeros,
  - 1a. hidrólisis de proteínas,
  - 1b. hidrólisis de carbohidratos,
  - 1c. hidrólisis de lípidos.
2. Fermentación y aminoácidos y azúcares.
3. Oxidación anaeróbica de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes.
4. Oxidación anaeróbica de productos intermedarios tales como ácidos volátiles ( con excepción del acetato ).
5. Conversión del acetato en metano.

#### 6. Conversión del hidrógeno a metano.

Las especies microbianas de la comunidad fermentativa son capaces de atacar moléculas poliméricas aun en forma de material sólido ya que poseen exoenzimas hidrolíticas que hidrolizan el material polimérico a material de bajo peso molecular inclusive monómeros: proteína a aminoácidos [1a], polisacáridos a oligo o monosacáridos [1b] y lípidos a ácidos grasos [1c]; estas pequeñas moléculas ya solubles son utilizadas por la misma comunidad para sus actividades metabólicas.

Las especies bacterianas que utilizan sustratos de tipo proteico, son diferentes a aquella que utilizan sustratos de tipo polisacáridos en competencia con estas bacterias fermentativas [1a] y [1b] existen otras bacterias fermentativas que son incapaces de hidrolizar material polimérico, pero, que utilizan pequeñas moléculas solubles para sus actividades metabólicas (2) como resultado de las actividades metabólicas hasta aquí descritas aparecen en el medio (licor mezclado) un número de productos finales reducidos: ácidos grasos volátiles de dos a cinco o más átomos de carbono, etanol (y otros alcoholes o cetonas) y/o ácidos orgánicos, tales como el ácido láctico.

Debido a que durante este paso se produce gran cantidad de ácidos orgánicos, se denomina acidogénesis. Los ácidos orgánicos aparecen en el licor mezclado en forma de aniones y se originan de moléculas neutras de sustrato.

Los microorganismos metanogénicos no son bacterias verdaderas: como las subbacterias derivan de un antecesor común: Progenotes.

Las bacterias metanogénicas son denominadas Archae-bacterias y difieren de las eubacterias, además de ser los organismos vivos más antiguos en la tierra.

Los únicos sustratos utilizados por estas Archae bacterias son el  $H_2$ , el  $CO_2$  y el acetato, hay solamente algunas excepciones pero con compuestos orgánicos muy relacionados ( metanol, formato, monóxido de carbono y metilaminas).

Las especies microbianas denominadas hidrogenotróficas (6), son Archae-bacterias quimolitotróficas que reducen el  $CO_2$  con  $H_2$  para obtener su energía, son Archae-bacterias autotróficas que asimilan el  $CO_2$  como fuente de carbono.

Otras especies microbianas, denominadas acetoclásticas (5) son Archae-bacterias quimioorganotróficas que descomponen el acetato en metano y bióxido de carbono, obtienen su energía a partir del acetato, sin embargo, no necesariamente a través de descomponer el acetato y son heterotróficas ya que asimilan el acetato como fuente de carbón. El acetato es un anión, al descomponerse en  $CH_4$  y  $CO_2$  debe estar presente un catión apareador ( $NH_4^+$  ó  $H_3O^+$ ) pudiéndose entonces formar  $NH_4CO_2$  o  $H_2CO_3$ , cuyos efectos son alcalinizar el medio.

Varios grupos bacterianos sirven como unión entre la etapa fermentativa y la metanogénica, algunas de ellas, inclusive compiten con las bacterias fermentativas por los sustratos monoméricos otras compiten con las Archae-bacterias metanogénicas por el acetato,  $H_2$  y  $CO_2$ .

Los ácidos grasos volátiles son metabolizados a acetato,  $H_2$  y  $CO_2$  por especies microbianas pertenecientes al grupo de las bacterias acetogénicas obligadas

productoras de  $H_2$  denominadas bacterias obligadas reductoras de protones (3)(4).

Estas bacterias por razones termodinámicas pueden vivir solamente en sintrofia, no en simbiosis, con bacterias hidrogenotróficas. Como resultado la presión parcial de hidrógeno, su intermediario común,  $H_2$ , permanece siempre muy bajo.

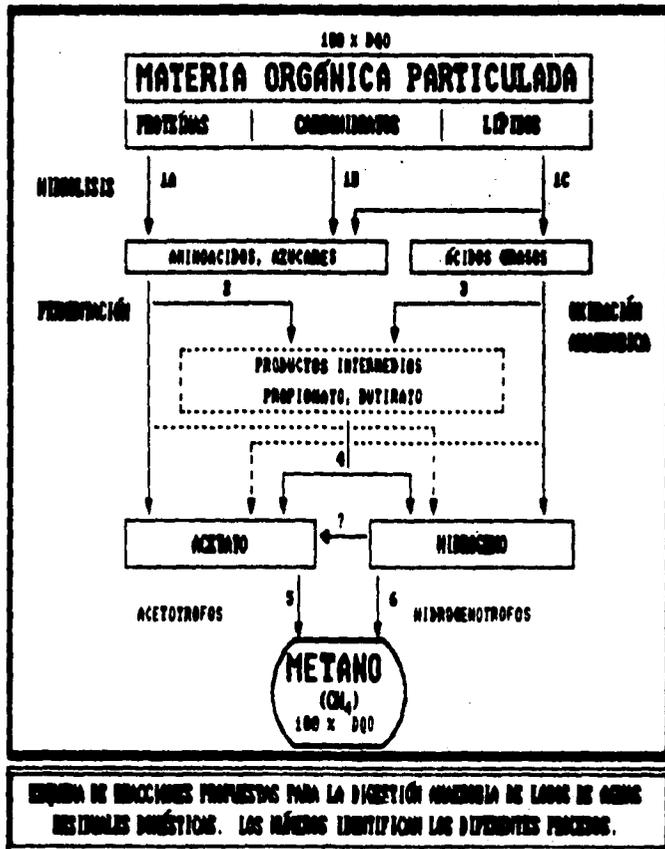
El etanol y el lactato son también metabolizados a acetato,  $H_2$  y  $CO_2$  por otros grupos de bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno (4), otras especies microbianas pueden competir con estas cuando el anión sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) está presente en el medio las bacterias sulfato reductoras son importantes algunas de ellas pueden competir con las bacterias acetogénicas productoras obligadas de  $H_2$  por los ácidos grasos volátiles. El grupo bacteriano capaz de utilizar el etanol y el lactato consta principalmente de bacterias sulfato reductoras y cuando el  $SO_4^{2-}$  esta presente, el  $H_2$  producido a partir de los sustratos orgánicos se usa para reducir el  $SO_4^{2-}$  y formar sulfuro  $HS^-$ .

Cuando las bacterias hidrogenotróficas estan presentes el  $H_2$  es utilizado por estas. Existe además otro grupo de bacterias hidrogenotróficas que juegan un papel muy importante en la comunidad global del proceso metanogénico, estas bacterias llamadas homoacetogénicas son quimolitotróficas y obtienen su energía de la reducción del bióxido de carbono con  $H_2$  para producir solamente acetato, de ahí su nombre. Algunas de estas bacterias son autotróficas y capaz de asimilar el  $CO_2$ .

Otras bacterias homoacetogénicas tambien compiten con las bacterias fermentativas, puesto que, son capaces de producir solamente acetato a partir de la glucosa; en este caso son quimioorganotróficas y mixotróficas, esto es auto y

heterotróficas al mismo tiempo.

Los ácidos grasos no pueden ser metabolizados solos a productos finales reducidos por razones termodinámicas. Son también metabolizados a acetatos,  $H_2$  y  $CO_2$  por otro grupo de bacterias acetogénicas productoras obligadas de  $H_2$  que tienen que vivir en simbiosis obligada con bacterias hidrogenotróficas para poder mantener durante todo el tiempo reducida la presión parcial del  $H_2$  en el digestor.



ESQUEMA DE REACCIONES PROPUESTAS PARA LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE LAGOS DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS. LOS NÚMEROS IDENTIFICAN LAS DIFERENTES FASES.

FIGURA No. 9

FUENTE: HOLLER, KEMMER. (19)

CUADRO No.1

ORGANISMOS	Número de organismos/ml
Methanobacterium formicicum	> 10 <sup>7</sup>
Methanobacterium ruminantium	> 10 <sup>7</sup>
Methanosarcina barkeri	> 10 <sup>6</sup>
Methanospirillum sp.	> 10 <sup>6</sup>
Methanococcus sp.	> 10 <sup>6</sup>
Methanobacterium sp.	> 10 <sup>7</sup>

Bacterias metanogénicas encontradas en los lodos de aguas residuales.

Ref. Moeller. [19]

### C. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO GLOBAL DE DIGESTIÓN

En un análisis del tren de tratamiento para depurar las aguas residuales, la atención se centra en como optimizar una o más de las variables implicadas en el proceso de estabilización del lodo y su disposición.

Algunos de los factores que normalmente se consideran para la optimización son:

- estabilización de la materia orgánica,
- biodegradabilidad,
- producción de energía,

- deshidratación,
- costo e impacto económico.

#### **D. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO GLOBAL DE DIGESTIÓN**

##### **1. Temperatura**

El control de la temperatura es un parámetro crítico. Los sistemas no responden al cambio de temperatura de una manera lineal, sin embargo, es posible conocer las temperaturas:

- óptima,
- máxima,
- y mínima para la actividad microbiana.

La población microbiana puede responder al cambio de temperatura en dos formas:

1. Por el cambio inmediato en la rapidez de su actividad.
2. Por un cambio no inmediato en la composición de su población.

La población es óptima para una temperatura dada, por consiguiente, es importante mantener el proceso de digestión, entre los límites donde no hay disminución en la actividad microbiana ni ocurran cambios en la población.

## **2. Composición del sustrato**

Para asegurar la completa descomposición de la materia orgánica, es necesario que el carbón orgánico sea el factor limitante.

Cuando el contenido de nitrógeno y fósforo es bajo, implica una limitación de estos, puesto que, no solo disminuye la velocidad global de metanización, además, induce a una acumulación de ácido orgánicos, y por consecuencia, una disminución en el pH, principal inhibidor de la metanogénesis.

## **3. pH**

El pH debe mantenerse neutro o ligeramente alcalino, prácticamente entre 6.5 y 8.0 unidades de pH.

Este es un problema difícil de superar, debido a los ácidos carboxílicos, productos de algunas fermentaciones, que ocasiona una disminución en el pH.

Este problema puede solucionarse por un control externo:

- adicionando bases o soluciones reguladores de pH,
- adicionando nitrógeno, con la producción de amoníaco se neutraliza la acidez,
- y manteniendo equilibrada la flora microbiana, consumidora de los ácidos orgánicos.

## **4. Composición de los lodos**

Los lodos domésticos se componen de una mezcla de sólidos heterogéneos, que varía de ciudad a ciudad, y de temporada a temporada.

### 5. Mezclado

El mezclado permite:

-distribuir el alimento uniformemente, lo que implica, estar siempre a disposición de los microorganismos,

- mantener una homogeneidad térmica, para evitar la estratificación por diferencia de temperaturas.

**CUADRO No. 2**

**Efectos de la velocidad de mezclado sobre la producción de gas**

<b>Velocidad (rpm)</b>	<b>39</b>	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>120</b>	<b>150</b>
<b>Gas (l/día)</b>	<b>29.52</b>	<b>29.95</b>	<b>29.20</b>	<b>30.04</b>	<b>30.92</b>

Los valores de producción de gas del cuadro No. 2 se obtuvieron de unos digestores, que iniciaron a régimen semicontinuo con un volumen de 18 litros, y con una alimentación de un litro de sustrato cada 24 horas.

Referencia: Donald (5)

### 6. Potencial redox

La digestión óptima se realiza para los valores del potencial redox entre -270 mV y -300 mV.

El intervalo funcional es de -240 mV a -300 mV, con una actividad que decrece en los límites del intervalo.

Los valores entre el intervalo del potencial redox implican la ausencia de oxígeno y otras sustancias con un potencial redox elevado como el nitrato o sulfato, así como la presencia de sustancias con un potencial bajo.

## **E. DIGESTORES ANAEROBIOS DE LODOS**

La tecnología empleada para el tratamiento de los lodos de purga, evacuados de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, tiene alrededor de 40 años<sup>(21)</sup>. Existen básicamente dos variantes de digestores:

- de baja tasa,
- y de alta tasa.

### **1. Digestión de baja tasa**

Este proceso conocido como convencional, se efectúa en un tanque sin mezclado, con o sin calentamiento. La estratificación del contenido del reactor hace que en el 50% del volumen se efectúe la actividad biológica.

Su aplicación es en plantas pequeñas.

### **2. Digestión de alta tasa**

En este caso se incorpora un mezclado al medio de reacción, mediante agitación mecánica, por recirculación de gas o de líquido, o una combinación de éstos.

El calentamiento también se utiliza en este proceso.

Frecuentemente se asocia con otro tanque de igual volumen o una laguna, para separar los lodos evacuados en efluente del primer reactor.

#### F. CINÉTICA DE LA DIGESTIÓN

Varios autores<sup>(14)</sup> han observado una relación simple entre la rapidez de reacción y concentración de sustratos.

El sistema se comporta con una cinética de primer orden, esto es, con relación de velocidad de reacción directamente proporcional a la concentración de sustrato (materia orgánica).

#### G. BIOGAS

El gas producido se compone principalmente de metano y dióxido de carbono, en las siguientes proporciones<sup>(15)</sup>:

- CH<sub>4</sub> : 65% a 70% ,
- CO<sub>2</sub> : 25% a 30% , en volumen.

Pueden encontrarse otros compuestos como:

- CO : 2% a 4% ,
- N<sub>2</sub> : 1% ,
- H<sub>2</sub>S ,

- hidrocarburos : 0% a 1.5% .

La producción de gas es el criterio mas representativo de la calidad de la digestión.

La producción de biogas depende de dos factores:

1. Temperature.
2. Tiempo de residencia.

Los valores típicos de producción de biogas en digestores de lodos son <sup>(4)</sup>:

- 0.5 a 0.75 m<sup>3</sup>/kg de SSV alimentados,
- 0.75 a 1.12 m<sup>3</sup>/kg de SSV eliminados.

El metano en condiciones normales de temperatura y presión

( 0 ° C y 760 mmHg ) tiene un poder calorífico de 8847 Kcal/m<sup>3</sup>.

## VI. PRETRATAMIENTOS AL LODO

Contrario a los rellenos sanitarios, la metanización en digestores requiere más tecnología, por ejemplo, recipientes cerrados con un control en la temperatura y la agitación. Trabajando a régimen continuo o semicontinuo. Con base en el control de las variables se optimiza el proceso, y como consecuencia se reduce el volumen del reactor, y se evita la contaminación del aire y del suelo. También se aprovechan los productos de la digestión principalmente para composteo y combustible.

Con el fin de optimizar la producción de gas y la recuperación de energía, los científicos han estudiado el efecto de pretratamientos al lodo influente y/o múltiples etapas en la digestión anaerobia.

Los pretratamientos son empleados para modificar las características físicas y químicas de la materia orgánica, en espera de una mayor conversión del lodo.

Una comprensión del fundamento de los pretratamientos ayudará a un mejor diseño de éstos. El estudio del proceso de la digestión anaerobia de lodos requiere que se trabaje a diferentes escalas. La necesidad de realizar experimentación a diferentes escalas es una medida del grado de ignorancia que existe en el desarrollo de un proceso.

Este grado de ignorancia puede tener distintas manifestaciones, como son:

- Información sobre el comportamiento del proceso en condiciones que no se dan en el laboratorio ( planta piloto ).
- Información sobre la resistencia a la corrosión de distintos materiales, en diferentes condiciones de operación ( escala de laboratorio).
- Información sobre el grado de separación y purificación de los productos ( planta piloto ).

#### **A. PRETRATAMIENTO ALCALINO**

Alrededor del 60% de la materia orgánica permanece después de la etapa principal de una digestión semicontinua sin pretratamiento, esto es, principalmente por la presencia de paredes vegetales impregnadas con lignina ( complejos de lignina-celulosa). Las celulosas son generalmente resistentes a la hidrólisis por enzimas o ácidos, debido a los problemas estructurales de la celulosa y la lignina.

La celulosa libre es digerible, pero, asociada con la lignina es poco degradable.

Otros factores como el acceso a la superficie, distribución del diámetro de poro, grado de polimerización y el contenido de humedad, influyen en la velocidad y la extensión de la digestión de la celulosa.

Con la comprensión de la naturaleza física, química y estructural de la celulosa es posible evaluar la efectividad del pretratamiento, de acuerdo a un criterio

seleccionado como:

- rapidez de la hidrólisis,
- generación de productos.

El pretratamiento alcalino es el método más conocido para aumentar la biodigestión de la celulosa.

La aplicación de una base como el hidróxido de sodio, da como resultado la remoción o ruptura de la lignina, y por consiguiente, un incremento en el área superficial, debida al hinchamiento de la celulosa y a cierta descristalización.

Colleran et. al.<sup>[8]</sup> experimentaron con varios pretratamientos e informaron que el tratamiento alcalino es el más efectivo para optimizar el proceso de digestión.

Un incremento del 50% en la producción de gas metano fue logrado durante la digestión de paja de trigo en un reactor de dos etapas.

Desde el punto de vista de diseño del proceso, el intervalo de tiempo entre el tratamiento caústico del sustrato, y la posterior neutralización por ácido, seguida por una digestión biológica será de gran importancia en la decisión de:

- aumentar la velocidad,
- y la generación de metano.

## **B. PRETRATAMIENTO TÉRMICO**

El tratamiento térmico es normalmente usado como un proceso acondicionador para lodos crudos o digeridos, antes de la deshidratación.

Como un proceso acondicionador, el tratamiento térmico mejora la deshidratación de los lodos primarios y activados. Adicionalmente, el lodo generalmente bien decantado reduce la carga hidráulica, puesto que, se facilita el subsecuente desaguado.

Asumiendo un intervalo de temperatura para el acondicionamiento térmico de 150 a 200 ° C, la torta final de lodo estará adecuadamente pasteurizada.

El acondicionamiento térmico tiene cuatro desventajas:

1. Olores producidos durante el tratamiento.

El control de éstos olores puede ser difícil, porque se presentan en el licor decantado y el lodo separado.

2. La corrosión y el ensuciamiento de los tubos de los cambiadores de calor.

Este es un problema de materiales y mantenimiento, y puede solucionarse a costos elevados.

3. El proceso requiere de energía.

4. El líquido separado requiere algún tratamiento antes de ser recirculado a la planta de tratamiento. Si se recircula directamente, los compuestos orgánicos solubles pueden incrementar la carga de la DQO hasta en un 30%.

Según Haug <sup>(8)</sup> :

1. El pretratamiento térmico antes de la digestión anaerobia muestra un incremento en la biodegradabilidad y deshidratación de los lodos.

2. El pretratamiento de los lodos activados resulto en un incremento del 60% en la producción de metano, y en un 36% decrece en sólidos suspendidos volátiles en el efluente de la digestión.

Los problemas de toxicidad pueden ocurrir, si no se le da el tiempo necesario para la aclimatación de los cultivos.

La deshidratación se incrementa considerablemente después del pretratamiento térmico y la digestión.

3. El pretratamiento térmico de lodos primarios, a 175 °C durante media hora, no incrementa la degradabilidad durante la digestión, pero, si aparece un aumento en la deshidratación.

4. El pretratamiento térmico de una mezcla de lodos activados y lodos primarios, a razón de 1:1 en sólidos volátiles, aumentan la producción de metano en un 14% , reducen los sólidos suspendidos volátiles para la disposición última en un 16%, e incrementaron la deshidratación del lodo.

No hay problemas de toxicidad.

5. La temperatura a la cual el pretratamiento térmico se efectuó, tuvo un pronunciado efecto sobre la biodegradabilidad.

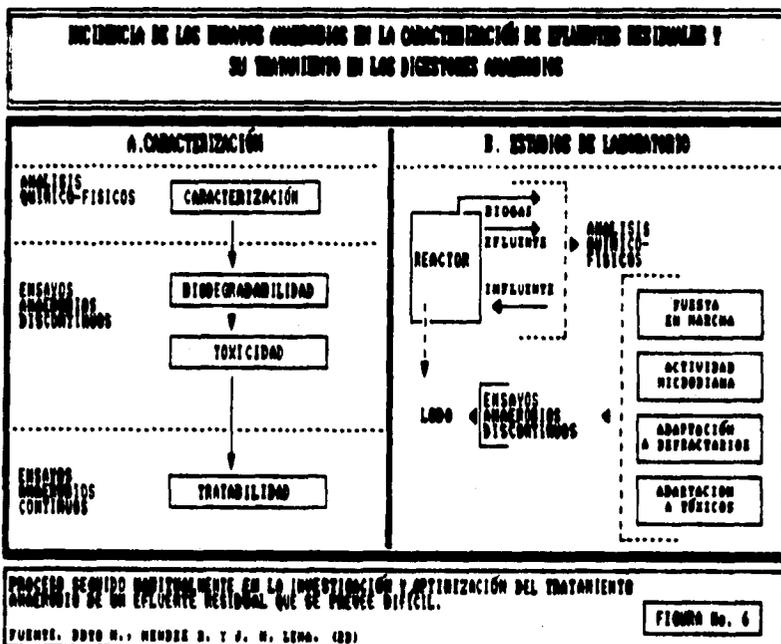
Con lodos activados, la biodegradabilidad se incrementó a una temperatura óptima, cercana a 175 °C , a una temperatura más elevada la producción de biogas

decrece, presumiblemente por la formación de sustancias inhibitoras.

6. El pretratamiento térmico antes de la digestión anaerobia, puede acrecentar la producción neta de energía del sistema, porque, aumenta la biodegradabilidad y se reduce el requerimiento del calentamiento del digestor.

7. Recirculando el líquido resultante de la deshidratación, no significa un incremento en la demanda de oxígeno sobre el tratamiento biológico.

8. El olor normalmente asociado con el tratamiento se reduce significativamente durante la digestión del lodo pretratado térmicamente.



## VII. ANTECEDENTES EXPERIMENTALES

**Bioensayo para monitorear el Potencial Bioquímico del Metano y la Toxicidad Anaerobia <sup>(22)</sup>.**

Las técnicas presentadas son para medir la biodegradabilidad de materiales sujetos a tratamiento anaerobio (Potencial Bioquímico del Metano -PBM [Biochemical Methane Potential (BMP)]) y la Toxicidad ( Ensayo de Toxicidad Anaerobia-ATA [Anaerobic Toxicity Assay] ).

Estos bioensayos relativamente simples pueden efectuarse en muchos laboratorios de investigación, sin la necesidad de equipo sofisticado.

PBM es una medida de la biodegradabilidad del sustrato determinado por el monitoreo de la producción acumulativa de metano, de una muestra la cual es anaeróbicamente incubada en un medio químico definido.

ATA mide los efectos adversos de un componente sobre la velocidad en la producción total de gas, de un sustrato metanogénico, fácilmente utilizable.

### A. INTRODUCCIÓN

Un procedimiento simple y barato es necesario para monitorear la biodegradabilidad relativa, y posible toxicidad de constituyentes en las fuentes de alimentación a los procesos de tratamiento anaerobio.

Para satisfacer estas necesidades se desarrolló una técnica de bioensayo anaerobio por lotes .

El proceso general puede ser modificado para estimar, tanto el Potencial Bioquímico del Metano como para un Ensayo Anaerobio de Toxicidad.

## B. ANTECEDENTES

Los procesos de tratamiento anaerobio son ampliamente utilizados para la estabilización biológica de lodos orgánicos concentrados.

En procesos anaerobios existe la duda acerca de la eficiencia del tratamiento, y de la confiabilidad del proceso, puesto que, muchos residuos para la bioconversión son relativamente no biodegradables, además, pueden contener materiales tóxicos para los microorganismos metanogénicos.

En el pasado, las causas de las fallas del sistema anaerobio han sido difíciles de fijar por lo complejo de las mezclas tratadas. Otras dificultades incluyen el análisis para la gran variedad de inhibidores potenciales ( muchos de los cuales no han sido identificados ) y la falta de conocimiento de las interacciones entre las bacterias metanogénicas y los inhibidores, además, de otros constituyentes de la mezcla a digerir.

Ha sido difícil distinguir entre fallas debido a materiales tóxicos, y las resultantes del diseño u operación.

Las técnicas de Bioensayo para medir la presencia o ausencia de sustancias inhibitoras, ofrecen la esperanza para solucionar problemas de tratamiento anaerobio, porque, son relativamente sencillas y baratas, y no requieren del conocimiento de sustancias inhibitoras específicas.

También, las técnicas de bioensayo son esenciales para determinar la biodegradabilidad, puesto que, los procesos químicos no distinguen entre orgánicos biodegradables y no biodegradables.

Las técnicas de alimentación continua ( o semicontinua ) y por lotes, se han utilizado para evaluar la toxicidad y biodegradabilidad. Los procesos continuos simulan fielmente a escala natural la operación anaerobia, sin embargo, son costosos en términos de facilidad de equipo, tiempo y personal.

Las técnicas de bioensayo por lotes no tienen estas limitaciones, y permiten evaluar un amplio intervalo de variables. También, pueden evaluar la influencia de altas cargas, pero, en general no simulan bien los efectos de un sistema real.

No obstante, se utilizan mucho para clasificar variables externas, y para el desarrollo de un eficiente programa de ensayo con alimentación continua.

### **C. POTENCIAL BIOQUÍMICO DEL METANO (PMB)**

**El BMP es una medida de la biodegradabilidad de la muestra.**

**El metano producido por la descomposición de la muestra se determina por la sustracción de valores anteriores, obtenidos de un blanco de las muestras totales.**

El tamaño de la muestra y la relación de líquido-volumen vacío es importante para la precisión y exactitud del bioensayo, se recomienda:

1. Proveer de una medida para una producción de metano de 20 ml a 120 ml.
2. Garantizar que los nutrientes no estén limitados.
3. Eliminar posibles sustratos tóxicos.

Para una degradación fácil y orgánicos no tóxicos, como la celulosa, una muestra líquida de 2 ml a 20 ml ( o una muestra seca que contenga 150 mg de DQO ) es normalmente utilizada, con un volumen total de líquido en el frasco de ensayo de 160 ml ( con un volumen vacío de 104 ml ).

La DQO degradable estimada es menor que 2 g/l en un ensayo líquido.

Estos valores pueden ajustarse cuando la toxicidad y/o baja degradabilidad se esperan, y varias diluciones pueden realizarse cuando no se dispone de una degradabilidad.

Un volumen total de líquido mayor de 200 ml puede usarse para disminuir el volumen vacío, y proporcionar exactitud en las determinaciones del metano cuando una baja producción de gas se estima.

Un balance detallado del metano es aplicado para cada muestra durante el ensayo, y el volumen de gas es monitoreado periódicamente. Debe extraerse el gas como una medida preventiva para evitar un aumento en la presión del sistema, cuando la diferencia entre la presión interna y la atmosférica es mayor a 0.5 atm.

El contenido de metano se determina del gas extraído.

La muestra de gas para ser analizada por cromatografía de gases, se extrae

de los frascos de suero con un jeringa para gases.

La precisión y exactitud de la prueba son funciones del error normal de la contribución, debida al inóculo y metabolismo del sustrato. En orden a minimizar la contribución de metano de los organismos, un digestor semicontinuo se mantiene con una baja carga orgánica, y la siembra para inocular se remueve del digestor antes de alimentar normalmente.

El metano total producido de la siembra puede limitarse a menos del 1.5 ml +/- 0.5 ml, durante un período de incubación de 30 días.

El periodo de incubación es normalmente de 30 días, en los cuales virtualmente existe la descomposición completa de orgánicos biodegradables en muchos casos.

Este procedimiento elimina variaciones debidas a las diferentes velocidades metabólicas. Algunos orgánicos, sin embargo, pueden requerir un periodo largo para su aclimatación.

El PMB esta referido para:

- volumen de muestra (  $m^3 CH_4 / m^3$  de muestra ),
- masa de muestra (  $m^3 CH_4 / Kg$  de muestra ),
- y contenido orgánico de la muestra (  $m^3 CH_4 / Kg$  de DQO ).

La referencia al contenido orgánico permite transferir directamente los resultados a porcentaje de materia orgánica convertida en metano utilizando el valor teórico de (0.350  $m^3 CH_4 / Kg$  de DQO) en condiciones normales de presión y temperatura.

#### **D. ENSAYO DE TOXICIDAD ANAEROBIA (ATA)**

La toxicidad anaerobia es determinada como los efectos adversos de una sustancia sobre los organismos metanogénicos predominantes, por ejemplo, los que convierten ácido acético y propiónico a metano. Los frascos para el ensayo de ATA se preparan similar al ensayo de PBM, con un medio definido, siembra de inóculo y muestras.

Asimismo, se adiciona acetato y propionato. La velocidad metabólica del acetato-propionato, es monitoreada por la producción total de gas. La inhibición debida a la adición de la muestra se determina como una disminución en la velocidad relativa de la producción de gas, tomando como base la producción de gas de un digestor de control.

El ATA normalmente se efectúa bajo condiciones de incubación.

En ciertos casos se puede utilizar la agitación, puesto que, todos los sólidos y microorganismos se asienta y concentran en el fondo de los frascos de ensayo cuando no se agitan.

También, la agitación puede ser deseable cuando la toxicidad se asocia con partículas directamente o por adsorción.

Los datos de producción total del gas son empleados para determinar la velocidad metabólica del acetato y propionato.

La velocidad máxima de producción de gas es calculada para cada muestra sobre el mismo período de tiempo, y los datos son normalizados por el cálculo de

las relaciones entre las velocidades respectivas para las muestras y el promedio de los controles. Esta razón se conoce como : razón de la velocidad máxima [MRR (Maximun Rate Ratio)]. Porque la producción de gas es relativamente exacta, un MRR menor que 0.95 indica posible inhibición, y un MRR menor a 0.9 indica una inhibición importante. Empero, la interpretación de los datos es algunas veces complicado por la producción de gas resultante de la descomposición del lodo, también, por la variación en las relaciones de la producción del dióxido de carbono y metano.

No obstante, la toxicidad relativa puede estimarse razonablemente bien en muchos casos, y si se considera necesario puede confirmarse por estudios semicontinuos.

Ejemplo No. 1 de la aplicación de las técnicas de bioensayo:

El uso del BMP y ATA son demostrados con datos del análisis del lodo pretratado termoquímicamente.

Las muestras de lodo analizadas han sido previamente tratadas con calor y álcali durante una hora a 100 °C, 200 °C y 250 °C con el propósito de acrecentar la biodegradabilidad anaerobia. Las muestras fueron analizadas por los procedimientos PMB y ATA, los resultados fueron comparados con un control P1 (muestra no tratada) y un control del tratamiento alcalino P2 (muestra sin tratamiento con calor).<sup>(22)</sup>

Los resultados se muestran en la figura número siete.

PRODUCCIÓN ACUMULATIVA DE GAS Y NMR PARA ENSAYO DE TOXICIDAD AGUDA (ATA)						
MUESTRA	concentración de gas (g/l)	PRODUCCIÓN ACUMULATIVA DE GAS (ml)				
		Tiempo de incubación				
		5 días	30 1/2 días	45 1/2 días	CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> <sup>a</sup>	NMR <sup>b</sup>
CONTROL ALIMENTACIÓN	-	39.1 +/- 1.9	76.7	88.0 +/- 2.3	2.0	-
CONTROL TIPOCETO	-	9.0 +/- 0.2	20.9	32.9 +/- 2.4	-	-
CONTROL DE NO NADH	0.4	39.4	74.5	79.8	0.0	0.92
	2.0	37.7	76.5	78.1	0.0	1.00
	16.0	32.8	81.9	85.9	0.0	1.00
CONTROL DE NADH	0.4	39.3	74.4	80.0	0.0	0.92
	2.0	38.9	75.7	80.7	0.0	0.99
	16.0	32.6	82.0	85.7	0.0	1.00
P3 100 C NADH	0.4	68.2	76.5	82.4	0.0	1.00
	2.0	62.7 +/- 0.4	79.7 +/- 0.3	84.7 +/- 0.3	0.0	1.00
	16.0	62.3	84.1	94.5	0.0	1.00
P4 250 C NADH	0.4	39.9	74.0	79.3	0.0	1.00
	2.0	39.0	75.0	82.3	0.0	1.00
	16.0	37.0	80.0	86.0	0.0	1.00
P5 250 C NADH	0.4	37.3	73.3	79.0	0.0	0.92
	2.0	33.7 +/- 0.9	80.4 +/- 0.3	81.3 +/- 0.2	0.0	1.00
	16.0	31.3	89.0	92.0	0.0	1.00

<sup>a</sup> Razón de retardo-difusión de carbono en el ensayo, medido después de 45 días.

o NMR = "Maximum Rate Ratio" =  $\frac{\text{PRODUCCIÓN DE GAS DE LA MUESTRA}}{\text{PRODUCCIÓN DE GAS DEL CONTROL DE ALIMENTACIÓN}}$ , medido a los cinco días.

REFERENCIA: BUSH, P. M. ET. AL. (20)

FIGURA No.7

## **E. RESUMEN**

Según Owen<sup>(22)</sup> concluye que:

- El incremento en la temperatura para un lodo pretratado con álcali incrementa tanto la biodegradabilidad como la toxicidad de los productos.

- El tratamiento térmico-alcálico convierte el lodo, de un orgánico no digerible a un producto que puede ser parcialmente convertido en gas metano por un tratamiento anaerobio.

Las técnicas de bioensayo anaerobio descritas son relativamente rápidas, y exactas para estimar el potencial bioquímico del metano y la toxicidad del lodo.

Pueden investigarse muchas variables , y pueden cubrirse condiciones favorables para estudios detallados.

Además, los resultados pueden expresarse en términos comunes de ingeniería, los cuales pueden aplicarse para estimar el desarrollo de procesos anaerobios.

Los procesos son muy flexibles, permitiendo una gran variedad de estudios.

Por ejemplo, ambas fases líquido y gas de los ensayos pueden monitorearse.

Por consiguiente, el avance en la utilización del sustrato, la formación de intermediarios y su utilización pueden monitorearse simultáneamente.

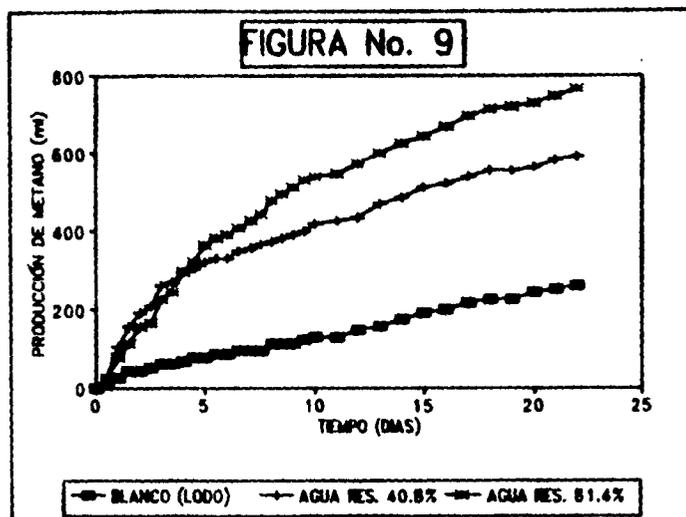
Estas posibilidades son importantes para identificar las causas y los efectos de la toxicidad.

BIODIGERABILIDAD COMBUSTION DE LODO CON TRATAMIENTO TERMICO Y ALCALINO					
MUESTRA	TRATAMIENTO temperatura °C	CONCENTRACION <sup>¶</sup> g l <sup>-1</sup>	PBI <sup>**</sup>		CONVERSION <sup>†</sup> eficiencia
			m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / Kg DQO	m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / Kg ST	
P1	CONTROL DE LODO	0.5	0.000	0.000	0
P1		2.0	0.000	0.000	0
P2	CONTROL DEL TRATAMIENTO ALCALINO	0.5	0.007	0.010	2
P2		2.0	0.006	0.010	2
P3	100	0.5	0.035	0.043	10
P3		2.0	0.033	0.041	9
P4	200	0.5	0.071	0.080	20
P4		2.0	0.074	0.090	21
P5	250	0.5	0.089	0.116	26
P5		2.0	0.078	0.101	22

<sup>¶</sup> Concentracion total de solidos de un muestra de lodo seco .  
<sup>\*\*</sup> " Potencial Bioquimico de Metano", en condiciones normales de temperatura y presion.  
 Tiempo de incubacion = 31 dias ; referidos al DQO y Solidos Totales (ST) de la muestra.  
<sup>†</sup> Eficiencia en la conversion de organicos a metano; con fundamento en el valor teorico del DQO de  
 0.350 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / Kg DQO convertido en condiciones normales.

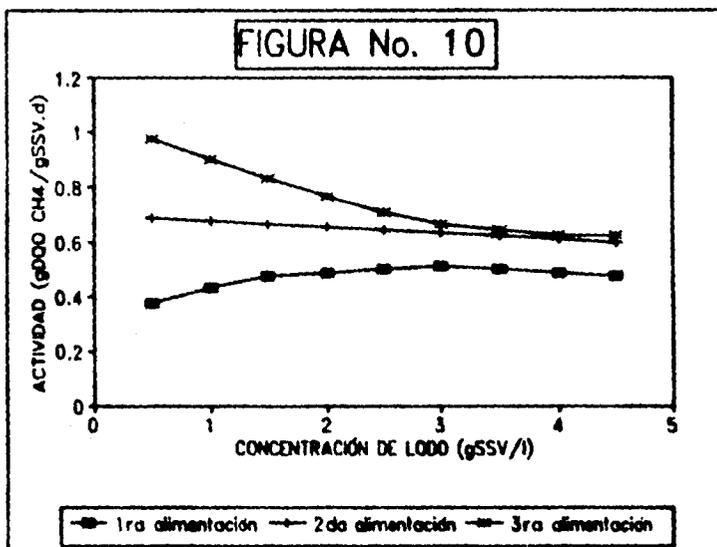
REFERENCIA. OMER, F. M. ET. AL. (20)

**FIGURA No. 6**



Producción acumulada de metano durante un ensayo de biodegradabilidad anaerobia de un agua residual de la industria conservera de productos marinos. El ensayo se realizo a diferentes concentraciones de agua residual (40.8% y 81.4%).

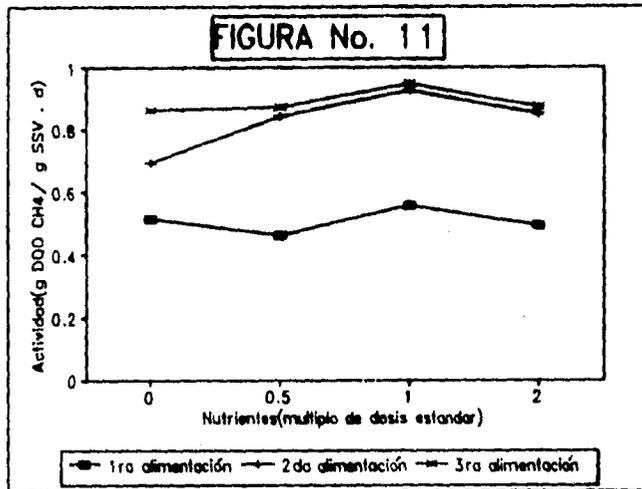
Fuente: Soto M., Mendez R. y J. M. Lema. (23)



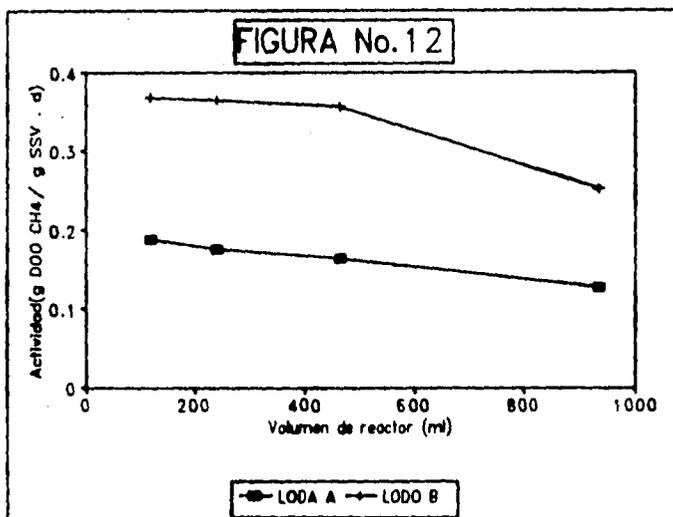
Influencia de la concentración de lodo en los ensayos sobre el valor de actividad metanogénica utilizando digestores de 100 ml.

El sustrato utilizado fue ácido acético (2.0 g/l), no se anaden nutrientes.

Fuente: Soto M., Mendez R. y J. M. Lema. (23)



Actividad metanogénica de un lodo anaerobio a diferentes concentraciones de nutrientes. Como sustratos se utilizó ácido acético (2.0 g/l) y la concentración de lodo fue de 1.6 g SS. Fuente: Soto M., Méndez R. y J. M. Lema. (22)



Influencia del volumen del reactor sobre el valor de la actividad metanogénica máxima determinada en un sistema estático. Como sustrato se utilizó una mezcla de AGV (HAC: 2.0 g/l, HPr: 0.5 y HnBu: 0.5), y la concentración de lodo fue de 2.0 g SSV/l (LODO A) y 4.0 g SSV (LODO B). Las mediciones se realizaron en la primera alimentación. Fuente: Soto M., Méndez R. y J. M. Lema. (23)

DISEÑO DEL EXPERIMENTO																																																																						
T1	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>BLANCO (B)</td> <td colspan="3"> </td> </tr> <tr> <td>PRETRATAMIENTOS</td> <td>P1</td> <td>P2</td> <td>P3</td> </tr> <tr> <td>ESTIMULANTES DE CONTACTO</td> <td>E1</td> <td>E2</td> <td>E3</td> </tr> </table>				BLANCO (B)				PRETRATAMIENTOS	P1	P2	P3	ESTIMULANTES DE CONTACTO	E1	E2	E3	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="8">T1: TEMPERATURA AMBIENTE</th> </tr> <tr> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td> </tr> <tr> <td colspan="2">P1</td> <td colspan="2">P2</td> <td colspan="2">E1</td> <td colspan="2">E2</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">B1</td><td colspan="2">B2</td> <td colspan="2">B3</td><td colspan="2">B4</td> <td colspan="2">B5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">P1E1</td> <td colspan="2">P1E2</td> <td colspan="2">P2E1</td> <td colspan="2">P2E2</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>						T1: TEMPERATURA AMBIENTE								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P1		P2		E1		E2				B1		B2		B3		B4		B5		P1E1		P1E2		P2E1		P2E2			
	BLANCO (B)																																																																					
PRETRATAMIENTOS	P1	P2	P3																																																																			
ESTIMULANTES DE CONTACTO	E1	E2	E3																																																																			
T1: TEMPERATURA AMBIENTE																																																																						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10																																																													
P1		P2		E1		E2																																																																
B1		B2		B3		B4		B5																																																														
P1E1		P1E2		P2E1		P2E2																																																																
<p style="text-align: center;"><b>INDICACIONES</b>          LOS NÚMEROS INDICAN CADA DISPOSITIVO, UN DISPOSITIVO PARA CADA TRATAMIENTO Y SU DUPLICADO.</p>																																																																						
T2	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>BLANCO (B)</td> <td colspan="3"> </td> </tr> <tr> <td>PRETRATAMIENTOS</td> <td>P1</td> <td>P2</td> <td>P3</td> </tr> <tr> <td>ESTIMULANTES DE CONTACTO</td> <td>E1</td> <td>E2</td> <td>E3</td> </tr> </table>				BLANCO (B)				PRETRATAMIENTOS	P1	P2	P3	ESTIMULANTES DE CONTACTO	E1	E2	E3	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="8">T2: 35 °C</th> </tr> <tr> <td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td> </tr> <tr> <td colspan="2">P1</td> <td colspan="2">P2</td> <td colspan="2">E1</td> <td colspan="2">E2</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">B1</td><td colspan="2">B2</td> <td colspan="2">B3</td><td colspan="2">B4</td> <td colspan="2">B5</td> </tr> <tr> <td colspan="2">P1E1</td> <td colspan="2">P1E2</td> <td colspan="2">P2E1</td> <td colspan="2">P2E2</td> <td colspan="2"></td> </tr> </table>						T2: 35 °C								19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	P1		P2		E1		E2				B1		B2		B3		B4		B5		P1E1		P1E2		P2E1		P2E2			
	BLANCO (B)																																																																					
PRETRATAMIENTOS	P1	P2	P3																																																																			
ESTIMULANTES DE CONTACTO	E1	E2	E3																																																																			
T2: 35 °C																																																																						
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28																																																													
P1		P2		E1		E2																																																																
B1		B2		B3		B4		B5																																																														
P1E1		P1E2		P2E1		P2E2																																																																

## MATERIALES Y MÉTODO

### EQUIPO PARA EL ANÁLISIS

- Balanza analítica,
- Estufa,
- Espectrofotómetro,
- Frascos para DBO,
- Medidor de oxígeno,
- Mufla,
- Tubos para DQO,
- Potenciómetro,
- y material básico de laboratorio.

### REACTIVOS

- ácido clorhídrico,
- ácido sulfúrico,
- bicarbonato de sodio,
- biftalato de potasio,
- cloruro de calcio,

- dicromato de potasio,
- solución reguladora , pH = 7,
- solución de cloruro férrico,
- solución de sulfato de magnesio.

## **MÉTODOS**

Los métodos utilizados para el análisis de las muestras son los normalizados (Métodos Normalizados. Para análisis de aguas potables y residuales APHA,AWWA, WPCF.<sup>(1)</sup> ).

Los análisis para la caracterización del lodo fueron:

- Alcalinidad,
- DBO,
- DQO,
- pH,
- sólidos suspendidos totales,
- sólidos suspendidos volátiles,
- y medición de gas metano.

## **Digestores**

Se utilizaron como digestores, frascos de vidrio con capacidad de 250 ml, con un diámetro de boquilla de 28 mm, y sellados.

**Medio**

Las concentraciones de las soluciones para preparar el medio químico definido, y el procedimiento para su preparación se muestran en el anexo 5 <sup>(22)</sup>.

**Inóculo**

La preparación del inóculo se realizó con lodo tomado de un reactor anaerobio con un régimen de operación por lotes, y con un tiempo de retención de 14 días<sup>(14)</sup>.

Se agregó el inóculo a un matraz de dos litros, y se aforó con medio químico definido. Se incubó a 35 °C, 24 horas antes de utilizarse.

**Preparación del digestor**

1. Las muestras de lodo pretratado se adiciona al frasco (digestor). Un volumen de 100 ml para los pretratamientos y volúmenes iguales (50 ml) para sus combinaciones.

2. Agregar 80 ml de medio.

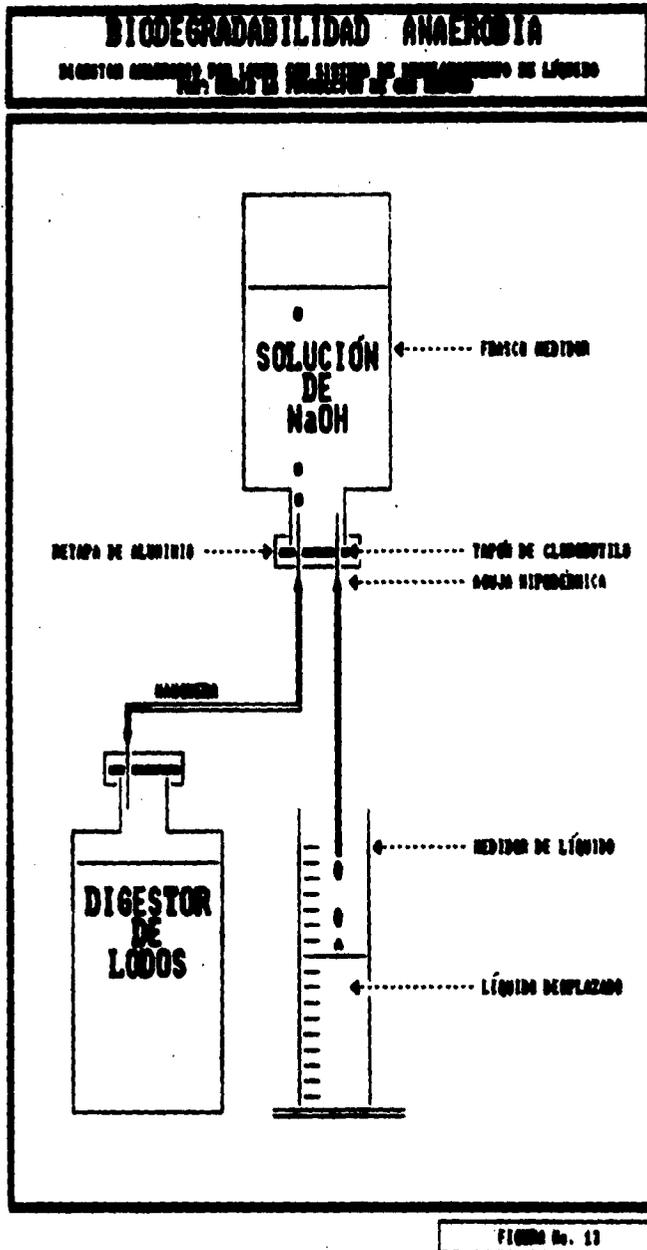
3. Adicionar 30 ml de inóculo, obteniendo un volumen total de 210 ml.

4. Tapar y sellar el digestor.

**Frasco medidor**

Se usaron frasco de vidrio con una capacidad de 545 ml, llenos con una solución de NaOH al 25% en peso.

El esquema de la unidad se presenta en la figura número 13.



# **R E S U L T A D O S**

### CONDICIONES INICIALES

TIEMPO = 0 DIAS TEMPERATURA = 25 °C

MUESTRA	DBO5 (mg/l)	DBO (mg/l)	ODT (mg/l)	ODU (mg/l)	% ODU	pH	ALCALINIDAD (mg/l)
BLANCO	1702	23006	10723	13631	06	6.9	505
P1 *	1323	26276	10726	12740	68	7.0	330
P2 *	756	24079	13040	9820	71	7.1	171
E1 *	639	13044	14006	9005	63	6.8	232
E2 *	873	14172	9899	7295	76	6.7	253
P1E1 *	906	26300	10560	9405	89	6.8	600
P1E2 *	1750	18340	11940	9791	82	6.8	310
P2E1 *	063	19461	14951	13160	81	6.9	126
P2E2 *	873	18945	16000	11739	72	6.5	221

(\*) VER ANEXO 1

TABLA No. 1

## CONDICIONES FINALES

TIEMPO = 30 DÍAS

MUESTRA	TEMPERATURA (°C)	DOO <sub>5</sub> (mg/l)	DO <sub>1</sub> (mg/l)	ST (mg/l)	SSV (mg/l)	SSU	pH	ALCALINIDAD (mg/l)
BLANCO	20	255	10116	6497	5060	78	7.1	660
	25	153	8306	5001	3702	75	7.2	708
P1	20	943	12410	6994	4846	65	9.7	4081
	25	790	12101	7244	4320	60	10.6	4939
P2	20	867	10750	5301	3685	60	7.4	695
	25	803	11222	4068	3190	65	7.4	1265
E1	20	∞	3205	5436	2099	37	7.3	2407
	25	637	1987	4006	2296	57	10.3	2631
E2	20	561	3777	3391	2340	69	10.3	2506
	25	841	3040	3072	2025	66	12.0	3207
PIE1	20	∞	10021	3170	2695	85	7.1	974
	25	1020	10046	3245	2756	82	9.5	2607
P112	20	943	10204	5341	4113	77	9.5	1770
	25	867	10750	4856	3406	72	10.3	2137
P3E1	20	918	10021	6379	5476	87	6.7	596
	25	561	12101	5071	4927	84	9.0	1609
P2E2	20	1020	9335	5467	3003	71	6.0	910
	25	612	10004	6126	4914	80	0.1	1000

(∞) VER ANEXO 1

TABLA No. 2

(∞) LOS FRASCOS PARA LA MEDICIÓN DE LA DOO<sub>5</sub>, CONTENÍAN BUBUJAS DE AIRE.  
POR LO TANTO, NO SE CONSIDERARON LOS VALORES PARA ESTA PRUEBA.

PRODUCCIÓN ACUMULATIVA DE GAS MEDIO (ml)							
MUESTRA	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO DE INCUBACIÓN ( DÍAS )					
		5	10	15	20	25	30
BLANCO	20	5.7	14.3	20.9	26.2	45.9	52.5
	35	19.2	46.1	84.9	99.4	67.8	69.5
P1 *	20	0.7	1.3	6.7	7.4	10.2	12.9
	35	9.0	43.0	56.9	57.6	77.0	78.3
P2 *	20	4.4	3.0	19.2	26.7	36.3	45.3
	35	13.7	26.7	38.3	59.2	65.4	97.4
E1 *	20	0.4	17.6	20.2	34.1	52.0	60.5
	35	15.3	37.6	46.4	48.0	42.9	42.9
E2 *	20	10.0	17.0	23.7	29.2	40.5	46.0
	35	10.9	40.3	45.0	46.0	45.5	47.0
PIE1 *	20	1.4	2.7	7.0	8.0	13.4	18.4
	35	17.0	35.0	40.0	46.3	50.0	63.5
PIE2 *	20	2.4	3.7	6.0	12.3	20.3	27.7
	35	7.0	26.9	44.7	50.9	51.0	52.5
PDE1 *	20	3.5	7.3	12.6	17.0	26.7	34.7
	35	16.9	36.0	57.2	65.3	66.2	97.4
PDE2 *	20	3.1	6.4	16.7	22.2	33.4	45.3
	35	0.2	26.3	30.6	30.9	43.6	44.0

(\*) VER ANEXO 1

TABLA No. 3

RELACIONES					
MUESTRA	$\frac{DDO_1}{DDO} = 100$	$\frac{SSU}{SST} = 100$	TEMPERATURA ( C )	$\frac{DDO_2}{DDO} = 100$	$\frac{SSU}{SST} = 100$
	CONDICIONES INICIALES			CONDICIONES FINALES	
BLANCO	6.6	86	20	1.0	78.0
			35	1.0	75.2
P1 *	5.0	68	20	7.6	65.0
			35	6.5	59.9
P2 *	3.1	71	20	0.1	68.0
			35	7.1	65.8
E1 *	5.2	63	20	∞	57.0
			35	42.3	57.3
E2 *	6.2	76	20	9.7	69.0
			35	15.2	66.2
P1E1 *	3.7	89	20	∞	85.0
			35	18.2	81.0
P1E2 *	9.4	82	20	9.2	77.0
			35	8.1	71.0
P2E1 *	4.4	81	20	8.7	87.8
			35	4.6	84.1
P2E2 *	4.6	73	20	10.9	71.0
			35	6.0	80.2

(\*) VER ANEXO 1

TABLA No. 4

(∞) LOS FRASCOS PARA LA MEDICIÓN DE LA DDO<sub>1</sub>, CONTENÍAN BURBUJAS DE AIRE, POR LO TANTO, NO SE CONSIDERARON LOS VALORES DE LA PRUEBA.

**BIODIAGNOSTICO PARA MONITOREAR EL POTENCIAL BIOQUIMICO DE RESIDUO  
BIODIGESTIBILIDAD AGREGADA DE LOS TRAZADORES**

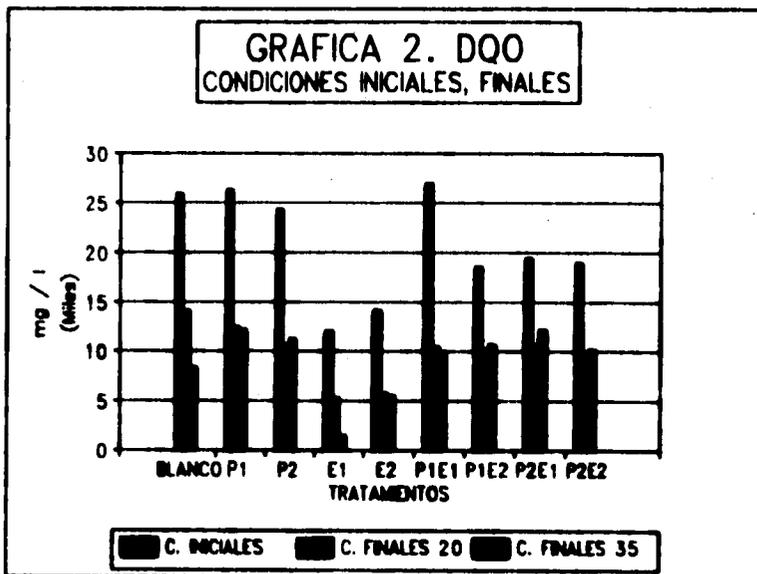
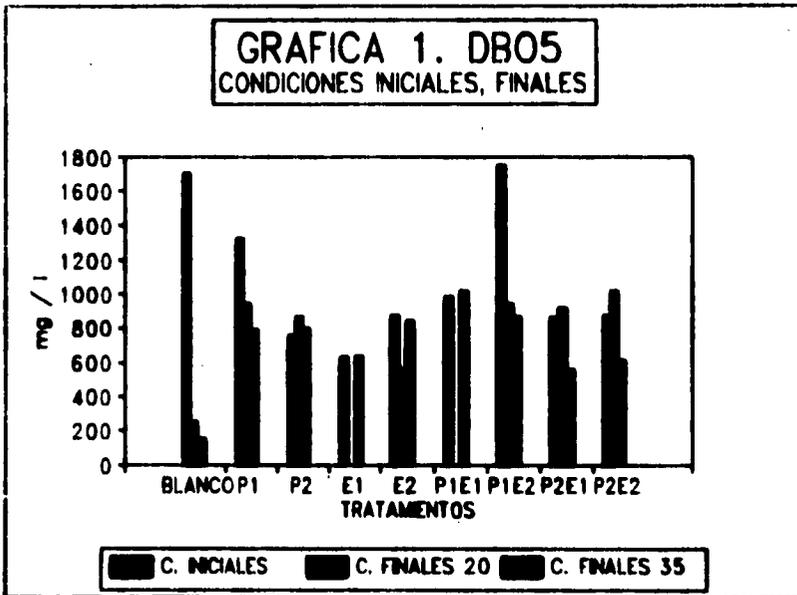
MUESTRA	TEMPERATURA (°C)	PBN experimental <sup>(*)</sup>	$\frac{\text{PBN experimental}}{\text{PBN teorico (***)}} \cdot 100$
		$\frac{\text{m}^3 \text{ CH}_4}{\text{Kg DQO}}$	
BLANCO	20	0.015	4.4
	35	0.013	3.7
P1 *	20	0.003	0.9
	35	0.010	5.2
P2 *	20	0.011	3.2
	35	0.024	6.9
E1 *	20	0.031	9.0
	35	0.013	3.8
E2 *	20	0.020	5.6
	35	0.010	5.1
PIE1 *	20	0.004	1.1
	35	0.012	3.5
PIE2 *	20	0.011	3.3
	35	0.022	6.3
PBE1 *	20	0.013	3.8
	35	0.043	12.4
PBE2 *	20	0.016	4.6
	35	0.017	4.9

**TABLA No. 5**

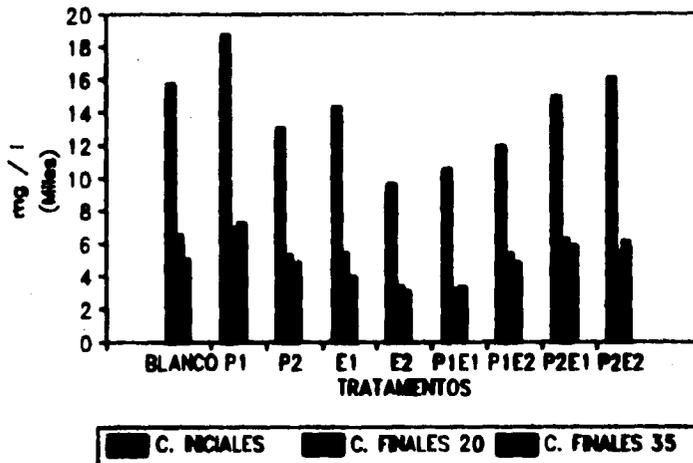
(\*) VER ANEXO 1

(\*\*) VER ANEXO 3

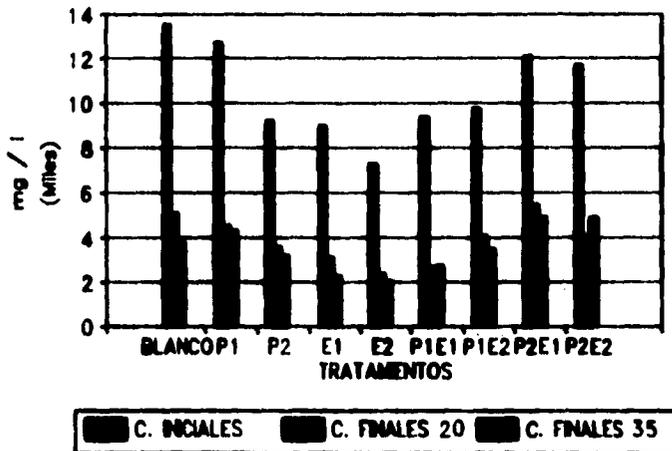
(\*\*\*) VALOR TEORICO DE 0.350 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> / Kg de DQO



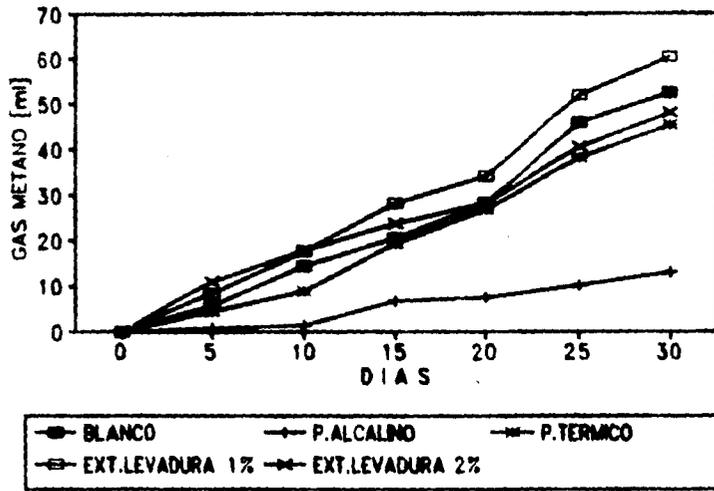
**GRAFICA 3. SST**  
CONDICIONES INICIALES, FINALES



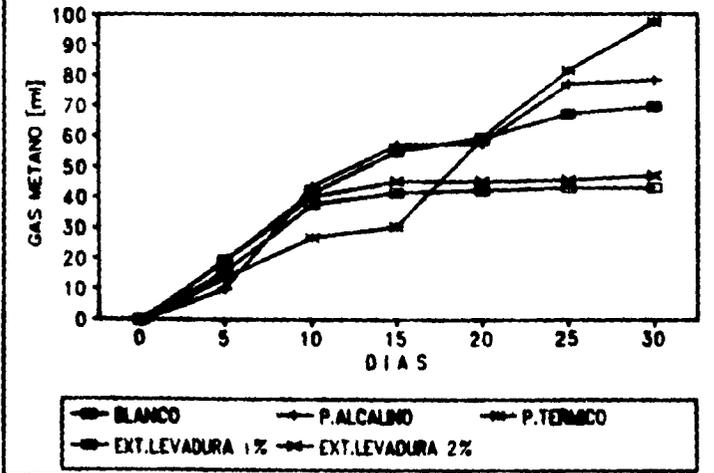
**GRAFICA 4. SSV**  
CONDICIONES INICIALES, FINALES



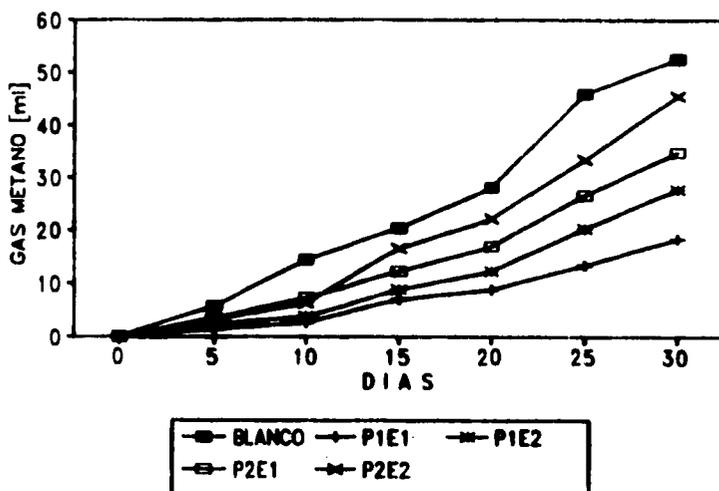
GRAFICA 5. GAS METANO  
TRATAMENTOS a 20 C



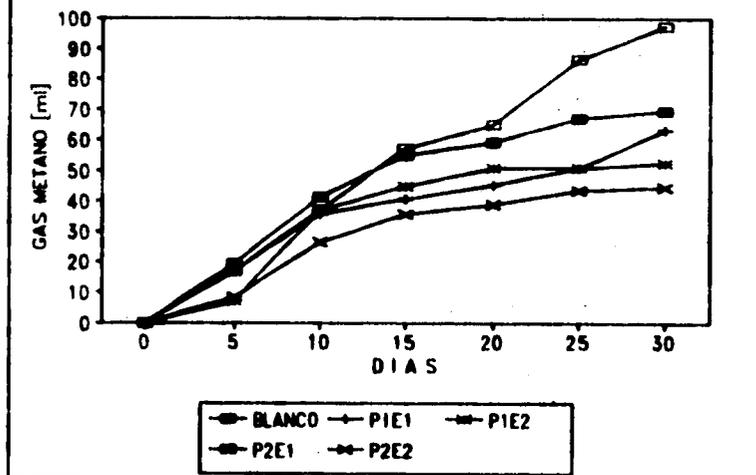
GRAFICA 6. GAS METANO  
TRATAMENTOS a 35 C



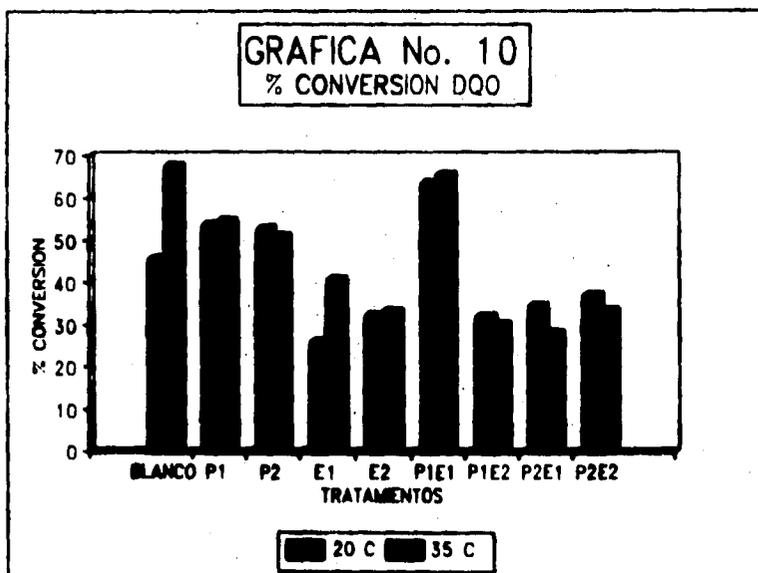
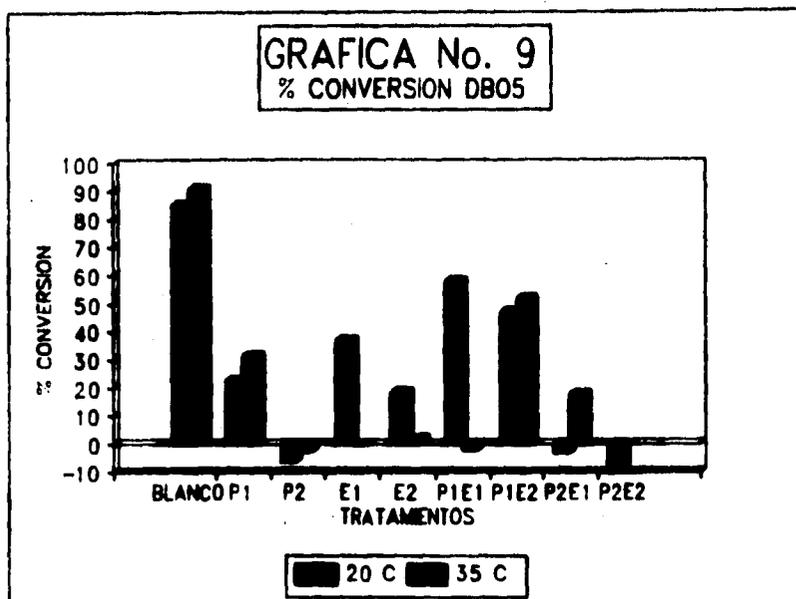
GRAFICA 7. GAS METANO  
combinaciones a 20 C



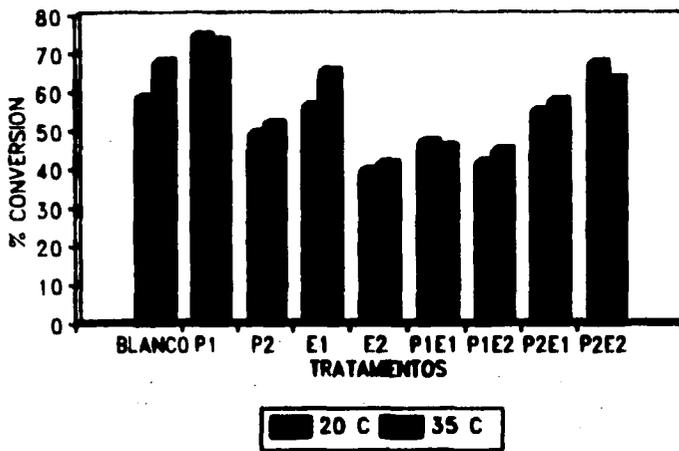
GRAFICA 8. GAS METANO  
combinaciones a 35 C



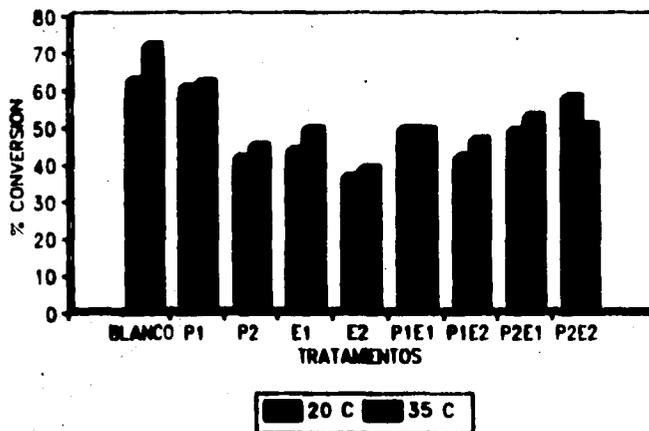
ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

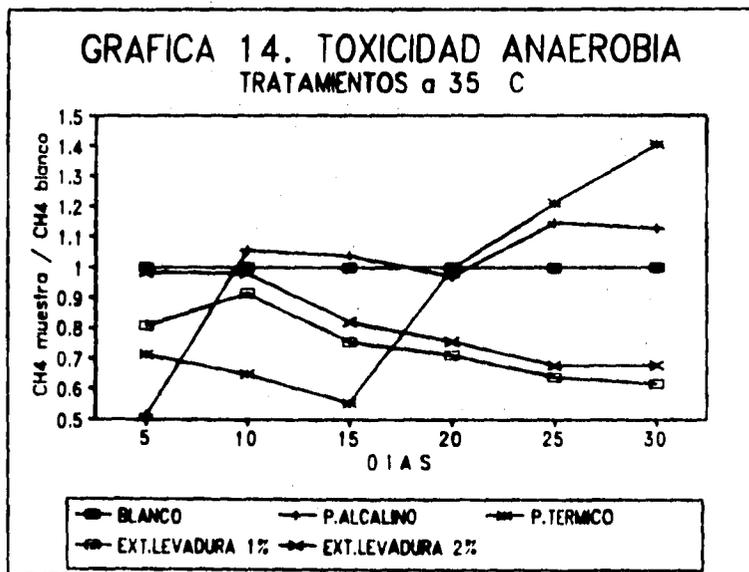
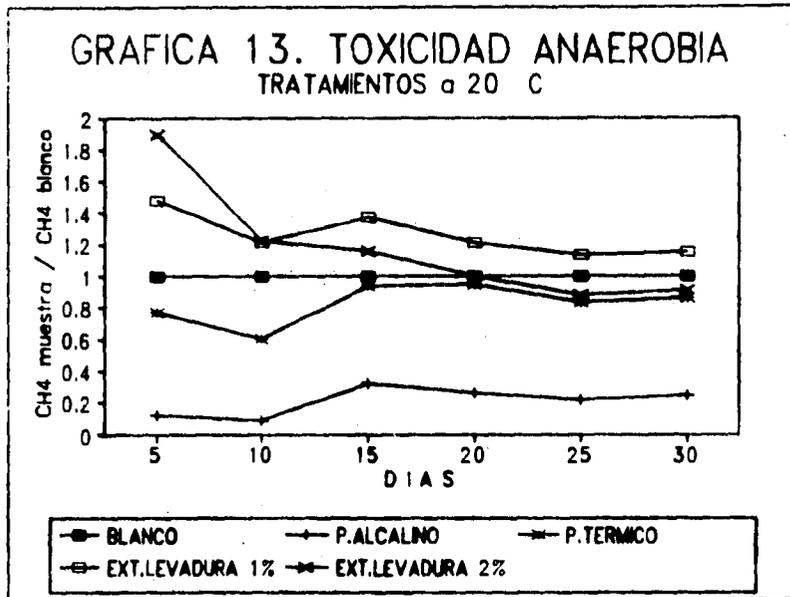


**GRAFICA No. 11**  
**% CONVERSION SST**

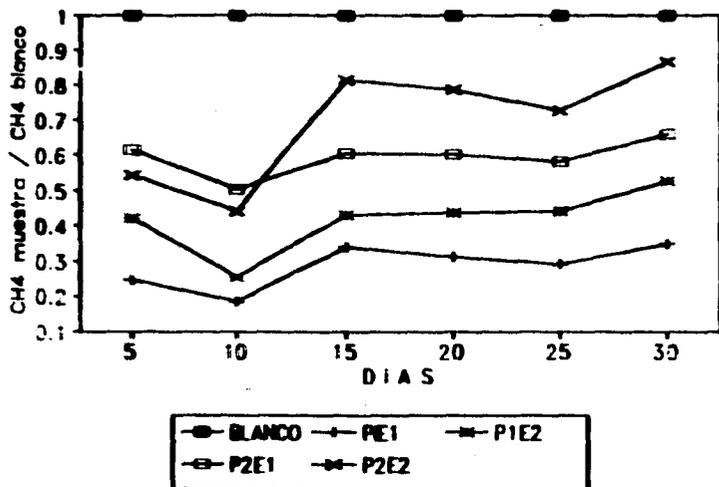


**GRAFICA No. 12**  
**% CONVERSION SSV**

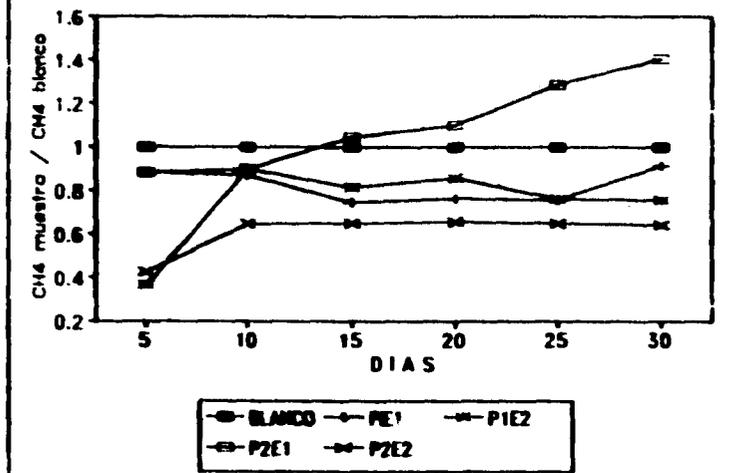




**GRAFICA 15. TOXICIDAD ANAEROBIA  
COMBINACIONES A 20 C**



**GRAFICA 16. TOXICIDAD ANAEROBIA  
COMBINACIONES A 35 C**



## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de pH para los tratamientos:

- P1 ( a 20 y 35 ° C )
- E1 ( a 35 ° C )
- E2 ( a 20 y 35 ° C )
- P1E1 ( a 35 ° C )
- P1E2 ( a 20 y 35 ° C )
- y P2E1 ( a 35 ° C ),

excedieron del intervalo (6.5 - 8.0) donde se efectúa la digestión anaerobia.

El aumento de pH en los digestores se debió al sifón de la solución de sosa del frasco lavador al digestor.

Puesto que se observó un aumento en el volumen de éstos digestores, y un incremento en el pH.

Los valores del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) obtenidos de los tratamientos y sus combinaciones fueron bajos con respecto al valor teórico . Por consiguiente, la eficiencia en la conversión de la materia orgánica expresada como DQO en gas metano fue menor del 12.5 % para todos los tratamientos.

A la temperatura de 20 ° C los tratamientos más eficientes con respecto al blanco fueron:

- E1 (PBM=0.031 , blanco=0.015).
- E2 (PBM=0.020 , blanco=0.015).
- P2E2 (PBM=0.016 , blanco=0.015).

Y a 35 ° C los tratamientos más eficientes con respecto al blanco fueron:

- P1 (PBM=0.019 , blanco=0.014).
- P2 (PBM=0.025 , blanco=0.014).
- E2 (PBM=0.019 , blanco=0.014).
- P1E2 (PBM=0.023 , blanco=0.014).
- P2E1 (PBM=0.046 , blanco=0.014).
- P2E2 (PBM=0.018 , blanco=0.014).

Comparando nuestros resultados de eficiencia del PBM con respecto a los obtenidos por Owen<sup>22</sup> para los pretratamientos alcalino y térmico fueron:

1. Pretratamiento alcalino a una temperatura de incubación de 35 ° C:

Owen obtuvo una eficiencia del 2% y nosotros del 0.9% .

2. Pretratamiento térmico a una temperatura de incubación de 35 ° C:

Owen informa una eficiencia del 10% con un calentamiento de 100 ° C, nosotros logramos una eficiencia del 7.6% con un calentamiento de 120 ° C. En ambos pretratamientos nuestros resultados fueron inferiores a los informados por Owen.

## **TOXICIDAD ANAEROBIA**

Con fundamento en el criterio de la razón máxima de velocidad (MRR), la cual señala que:

1. Un MRR menor a 0.95 indica posible inhibición.
2. Y un MRR menor a 0.90 indica una inhibición importante.

**Tratamientos a 20 ° C :**

1. Con la adición de extracto de levadura al 2% no se observó toxicidad anaerobia.
2. Con el pretratamiento alcalino la digestión anaerobia fue inhibida completamente.
3. En los tratamientos térmicos y adición de extracto de levadura al 1% hubo posible toxicidad.

**Tratamientos a 35 ° C :**

1. El pretratamiento alcalino en un principio presentó toxicidad, después del quinto día la toxicidad desapareció.
2. El pretratamiento térmico presentó toxicidad hasta el vigésimo día.
3. Con la adición de extracto de levadura, la toxicidad fue importante durante

todo el ensayo, hubo inhibición.

**Combinaciones a 20 ° C :**

**Todas las combinaciones presentaron importante toxicidad durante el ensayo.**

**Combinaciones a 35 ° C :**

**1. La combinación P2E1 después de quince días no presentó toxicidad, en los días anteriores posiblemente se dio.**

**2. Las combinaciones P1E1, P1E2 y P2E2 presentaron toxicidad importante.**

**Una de las limitaciones importantes del ensayo fue la ausencia de agitación en los digestores.**

## CONCLUSIONES

- En la mayoría de los ensayos no hubo un incremento en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

- La mayor eficiencia en la conversión se logró con la combinación del tratamiento térmico con la adición de extracto de levadura al 1% , la eficiencia fue del 10.4% a una temperatura de incubación de 35 ° C.

- Los ensayos menos efectivos fueron a la temperatura de incubación de 20 ° C, el pretratamiento alcalino (P1) tuvo una eficiencia del 0.8% , y la adición de extracto de levadura al 1% tuvo una eficiencia del 1%.

- La conversión de la materia orgánica expresada como DQO en metano aumento al incrementarse la temperatura de 20 a 35 ° C.

Excepto para la adición de extracto de levadura.

- En la mayoría de los ensayos hubo una toxicidad anaerobia importante, lo que implica una inhibición en el proceso de la digestión anaerobia.

- Las técnicas de bioensayo anaerobio **PMB y ATA** son una herramienta importante para evaluar si el proceso de la digestión anaerobia puede ser aplicado para estabilizar aguas residuales y lodos específicos.

- La tecnología desarrollada para la aplicación del proceso de la digestión anaerobia esta ampliamente desarrollado en otros países, sin embargo, a nivel nacional es muy poco aplicada.

- El proceso convencional podría aplicarse en industrias medianas y pequeñas, con la finalidad de cumplir con las normas establecidas (**CRETIB**) para la disposición de lodos, así como para satisfacer las **Condiciones Permisibles de Descarga y Límites Máximos Permisibles de Descarga** de efluentes industriales.

- Las características de las aguas residuales y los lodos generados determinarán si es aplicable o no el proceso de la digestión anaerobia para éstos desechos.

## RECOMENDACIONES

- **Agitación en los digestores.**
- **Medición diaria de:**
  - a. **dióxido de carbono,**
  - b. **y metano.**
- **Trabajar con digestores de mayor volumen, con la finalidad de sustraer muestra para el análisis diario.**

## BIBLIOGRAFÍA

1. APHA, AWWA, WPCF. *Métodos Normalizados. Para análisis de aguas potables y residuales*. Ediciones Díaz de Santos, S.A. España, Madrid . (1992).
2. Casey, P. James. *Pulpa y Papel*. Química y Tecnología Química. vol. 1. Editorial Limusa. México D.F. (1984).
3. Commission of the European Communities. *Anaerobic Digestion: Results of Research and Demonstration Projects*. Elsevier Applied Science Publishers LTD. Great Britain. (1987).
4. Degremont. *Manual Técnico del Agua*. Cuarta edición. Editorial :Grafos S.A.. Bilbao:España. (1979).
5. Donald, L. Wise. *Bioenvironmental Systems* vol. I-IV . CRC Press, Inc. Florida, USA. (1987).
6. Gamrasni, A.M. *Aprovechamiento agrícola de aguas urbanas*. Editorial Limusa. México, D.F. (1985).
7. Gurnham, C. Fred. *Principles of Industrial Waste Treatment*. John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. (1957).
8. Haug, T. Roger. *Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludge*. Journal WPCF pp.73-85. January (1978).
9. Haug, T. Roger. *Sludge processing to optimize to digestibility and energy production*. Journal Water Poll. Control Fed. 49 pp.1713-1721. (1977).
10. Hernandez, Muñoz Aurelio. *Depuración de aguas residuales*. Colección Señor No. 9. Paraninfo. España, Madrid. (1990).
11. Hilleboe, E. Herman. *Manual de tratamientos de aguas negras*. Sexta reimpresión. Editorial Limusa. México, D.F. (1980).

12. "International Course on Anaerobic Wastewater Treatment Waste Characteristics + Factors Affecting Reactor Performance". C. Measurement Parameters. Copias.
13. Malina, F. Joseph Jr. and Miholitis, M. Ernest. *New Developments in the Anaerobic Digestion of Sludges: Advances in Water Quality Improvement*. Edited by: Earnest F. Gloyna and W. Wesley Eckkenfelder Jr. USA, Texas. (1968).
14. Martínez, Lagunes René. Licenciatura en Ingeniería Química. " *Digestión Anaerobia de Lodos Residuales: operación, control y cinética*". Tesis experimental. Facultad de Química, UNAM. México, D.F. (1992).
15. Mendoza, Castillo José Antonio. Licenciatura en Ingeniería Química. " *Determinación de algunos Metales Pesados en efluentes de digestores anaerobios*". Tesis experimental. Facultad de Química, UNAM. México, D.F. (1993).
16. Metcalf-Eddy. *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*. Editorial Labor. Barcelona, España. (1977).
17. Miller, Irwin y Freud, E. John. *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*. Editorial Reverté. México, D.F. (1984).
18. Moeller, Chavez Gabriela E.. *Microbiología y Bioquímica de la Digestión Anaerobia*. Tesis para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Sanitaria. DEPI. UNAM. México, D.F. (1978).
19. Moeller, Chavez Gabriela E. *Utilización de un modelo cinético de crecimiento biológico para la predicción del comportamiento de la biomasa anaeróbica para la estabilización de los lodos de desecho*. VI Congreso Nacional. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. A.C. Querétaro, Qro. (1988).
20. Moeller, Gabriela y Soler F. Proyecto DGAPA. *Tratabilidad Biológica Anaerobia de Lodos en el D.F.*. DEPI, UNAM. (1991).
21. Noyola, Robles Adalberto. Módulo: *Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales*. Primer Diplomado Internacional de Química Ambiental del Agua. Facultad de Química. México, D.F. (1991).
22. Owen, F. W. et. all. *Biossay for monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity*. Water Research vol. 13 pp.485-492. (1974).

23. Perry L. Mc Carty. *Anaerobic Treatment of Soluble Wastes*. Stanford University, Stanford California. pp.337 . *Advances in Water Quality Improvement*. Edited by: Earnest F. Gloyna and W. Wasley Eckkenfelder Jr. USA, Texas. (1968).
24. Pürschel, Wolfgang. *El Tratamiento de las aguas residuales domésticas*. Técnicas de depuración. Tratado General del Agua y su distribución vol.6. URMO S.A. España, Bilbao. (1976).
25. Soto M., Méndez R. y J.M. Lema. *Determinación de Toxicidad y Biodegradabilidad Anaerobia de Aguas Residuales*. Departamento de "Enseñaría" Química. Universidad de Santiago de Compostela. Febrero de 1992.
26. Switzenbaum, M.S. *"Notes of Anaerobic Digestion (Process Control)"*. Módulo: Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales. Primer Diplomado Internacional de Química Ambiental del Agua. Facultad de Química. México, D.F. (1991).
27. Tsoo, T. George. *Pre/Posttreatment*. School of Chemical Engineering, Purdue University. USA, Indiana. Copias.
28. Winkler, A. Michael. *Tratamiento biológico de aguas de desecho*. Editorial Limusa. México, D.F. (1986)

**TESIS SIN PAGINACION**

**COMPLETA LA INFORMACION**

# **A N E X O S**

**TRATAMIENTOS**

Los pretratamientos que se aplicaron fueron:

• **Pretratamiento alcalino (P1)**

Calentamiento de la muestra a 120 ° C durante una hora; cinco horas de contacto con NaOH (400 meq/l) y neutralizada con HCl.

• **Pretratamiento térmico (P2)**

Calentamiento de la muestra a 120 ° C durante una hora.

• **Adición de estimulantes de crecimiento**

1. Adición de extracto de levadura a una concentración de 0.1% V/V (E1).

2. Adición de extracto de levadura a una concentración de 0.2% V/V (E2).

Además, de las combinaciones :

- P1E1,

- P1E2,

- P2E1,

- y P2E2.

Los pretratamientos se estudiaron a dos temperaturas: 20 ° C y 35 ° C. La caracterización de las muestras se efectuaron al inicio y final del experimento, el cual tuvo una duración de 30 días.

La producción de gas se midió diariamente.

## OBTENCIÓN DEL VALOR TEÓRICO DEL PBM

Eficiencia basada en el valor teórico del PBM de:

0.350 (m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> / Kg DQO) convertido en condiciones normales de temperatura y presión.

La cantidad de metano producido por la estabilización del lodo se estima aproximadamente del equivalente estequiométrico de oxígeno y metano.



16 g      64 g

Cada 16 gramos de metano producido, corresponde a la remoción de 64 gramos de oxígeno de la corriente de lodo.

Convirtiendo la masa de gas metano producido en condiciones normales de presión y temperatura a volumen:

$$V_{\text{CH}_4} = nRT/P = (1 \text{ g mol}_{\text{CH}_4})(273 \text{ }^\circ\text{K})(82.05 \text{ atm cm}^3/\text{g mol}_{\text{CH}_4} \text{ }^\circ\text{K})/1 \text{ atm}$$

$$V_{\text{CH}_4} = 22 \text{ 399 cm}^3 (1 \text{ m}^3 / 10^6 \text{ cm}^3) = 22.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_{\text{CH}_4} / m \text{ O}_2 = 22.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 / 64 \cdot 10^{-3} \text{ Kg O}_2 = 0.350 \text{ m}^3_{\text{CH}_4} / \text{Kg O}_2$$

Por tanto, 0.350 m<sup>3</sup> de metano producido en condiciones normales de presión y temperatura corresponde la estabilización de un kilogramo de DBO<sub>L</sub> o DQO última.

### anexo 3

ALGORITMO DE CÁLCULO PARA EL PUNTO INICIAL	
Para el blanco a la temperatura de 20 °C.	
DQO <sub>INICIAL</sub>	= 25006 mg/l (LEÍDO DE LA TABLA DE CONDICIONES INICIALES)
DQO <sub>FINAL</sub>	= 14116 mg/l (LEÍDO DE LA TABLA DE CONDICIONES FINALES)
DQO <sub>CONVERTIDO</sub>	= DQO <sub>FINAL</sub> - DQO <sub>INICIAL</sub>
DQO <sub>CONVERTIDO</sub>	= 25006 mg/l - 14116 mg/l = 11770 mg/l
-----	
mg de DQO convertido	= 11770 mg/l * 0.210 l = 2471.7 mg
EL VALOR DE 0.210 EL VOLUMEN A QUE FUERON LLENADO LOS BURETOS CON LA MEZCLA DE LODO, INÓCULO Y MEDIO DEFINIDO.	
-----	
acumulación de gas metano producido = 32.5 ml LEÍDO DE LA TABLA DE ACUMULACIÓN DE METANO.	
-----	
DE LA DEFINICIÓN DEL PUNTO:	
	$PUNTO = \frac{\text{ml}^3 \text{ de } CH_4}{\text{Kg de DQO convertido}}$
	$PUNTO = \frac{32.5 \text{ ml de } CH_4}{2471.7 \text{ mg}} = \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} = \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} = \frac{1 \text{ l}}{1000 \text{ ml}} = \frac{1 \text{ ml}^3}{1000 \text{ l}}$
	$PUNTO = 0.011 \frac{\text{ml}^3 \text{ de } CH_4}{\text{Kg de DQO convertido}}$

## a n e x o 3

CORRECCION DEL VOLUMEN POR PRESION Y TEMPERATURA
<p>De la ecuación del gas ideal:</p> $PV = nRT$ $\frac{PV}{nT} = R$ <p>En condiciones de operación:</p> $\frac{Pop \cdot Vop}{n \cdot Top} = R \dots (1)$ <p>En condiciones normales:</p> $\frac{Pnor \cdot Vnor}{n \cdot Tnor} = R \dots (2)$ <p>Iguando (2) y (1):</p> $\frac{Pnor \cdot Vnor}{n \cdot Tnor} = \frac{Pop \cdot Vop}{n \cdot Top}$ $Vnor = Vop \cdot \frac{Pop}{Pnor} \cdot \frac{Tnor}{Top}$ <p>Corrigiendo el volumen por P y T, para obtener el PNB en condiciones normales.</p> $PNB = 0.021 \frac{\text{m}^3 \text{ de CH}_4}{\text{Kg de DQO convertido}} \cdot \frac{505 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg}} \cdot \frac{273 \text{ }^\circ\text{K}}{(20 \text{ }^\circ\text{C} + 273) \text{ }^\circ\text{K}}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; width: fit-content;"> <math display="block">PNB = 0.015 \frac{\text{m}^3 \text{ de CH}_4}{\text{Kg de DQO convertido}}</math> </div>

## **ANEXO 4**

A6

### **RELACIÓN DBO/DQO**

La prueba DBO  $_{5/20}$  da una indicación de la cantidad de nutrientes fácilmente degradables presentes en una muestra.

El valor DQO da una idea del contenido orgánico total de un residuo, sea o no biodegradable. Por consiguiente, la relación DBO/DQO constituye una guía para conocer la proporción de materias orgánicas presentes y que son biodegradables.

Sin embargo, se debe tener cuidado, porque ciertas sustancias como la celulosa son biodegradables, pero, sólo anaerobicamente y no contribuyen a la determinación aeróbica de la DBO.

### **RELACIÓN SSV/SST**

La concentración de los lodos se puede expresar de diversas maneras. Se puede expresar sin refinamiento como una concentración de sólidos en suspensión, pero, algunos de los sólidos en suspensión son inorgánicos. Por lo tanto, un parámetro mas conveniente es el contenido del material combustible presente, conocido como sólidos suspendidos volátiles (SSV).

La relación SST/SSV indica el porcentaje de materia orgánica presente, no obstante, no establece distinción entre el material bioquímicamente activo y el inerte contenido en los lodos.

# ANEXO 5

A7

MEDIO QUÍMICO DEFINIDO Concentración de las soluciones		
SOLUCIÓN	COMPUESTO	CONCENTRACION (g/l)
21	Lodo	
22	Resorcinol	1
23	$(NH_4)_2HPO_4$	26.7
24	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	16.7
	$MgCl_2$	26.6
	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	120
	HCl	26.7
	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	1.33
	$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	2
	$H_2SO_4$	0.30
	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$	0.17
	$ZnCl_2$	0.14
	25	$FeCl_3 \cdot 4H_2O$
26	$Na_2S \cdot 9H_2O$	500
27	ácido fólico	0.005
	clorhidrato de piridoxina	0.005
	riboflavina	0.005
	tiarina	0.005
	ácido pantoténico	0.005
	vitamina B <sub>12</sub>	0.005
	ácido p-aminobenzoico	0.005

**Preparación del medio químico definido**

- Utilizando un rotax volumétrico de dos litros, adicionar un litro de agua desionizada.
- Agregar lo siguiente:  
 a. 1.4 ml de 11  
 b. 1.4 ml de 11  
 c. 27 ml de 11.
- Agregar agua desionizada hasta un volumen de 1.0 l.
- Calentar durante 15 minutos.
- Enfriar hasta la temperatura ambiente.
- Agregar:  
 a. 1.0 ml de 11  
 b. 1.0 ml de 11  
 c. 1.0 ml de 11.

## **A N E X O    6**

### **Porcentaje de conversión**

La conversión es la fracción de la alimentación o de algún material en la alimentación que se transforma a productos.

Con base en el concepto de conversión definamos su ecuación:

$X = [ C_i - C_f ] / C_b$  ; donde:

X: por ciento de remoción

C<sub>i</sub>: concentración inicial

C<sub>f</sub>: concentración final

C<sub>b</sub>: concentración del blanco.

El término [ C<sub>i</sub>-C<sub>f</sub> ] es la cantidad de materia transformada a productos durante el proceso, y el término C<sub>b</sub> es la cantidad de material que sirve como patrón de comparación.

# ANEXO 7

A9

## COSTOS ESTIMADOS PARA UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE 1000 l/s PARA AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

TRATAMIENTO	Proceso	Costos de Construcción		Operación y Mantenimiento	
		miles de dólares	miles de dólares	miles de dólares	miles de dólares
<b>TRATAMIENTO PRELIMINAR</b>	Pretratamiento	518	42		
	<b>SUMA</b>	<b>518</b>	<b>42</b>		
<b>TRATAMIENTO PRIMARIO</b>	Sedimentación primaria	1 299	27		
	<b>SUMA</b>	<b>1 299</b>	<b>27</b>		
<b>TRATAMIENTO SECUNDARIO CONVENCIONAL</b>	Tanque de aeración	2 618	0		
	Recirculación de lodos	475	94		
	Sopladores	1 000	791		
	Sedimentación secundaria	1 090	40		
	<b>SUMA</b>	<b>5 991</b>	<b>905</b>		
<b>DESINFECCION</b>	Cloración	289	95		
	<b>SUMA</b>	<b>289</b>	<b>95</b>		
<b>TRATAMIENTO TERCARIO</b>	<b>TRATAMIENTO QUIMICO FILTRACION</b>	Floc. mas clarificador	4 437	559	
		Aliment. de Alumbre	205	14	
		Filtración	2 405	83	
		<b>SUMA</b>	<b>7 047</b>	<b>656</b>	
<b>TRATAMIENTO TERCARIO ADSORCCION CARBON ACTIVADO</b>	Torres de adsorción	8 954	306		
	Bombes internos	475	95		
	<b>SUMA</b>	<b>9 429</b>	<b>401</b>		
<b>MANEJO DE LODOS</b>	Esp. de lodos primarios	366	11		
	Esp. de lodos prim + sec	506	15		
	Fil. prensa p/desaguado	3 514	52		
	<b>SUMA</b>	<b>3 986</b>	<b>84</b>		

FUENTE. COMISION NACIONAL DEL AGUA. SISTEMAS ALTERNATIVOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y LODOS PRODUCIDOS. LIBRO II. SEPTIEMBRE DE 1974.

**NOTAS:**

1. No se incluye el costo de utilidad. Los gastos fijos del contratista de la obra son, aproximadamente del 28% a 36% de los costos anteriores.
2. Otros costos no considerados son: estudio de factibilidad, proyecto de ingeniería, supervisión de la construcción, gastos legales y administrativos, costos del terreno, intereses durante la construcción, edificios administrativos y laboratorios, administración del proyecto, etc.

## ANEXO 7

## CENTRO DE COSTOS Y RESULTADOS

	COSTOS		COSTOS		COSTOS	
	131 Ene / mes (Cuentas con Costo (Cuentas))	Especial Asignable (Cuentas)	132 Ene / mes (Cuentas con Costo (Cuentas))	Especial Asignable (Cuentas)	131A Ene / mes (Cuentas con Costo (Cuentas))	Especial Asignable (Cuentas)
<b>EXPENDIENDOS</b>						
Estructuras	--	--	112000	112000	100000	100000
Efectos	--	--	830000	830000	1307000	1307000
<b>ALMOCCAMIENTOS</b>						
Estructuras	27000	--	26100	--	26000	--
Efectos	181500	--	181000	--	227100	--
<b>INVESTIC. AMORTIZA.</b>						
Estructuras	--	784200	--	1347000	--	3380000
Efectos	--	784200	--	1026200	--	2158700
<b>REGENERACION</b>						
Estructuras	112000	112000	150000	150000	330000	330000
Efectos	888400	888400	870000	1118000	1800000	1300000
<b>ESTABLECIMIENTO DEL C.M.</b>						
Estructuras	80000	--	80000	--	80000	--
Efectos	236000	--	205000	--	500000	--
<b>COSTOS DE CAPITAL</b>						
Estructuras	1000000	840000	270000	1610000	870000	4007000
Efectos	1327000	1300000	2140000	2700000	4000000	9327000
Inventos	230000	200000	267000	628100	731100	1615100
Comisiones	351700	641000	251700	882700	1121100	2180000
<b>TOTAL COSTOS DE CAPITAL</b>	3107000	3140000	3517000	4871000	6700000	13010000
<b>COSTOS DE OTRAS</b>	145700	110000	207000	374000	100000	120700

Fuente: Water Pollution Control Federation, Conference on the Status of Municipal Sludge Management for the 1980's, part 1, Economic Comparison of Chemical and Biological Sludge Stabilization Processes, p.p. 5-42.

## **A N E X O 8**

**Los datos de las tablas uno y dos son el resultado del promedio aritmético entre los valores del análisis determinado, cuando se contó con dos resultados.**

**El valor informado de pH de los dos valores obtenidos fue el mas cercano a 7.0 unidades.**

CONDICIONES INICIALES							
Tiempo = 0 días      Temperatura = 20 °C							
MUESTRA	FRASCO número	DBO5 (mg/l) (g)	DBO (mg/l)	SSY (mg/l)	SSV (mg/l)	pH	Alcalinidad (mg/l)
BLANCO	1-2-19-20	1581 1823	24342 27430	15723	13521	6.9	505
P1	3-4-21-22	1514 1136	26976 25576	18734	12740	7.0	238
P2	5-6-23-24	burbuja 756	23868 24890	13040	9258	7.1	171
E1	7-8-25-26	734 524	11154 12934	14306	9005	6.8	232
E2	9-10-27-28	burbuja 875	14913 13431	9599	7295	6.7	253
PIE1	11-12-29-30	923 1049	25576 28400	10568	9405	6.8	603
PIE2	13-14-31-32	1750 burbuja	17416 19680	11940	9791	6.8	310
P2E1	15-16-33-34	burbuja 863	18745 20177	14951	12110	6.9	126
P2E2	17-18-35-36	927 819	19810 18080	16080	11739	6.5	221

(g) Se prepararon cinco digestores para cada tratamiento.  
 Dos para cada tratamiento a 20 °C.  
 Dos para cada tratamiento a 35 °C.  
 Y uno para el análisis inicial.

burbuja: los frascos para la medición de la DBO5 contenían burbujas de aire, por tanto, no se consideraran los valores para esta prueba.

CONDICIONES FINALES							
Tiempo = 30 días      Temperatura = 20 C							
MUESTRA	FRASCO número	DBO5 (mg/l) (h)	DOO (mg/l)	SSY (mg/l)	SSV (mg/l)	pH	Alcalinidad (mg/l)
BLANCO	1	cero	14855	6869	4933	7.1	668
	2	255	13377	6125	5203	6.7	644
P1	3	943	12418	6994	4546	9.7	4381
	4	burbuja					
P2	5	913	11311	5725	4018	7.6	695
	6	821	10205	4877	3182	7.4	713
E1	7	burbuja	5841	5010	3466	7.3	2457
	8	burbuja	4769	5862	2732	7.5	2496
E2	9	burbuja					
	10	561	5777	3391	2340	10.3	2506
PIE1	11	burbuja	10521	3170	2695	7.1	974
	12	burbuja					
PIE2	13	burbuja	10284	5341	4113	9.5	1770
	14	943					
PZE1	15	burbuja	11026	6026	5275	6.7	596
	16	918	10016	6532	5677	7.1	529
PZE2	17	1078	10078	5839	3786	6.8	910
	18	962	8592	5095	3978	7.6	937

(h) cero: el medidor de oxígeno indicó una lectura de cero, por lo tanto, no se considera el valor para esta prueba.

burbuja: los frascos para la medición de la DBO5, contenían burbujas de aire, por consiguiente, no se consideran los valores para esta prueba.

-----: en estos digestores hubo un sifón de solución de sosa.