



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**POTENCIALIDAD DE RESIDUOS MINEROS APLICADOS A LOS
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA (VINAZAS) EN LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

Leslie María Rossi Caballeros

Asesorado por: Dra. Ileana Pereda Reyes

Inga. Aimeé González Suárez

Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, mayo de 2010.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**POTENCIALIDAD DE RESIDUOS MINEROS APLICADOS A LOS
EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA (VINAZAS) EN LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

LESLIE MARÍA ROSSI CABALLEROS

ASESORADO POR: DRA. ILEANA PEREDA REYES

INGA. AIMEÉ GONZÁLEZ SUÁREZ

ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, MAYO DE 2010.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Agr. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Inga. Teresa Lisely De León Arana
EXAMINADOR	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

POTENCIALIDAD DE RESIDUOS MINEROS APLICADOS A LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA (VINAZAS) EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 31 de julio de 2009.



Leslie María Rossi Caballeros



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 23 de abril del 2010

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Por medio de la presente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que he revisado como asesor el informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA de la estudiante universitaria **LESLIE MARÍA ROSSI CABALLEROS**, identificada con carné No. **2005-11676** titulado: **POTENCIALIDAD DE RESIDUOS MINEROS APLICADOS A LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA (VINAZAS) EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**, dejo constancia de aprobación para la autorización del respectivo trabajo.

He encontrado el trabajo satisfactorio por lo que lo remito a su consideración para proseguir con los trámites correspondientes.

Atentamente,


Ing. César Alfonso García Guerra
Asesor

AREA DE QUÍMICA
ESC. INGENIERÍA QUÍMICA
FAC. INGENIERÍA - USAC -



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 22 de abril del 2010
Ref. EI.Q.TG.42.2010

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-042-08-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERA QUÍMICA a la estudiante universitaria **LESLIE MARÍA ROSSI CABALLEROS**, identificada con carné No. **2005-11676** titulado: **POTENCIALIDAD DE RESIDUOS MINEROS APLICADOS A LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA (VINAZAS) EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**, el cual ha sido asesorado por la Dra. Ileana Pereda Reyes, resultado de la selección como **becaria del proyecto de la Universidad de Cádiz "Ingeniería para la cooperación al desarrollo" aprobado en el marco del Programa de Intercambio y Movilidad Académica PIMA que coordina la OEI.**

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, y teniendo a la vista el Acta enviada desde el **Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana, Cuba**, con calificación **excelente** y fecha de lectura doce de marzo del presente año, se procede a recomendarle autorice a la estudiante **Rossi Caballeros** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Inga. **Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.**

COORDINADORA

Tribunal que revisó el informe final
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del (la) estudiante **LESLIE MARÍA ROSSI CABALLEROS** titulado: **"POTENCIALIDAD DE RESIDUOS MINEROS APLICADOS A LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA (VINAZAS) EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne rigor, coherencia y calidad requeridos.

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía; MIQ; MPISC
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, mayo de 2010

Cc: Archivo
WGAM/sa



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **POTENCIALIDAD DE RESIDUOS MINEROS APLICADOS A LOS EFLUENTES DE LA INDUSTRIA AZUCARERA (VINAZAS) EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS**, presentado por la estudiante universitaria **Leslie María Rossi Caballeros**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

A large, handwritten signature in black ink, consisting of a large loop and a horizontal stroke.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, mayo de 2010



/gdech

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, por su ejemplo y su apoyo incondicional e ilimitado.

A mis amigos, por la sinceridad e incondicionalidad que me han brindado.

A las personas que han colaborado en mi formación tanto académica como humana.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutoras, por su valiosa colaboración en la realización de este trabajo de graduación, por la confianza depositada en mí, por su invaluable ayuda, su gran apoyo y conocimientos compartidos.

Al personal del CIPRO, por contribuir grandemente en mi formación y por todos los momentos compartidos.

A todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de mi trabajo de graduación en Cuba.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma ayudaron en la realización de este trabajo de graduación.

2.1.2.3.	Fase acetogénica (acetogénesis).....	11
2.1.2.4.	Fase metanogénica (metanogénesis).....	11
2.1.3.	Microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia	12
2.2.	Factores que controlan el proceso de biodigestión	14
2.2.1.	Factores básicos.....	15
2.2.1.1.	Bacterias.....	15
2.2.1.2.	Sustrato.....	16
2.2.1.3.	Tiempo de retención hidráulica (TRH).....	16
2.2.1.4.	Edad del lodo.....	17
2.2.2.	Factores Ambientales	17
2.2.2.1.	Temperatura.....	18
2.2.2.2.	Potencial de hidrógeno (pH).....	19
2.2.2.3.	Sustancias tóxicas.....	19
2.3.	Proceso de digestión para tratar los residuos orgánicos.....	20
2.3.1.	Reactores de primera generación.....	20
2.3.2.	Reactores de segunda generación	21
2.3.3.	Reactores de tercera generación.....	22
2.3.4.	Forma de operación.....	23
2.3.4.1.	Operación por lotes.....	23
2.3.4.2.	Operación semicontinua.....	24
2.3.4.3.	Operación continua.....	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	27
3.1.	Variables	28
3.2.	Delimitación de campo de estudio	30
3.3.	Recursos humanos disponibles	30
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	30
3.5.	Equipo.....	30
3.6.	Cristalería.....	31

3.7.	Reactivos.....	31
3.8.	Técnicas	31
3.8.1.	Técnica cualitativa.....	35
3.8.2.	Técnica cuantitativa	35
3.8.2.1.	Potencial de hidrógeno.....	35
3.8.2.2.	Carbón orgánico total (COT).....	36
3.8.2.3.	Sólidos.....	37
3.8.2.4.	Demanda química de oxígeno (DQO).....	40
3.9.	Recolección y ordenamiento de la Información.....	41
3.10.	Análisis estadístico	41
3.11.1.1.	Procedimiento.....	42
3.11.1.2.	Puesta en marcha del T.A.M.....	43
4.	RESULTADOS	45
4.1.	Proceso de partida del tratamiento anaerobio.....	45
4.2.	Variables respuestas	45
4.2.1.	Rendimiento de metano (Y).....	45
4.2.2.	Actividad Metanogénica Específica (AME)	46
4.3.	Prueba de máxima capacidad de rendimiento de metano.....	47
4.4.	Análisis de los resultados obtenidos.....	49
4.4.1.	Análisis estadístico de la AME	50
4.4.2.	Análisis estadístico del rendimiento de metano (Y)	52
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	APÉNDICE	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Mapa conceptual de reacciones bioquímicas para la producción de CH ₄ ...	13
2. Reactor de primera generación.....	21
3. Reactor de segunda generación	22
4. Reactor de tercera generación.....	23
5. Diagrama isométrico de reactores utilizados	27
6. Diagrama de Ishikawa	28
7. pH-metro utilizado, modelo pH 25. CRISSON	36
8. Analizador de Carbono Orgánico (SSM-5000).....	37
9. Cápsulas de porcelana	38
10. Horno mufla modelo CWF110.....	38
11. Baño María	39
12. Desecadora.....	39
13. Estufa ECOCELL	39
14. Balanza analítica modelo CP 3245 SARTORIUS	39
15. Reflujo abierto.....	40
16. Montaje de reactores	43
17. Diagrama de Pareto estandarizado para AME.....	51
18. Diagrama de Pareto estandarizado para Y	53
19. Medición de altura de biogás producido en el reactor de climatización	61
20. Prueba de ignición en el reactor de climatización	61
21. Prueba de ignición en los reactores del TAM.....	62
22. Medición de altura de la columna colectora de biogás	62
23. Columna donde todo el NaOH reaccionó con el CO ₂	63

24. Gráfico para lodo a 50% y 0mg de mineral a 34°C.....	63
25. Gráfico para lodo a 50% y 5mg de mineral a 34°C.....	64
26. Gráfico para lodo a 50% y 10mg de mineral a 34°C.....	64
27. Gráfico para lodo a 70% y 0mg de mineral a 34°C.....	65
28. Gráfico para lodo a 70% y 5mg de mineral a 34°C.....	65
29. Gráfico para lodo a 70% y 10mg de mineral a 34°C.....	66
30. Gráfico para lodo a 90% y 0mg de mineral a 34°C.....	66
31. Gráfico para lodo a 90% y 5mg de mineral a 34°C.....	67
32. Gráfico para lodo a 90% y 10mg de mineral a 34°C.....	67
33. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.5 a 36°C.....	68
34. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.25 a 36°C.....	68
35. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.25 a 28°C.....	69
36. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.5 a 28°C.....	69

TABLAS

I. Composición elemental de las bacterias metanogénicas.....	2
II. Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de la materia orgánica	12
III. Clasificación de microorganismos.....	18
IV. Variables controlables.....	29
V. Variantes de reactores.....	32
VI. Variantes de reactores en porcentajes.....	32
VII. Medidas geométricas de los reactores.....	33
VIII. Cantidad de nutrientes agregados.....	33
IX. Caracterización de los lodos y vinaza utilizada.....	34
X. Caracterización del residual minero.....	34
XI. Prueba de máxima capacidad de rendimiento de metano.....	48

XII. Variables respuestas para el diseño experimental bajo condiciones de <i>stress</i>	49
XIII. Análisis de varianza para AME.....	50
XIV. Análisis de varianza para Y.....	52
XV. Punto coincidente de máxima AME y Y.....	53

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
η	Eficiencia de remoción de la carga contaminante
AME	Actividad Metanogénica Específica
COT	Carbono Orgánico Total
DQO	Demanda Química de Oxígeno
MPB	Bacterias productoras de metano
OHPA	Organismos acetógenos productores obligados de hidrógeno
pH	Potencial de Hidrógeno
SRB	Bacterias sulfato reductoras
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
TAM	Ensayo de Actividad Metanogénica
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
UASB	Reactor Anaerobio de Manto de Lodos con Flujo Ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)
Y	Rendimiento de metano

GLOSARIO

Abono orgánico	Residuos de plantas, animales y otros desechos añadidos a la tierra para mejorar la estructura del suelo.
Actividad Metanogénica	Velocidad de producción de metano alcanzada en el tiempo de experimentación.
Actividad Metanogénica Específica	Herramienta que se utiliza para determinar la capacidad de asimilación que tienen las bacterias metanogénicas para producir biogás, permitiendo clasificar el potencial de la biomasa para convertir el sustrato en metano y gas carbónico bajo diferentes condiciones ambientales Es la máxima velocidad de producción de metano alcanzada entre puntos consecutivos.
Aerobio	Proceso bioquímico que sucede en presencia de oxígeno.
Anaerobio	Proceso bioquímico o condición ambiental que sucede en ausencia de oxígeno.
Biodegradable	Sustancias que pueden ser descompuestas por microorganismos en un período de tiempo relativamente corto.

Biodegradación	Proceso de descomposición de sustancias, llevado a cabo por organismos vivos.
Biogás	Mezcla de metano y otros gases que se desprenden durante la degradación anaerobia de la materia orgánica por la acción de diferentes microorganismos; con valor combustible. Se obtiene mediante un digestor o bien canalizándolo directamente en un vertedero controlado.
Biodigestor	Diseño de ingeniería que permite el desarrollo de los procesos anaerobios naturales confinándolos en el medio más apropiado para controlar el proceso. Esta estructura se dimensiona en función de la necesidad de servicio y la disponibilidad de materia orgánica.
Compost	Fertilizante formado mediante la biodegradación controlada y acelerada de materia orgánica hasta formar un producto parecido al humus.
Compostaje	Proceso de descomposición de materia orgánica en presencia de oxígeno y en unas condiciones de humedad y temperatura controladas, para conseguir una estabilización e higienización de aquella materia y obtener compost.
Condiciones de stress	Condiciones críticas o de depresión; que afectan el equilibrio de un sistema. Factores controlables que afectan el rendimiento de un sistema.

Descomposición	Desintegración de residuos orgánicos por medios biológicos, químicos o térmicos. La total oxidación química produce dióxido de carbono (CO ₂), agua y materia inorgánica.
Desecho	Término general para residuos sólidos: Sinónimo de desecho sólido, residuos sólidos municipales y de basura.
Digestión anaerobia	Es un proceso natural e inevitable de descomposición de la materia orgánica que ocurre en ausencia de oxígeno en un medio apropiado y donde se obtiene una mezcla de gases denominado biogás. Este proceso está compuesto por cuatro etapas fundamentales: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y la metanogénesis.
Dióxido de carbono	Componente natural del aire no tóxico pero no hace viable la vida. Las altas concentraciones actuales en la atmósfera producto de la actividad antropogénica (industrias, automóviles, etc.) es la causa del efecto invernadero.
Incineración	Proceso controlado por el cual los residuos combustibles sólidos, líquidos y gaseosos son quemados y convertidos en gases. El residuo obtenido contiene poco o nada de material combustible.
Lodo	Líquido con gran contenido de sólidos en suspensión, proveniente de la mezcla profusa de agua y tierra, por operaciones como el tratamiento de agua y de aguas residuales.

Materia orgánica	Compuesto químico que tiene carbono combinado con otros elementos químicos. La materia orgánica puede ser de origen natural o antropogénico.
Medio ambiente	Sistema de elementos abióticos, bióticos y socioeconómicos con que interactúa el hombre, a la vez que se adapta al mismo, lo transforma y lo utiliza para satisfacer sus necesidades.
Metano	Gas inodoro, incoloro, asfixiante, e inflamable, producido a partir de residuos bajo la descomposición anaerobia.
Microorganismos	Organismos de tamaño microscópicos, incluyendo bacterias, levaduras, hongos sencillos, actinomicetos, algunas algas, protozoos. Están involucrados en la estabilización de los residuos (compostaje o digestión anaerobia).
Mineral	Perteneciente al numeroso grupo de las sustancias inorgánicas o a alguna de sus partes. Parte útil de una explotación minera.
Rendimiento de metano	Cantidad de metano producido para una cantidad de sólidos suspendidos volátiles iniciales determinada

Residuos sólidos	Cualquier material incluido dentro de un gran rango de materiales sólidos, también algunos líquidos, que se tiran o rechazan por estar gastados, ser inútiles, excesivos o sin valor. Normalmente, no se incluyen residuos sólidos de instalaciones de tratamiento.
Residuos	Cualquier material que resulta de un proceso de fabricación, transformación, uso, consumo, limpieza, cuando su propietario lo destina al abandono.
Sustancia mineral	Sustancia inorgánica que se halla en la superficie o en las diversas capas de la corteza del globo, y principalmente aquella cuya explotación ofrece interés.
Tratamiento	Proceso de transformación física, química o biológica de los residuos sólidos para modificar sus características o aprovechar su potencial, a partir del cual se puede generar un nuevo residuo sólido con características diferentes.
Vertimiento	Toda evacuación en el medio ambiente de sustancias, de materiales, de desechos o residuales líquidos, gaseosos o sólidos como resultado de la actividad humana.
Vinazas	Constituye el principal residuo líquido de la fermentación de la fabricación de alcohol.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un proceso anaerobio para el tratamiento de vinazas a escala laboratorio. El mismo se evaluó por un período de 5 meses utilizando bio-reactores herméticos con una columna para captar y almacenar el biogás generado. Se adicionó, de acuerdo a un diseño experimental, varias dosificaciones de residuos sólidos mineros para probar su efectividad en condiciones de *stress*.

Se monitoreo periódicamente la cantidad de biogás producido al igual que la temperatura existente en el área de montaje de los bio-reactores, el pH se ajustó al inicio de cada experimentación y se monitoreó una vez finalizada la misma. Se caracterizó el efluente para la determinación de las variables respuesta.

Bajo las condiciones del laboratorio, para una materia orgánica residual con una concentración de Demanda Química de Oxígeno promedio (DQO) de 4g/L, se obtuvo un rendimiento máximo de producción de metano de 26.42 ml CH₄/g SSV (T=36°C, DQO/SSV=0.5 y 5mg de mineral) para un 80.6% del esperado bajo las mismas condiciones, y una actividad metanogénica específica de 0.0361 g DQO/g SSV.d (T=36, DQO/SSV=0.25 y 10mg de mineral), con lo que puede concluirse que bajo condiciones de *stress* para el tratamiento anaerobio de las vinazas, la adición de mineral es una variable que influye de forma positiva en la obtención del máximo de las variables respuesta.

ABSTRACT

The present paper aimed the anaerobic process of vinasses at lab scale. The total period of lab work was 5 months using very well sealed bioreactors with a column to catch biogas generated in the process. Several doses of mineral wastes were added in order to prove its effectiveness under stress conditions. The runs were according a multi-factorial experimental design.

Produced biogas was monitored as well as temperature. pH was adjusted at the beginning and also monitored at the end of each experiments. Effluents were characterized in order to determine the final variables (Y and AME).

Under lab conditions, with a COD of 4mg/L the maximum value for methane yield was 26.42 mL CH₄ /g SSV at 36 °C, COD/VSS = 0.5 and 5 mg of mineral dose. This is the 80.6% of the expected value for the same conditions. The maximum Specific Methanogenic Activity was 0,0361 COD/g VSS d (T=36 °C, COD/VSS = 0.5, 10 mg mineral).

It can be concluded that under stress conditions for the anaerobic treatment of vinasses, the addition of mineral doses is a variable which provokes a positive response for the obtention of maximum values of Y and AME.

OBJETIVOS

◆ General:

Evaluar la potencialidad de residuos minerales para el tratamiento de los residuos de la industria azucarera bajo condiciones de *stress*.

◆ Específicos:

1. Evaluar la actividad metanogénica específica y el rendimiento de metano mediante un diseño de experimentos, teniendo en cuenta resultados obtenidos en anteriores estudios de potencialidad de residuos mineros en la digestión anaerobia.
2. Realizar el monitoreo del proceso anaeróbico discontinuo en función del tiempo en un reactor de tercera generación.
3. Caracterizar las muestras tomadas en el monitoreo para la evaluación de los parámetros de operación.
4. .Analizar los resultados obtenidos y elaborar informe final.

PROBLEMA CIENTÍFICO

La facilidad con la que el tratamiento anaerobio de las vinazas, sobre todo en tecnologías convencionales, puede entrar en stress producto de la amalgama de compuestos complejos que contienen en sí misma o los que se generan en el propio tratamiento y que pueden provocar el cese de la producción de biogás.

HIPÓTESIS

El empleo de los residuos sólidos mineros en proporciones idóneas con residuos azucareros (vinazas) estimula y favorece el proceso de biodigestión anaerobia, mediante el aporte de micronutrientes esenciales para el buen desarrollo de las bacterias metanogénicas cuando el mismo se encuentra bajo condiciones de *stress*.

INTRODUCCIÓN

De forma genérica, por biomasa se entiende, el conjunto de materia orgánica de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, que haya tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. El término *Biomasa* es un amplio concepto, que en sentido material energético se aplica a las materias hidrocarbonadas no fósiles, en las cuales la radiación solar ha conseguido la reducción del Hidrógeno y el Carbono mediante el proceso de la fotosíntesis. Por esta razón se presenta de manera periódica y no limitada en el tiempo, es decir, de forma renovable. El carácter energético, orgánico y no fósil es el que sirve de vínculo a las distintas biomásas.

En la actualidad, y con el desarrollo de las civilizaciones industrial y post-industrial, los residuos aparecen cada vez con mayor pujanza en la vida diaria del hombre. Así, a medida que la sociedad avanza y obtiene mayores objetivos de producción y de renta, los residuos pueden llegar a ser, como de hecho ya sucede, un problema creciente por su magnitud y sus consecuencias. Por todo ello, la lucha contra la contaminación, la protección del entorno físico y la defensa del Medio Ambiente se están convirtiendo en aspectos fundamentales a tener en cuenta en la política de los países que pretenden el bienestar de sus habitantes.

El nivel del dióxido de carbono por millón se incrementa a ritmo de 2 partes por millón cada año, rebasando los niveles de hace 600 mil años. Las últimas dos décadas han sido, cada una de ellas, las más calurosas desde que se tienen noticias del registro. El mencionado gas aumentó 80 partes por millón en los últimos 150 años, entre otros fenómenos naturales que ocurren en grandes saltos cuantitativos (tomado de Granma Internacional, diciembre 2009).

Muchos países latinoamericanos ya están reformando sus políticas energéticas en aras de lograr una autonomía en este sentido y contribuir con la disminución de contaminantes que aportan al cambio climático, tema con un alto nivel de actualidad, por cuanto está causando ya considerables daños y cientos de millones de personas están sufriendo las consecuencias.

La vinaza es uno de los residuales que más contaminan el Medio Ambiente y los que mayor aporte realizan por emisiones de gases con efecto invernadero. Es un residual que se genera en varias áreas de la América Latina.

1. ANTECEDENTES

Actualmente en Cuba así como en Guatemala un sector de gran importancia económica es la agricultura ya que gracias a ella, existe una intensa actividad en el sector Agroindustrial; uno de los residuos contaminantes de mayor importancia ambiental en este sector, son los vertidos de alta carga orgánica frecuentemente denominados *vinazas*.

Para preservar la salud del hombre y la calidad ambiental, se hace imprescindible el tratamiento de estos residuos antes de su vertimiento al medio ambiente; y el tratamiento anaerobio de residuos orgánicos constituye un proceso que posee virtudes que responden a las demandas antes mencionadas ya que, además de permitir la depuración de residuales orgánicos biodegradables, en él se obtiene biogás.

Los diversos tipos de vinazas constituyen una grave amenaza para el ambiente ya que poseen una concentración de materia orgánica desde 20 g/L y pueden llegar a 200 g/L. (Del Real O)

La adición de micronutrientes al proceso de digestión anaerobia, se basa en los requerimientos elementales de las bacterias formadoras de metano, los cuales tienen una relativa alta concentración interna de Hierro (Fe), Níquel (Ni) y Cobalto (Co). Estos elementos pueden no estar presentes en las concentraciones suficientes en las corrientes residuales de un proceso agroindustrial y por ello, a los residuales hay que añadirles trazas de elementos antes del tratamiento. (Cheremisinoff Nicholas P. 1996; Pereda Reyes 2007)

Al utilizar vinaza como sustrato, la adición de micronutrientes al proceso de digestión anaerobia se hace indispensable debido al alto nivel de potasio en la vinaza, ya que este tiene una influencia negativa en la disponibilidad de los micronutrientes esenciales.

La concentración mínima de macros y micronutrientes se puede calcular basándose en la concentración de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) en el residual, el rendimiento celular y la concentración de nutrientes en las células bacterianas. En la siguiente tabla se muestra la composición elemental de las bacterias metanogénicas, en el consorcio bacteriano. Es recomendable ajustar la concentración de nutrientes en el afluente al doble de la concentración mínima requerida para asegurar que exista un pequeño exceso en las necesidades de nutrientes. (Speece 1996)

Tabla I. Composición elemental de las bacterias metanogénicas

MACRONUTRIENTES		MICRONUTRIENTES	
Elemento	Concentración (mg kg ⁻¹)	Elemento	Concentración (mg kg ⁻¹)
N	65 000	Fe	1 800
P	15 000	Ni	100
K	10 000	Co	75
S	10 000	Mo	60
Ca	4 000	Zn	60
Mg	3 000	Mn	20
		Cu	10

Fuente: Ileana Pereda Reyes. **Potencialidad de los residuos sólidos mineros como estimulantes del proceso de digestión anaerobia.** Pág. 16

Un número de parámetros tales como, concentración del sustrato y su composición, concentración de sulfatos, relación (DQO/SO₄²⁻), temperatura, pH, toxicidad por los sulfuros, disponibilidad de los nutrientes, configuración del sistema de los reactores, carga orgánica, carga hidráulica, velocidad, propiedades de inmovilización de las bacterias, naturaleza de la biomasa, tipo de inóculo, período de aclimatación y operación del reactor, la presencia de inhibidores afecta el balance del sistema involucrando a varios grupos de bacterias, entre ellas, las metanogénicas y las sulfato-reductoras.

El efecto de la adición de metales en traza sobre el comportamiento de biorreactores, es un importante campo de estudio en la biotecnología anaerobia. Las trazas de determinados metales están involucradas en las actividades enzimáticas de la acidogénesis y metanogénesis. En condiciones de depresión o estrés, la adición de elementos trazas a los biorreactores metanogénicos es necesaria para garantizar una buena producción de metano.

En el caso de tratamientos anaerobios en condiciones termofílicas, se ha demostrado la necesidad de la adición de nutrientes como el Ca, Fe, Ni y Co, para superar la acumulación de ácidos grasos volátiles en el reactor mejorando la eficacia en la eliminación de la Demanda Química de Oxígeno, sin embargo si los metales están presentes a altas concentraciones en los sistemas de tratamiento de aguas residuales, éstos pueden ser tóxicos. (Osuna 2003)

1.1. Trabajos con Fe, Ni y Co

Las bacterias metanogénicas utilizan el amonio como fuente de nitrógeno, requieren del níquel, el cobalto y el hierro. El efecto de cantidades grandes de estos metales puede limitar severamente el proceso de producción de metano. Las vitaminas también son tenidas en cuenta por cuanto el crecimiento de los microorganismos metanógenos se estimula por su presencia en el medio de cultivo. (Pereda Reyes 2007)

La poca biodisponibilidad o la falta de metales en cantidades traza, en específico el níquel, cobalto y molibdato puede ser la causa del bajo rendimiento del reactor a altas cargas orgánicas.

Las perturbaciones por pH afectan fuertemente la dinámica de retención de los metales dentro de la cama granular de los reactores UASB. Las pérdidas de hierro en su forma soluble, son considerables, mientras que las pérdidas de níquel y cobalto en su forma soluble son limitadas; Después de un período con perturbaciones en pH, los ácidos grasos volátiles se acumulan en los reactores. Y esto repercute en la remoción de carga contaminante y en la producción de biogás.

Experimentos realizados en reactores discontinuos utilizando aguas residuales operando bajo condiciones mesofílicas, han demostrado que la producción de metano se mejora con la adición de cobalto y por ende mejora el proceso anaerobio. (Pereda Reyes 2007)

Los metales en cantidades trazas con mayor número de investigaciones han sido el hierro, níquel y cobalto; y en menor medida el manganeso, magnesio, molibdato, selenio, cromo y zinc, entre otros. En todos los casos se ha observado que la adición de todos o algunos de ellos ha implicado una mejoría en los principales parámetros de los sistemas de digestión anaerobia, en especial en la actividad metanogénica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Biodigestores anaerobios

En ausencia de oxígeno por medio de una serie de reacciones bioquímicas complejas la materia orgánica es degradada por acción de microorganismos en biogás (Metano y dióxido de carbono principalmente) y un efluente líquido (biofertilizante); y con ello la DQO disminuye. Siendo esta una tecnología de bajo consumo energético. (Mancilla Morales 1998; Martí Herrero 2008)

La energía es obtenida en forma de gas combustible, y tiene múltiples usos: iluminación eléctrica, motores de combustión interna, refrigeración, gas para algunos tipos de estufas y, equipos como calderas e incineradores. (Rossi Machado 2007)

2.1.1. Importancia de los biodigestores anaerobios

Los procesos de digestión anaerobia ocurren en la naturaleza, llevándose a cabo en el fondo de ríos, lagos y el mar, y el tracto intestinal de todos los animales.

Un biodigestor anaerobio está constituido por una cámara hermética; debido a la ausencia de oxígeno en el interior de la misma, las bacterias anaerobias contenidas en el lodo activado comienzan a digerirlo. El producto gaseoso llamado biogás, tiene en su composición dióxido de carbono (20-40%), nitrógeno molecular (2-3%) y sulfhídrico (0,5-2%), siendo el metano el más abundante con un 60-80%. (Chamorro Maldonado 2008)

2.1.1.1. Ventajas de un proceso anaerobio con respecto a uno aerobio

En los procesos aerobios el 60% de la energía se consume durante la síntesis de biomasa, el 40% se pierde en forma de calor de reacción. Alrededor del 50% del carbono contenido en el sustrato (residual) se convierte a biomasa y el porcentaje restante a dióxido de carbono (CO₂). En los procesos anaerobios cerca del 90% de energía se consume durante la síntesis de biogás, y se pierde el 7% de energía en forma de calor de reacción. El 95% del carbón contenido en el sustrato se transforma a biogás (CH₄+CO₂) y el 5% se convierte en biomasa. Los lodos anaerobios son más estables que los aerobios. Interesándonos la obtención de biogás. (Menéndez Gutiérrez 2007)

2.1.1.2. Desventajas de un proceso anaerobio

El proceso anaerobio es lento comparado con otros procesos de tratamiento biológico. Los procesos anaerobios a escala industrial demoran mucho tiempo para llegar a operar en condiciones estables (6 meses a 1 año). Por ello existe necesidad de agentes estimulantes y catalizadores al proceso de digestión anaerobia.

Los microorganismos anaerobios se caracterizan por su baja tasa de crecimiento; por lo tanto, al iniciar el proceso de arranque del reactor se requiere de un período de tiempo que dependerá de la calidad y cantidad de inóculo utilizado. En los casos en que no se cuenta con inóculos adecuados, esta etapa se puede prolongar, incluso hasta condiciones críticas en las que nunca alcanza la estabilidad. (Bitton 2005)

Se pueden generar malos olores, atribuidos a la producción de compuestos azufrados como el H₂S en el biogás. La digestión anaerobia es un proceso eficiente para la remoción de materia orgánica, pero tiene poco efecto sobre la concentración de nutrientes (nitrógeno y fósforo), y la remoción de patógenos es apenas parcial.

2.1.2. Etapas de la biodigestión anaerobia

En la digestión anaerobia se realizan fundamentalmente cuatro etapas o fases, las cuales se describen a continuación.

2.1.2.1. Fase de hidrólisis

Los microorganismos actúan sobre partículas orgánicas disueltas, por acción de enzimas extracelulares. La velocidad de producción de biogás es proporcional a la velocidad de solubilización de materia orgánica. Las proteínas, carbohidratos y lípidos se transforman respectivamente en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. El pH óptimo de entrada es 7, sin embargo después que el proceso se estabiliza, es posible trabajar con pH de entrada de 4 a 5, como en los residuales de cítricos y destilerías.

En las reacciones bioquímicas que se desarrollan dentro del reactor, se genera una capacidad buffer o tampón que mantiene el pH alrededor de 7, sin necesidad de neutralizarlo a la entrada con agentes químicos. Los sistemas amortiguadores, buffer, o tampones son por lo general soluciones de ácidos débiles y de sus bases conjugadas o de bases débiles y sus ácidos conjugados.

La concentración de H^+ está vinculada a la naturaleza del electrolito débil. Considerando un ácido débil, de modo genérico como HAc, su equilibrio de disociación sería:

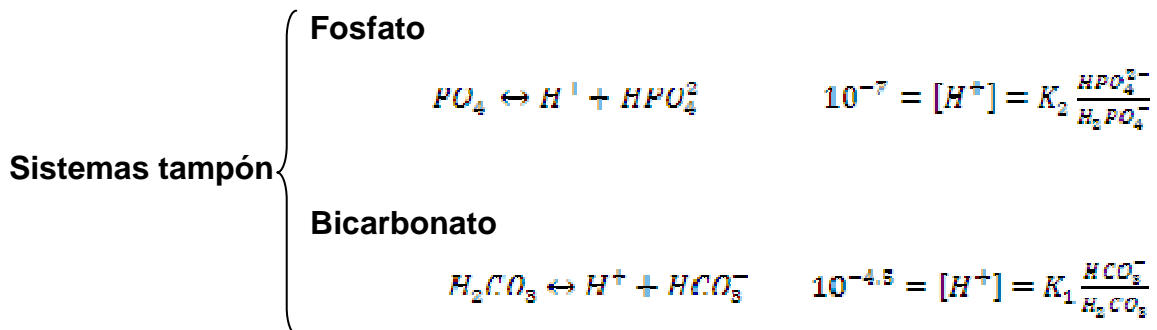


Aplicando la ley de acción de masas, la constante de equilibrio K será:

$$K = [Ac^-] * [H^+] / [HAc]$$

Despejando $[H^+]$

$$[H^+] = \frac{K * [HAc]}{[Ac^-]}$$



2.1.2.2. Fase ácida (acidogénesis)

Las bacterias acidificantes transforman la materia orgánica disuelta (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos) en dióxido de carbono (CO_2) más Hidrógeno gaseoso (H_2) y ácidos grasos volátiles (AGV). La cinética del proceso es relativamente rápida y el pH óptimo bajo. Durante el arranque, existe peligro de sobrecarga orgánica y si esta ocurre, la fermentación ácida puede volverse predominante sobre la fermentación metanogénica, resultando en la acidificación del sistema.

2.1.2.3. Fase acetogénica (acetogénesis)

Los ácidos grasos volátiles son transformados en ácido acético, por medio de bacterias facultativas.

2.1.2.4. Fase metanogénica (metanogénesis)

Única fase estrictamente anaerobia, en ella las bacterias claves de la digestión anaerobia (metanogénicas) producen metano (CH_4) a partir de la mezcla de dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno gaseoso (H_2) y de acetato. La cinética del proceso al igual que la velocidad de formación de nuevas bacterias es baja. Son sensibles a cambios de temperatura y pH (próximo a 7).

Si los microorganismos formadores de ácidos trabajan de una forma más acelerada que los que la consumen (metanogénicas) provocará una acumulación de los ácidos, el pH baja y las bacterias formadoras de metano se inhiben; por lo que la digestión cesa.

2.1.3. Microbiología y bioquímica de la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia abarca toda una serie sumamente compleja de reacciones bioquímicas provocadas por el cultivo de una mezcla de bacterias de cuatro grupos diferentes. La digestión efectiva de la materia orgánica a metano requiere del metabolismo coordinado y combinado de diferentes grupos de microorganismos, los cuales pueden ser diferenciados sobre la base de los sustratos que utilizan y los productos metabólicos finalmente formados. El esquema biológico involucra reacciones de multi-organismos con multi-sustratos que se llevan a cabo en serie y en paralelo. (Díaz Rodríguez 2009)

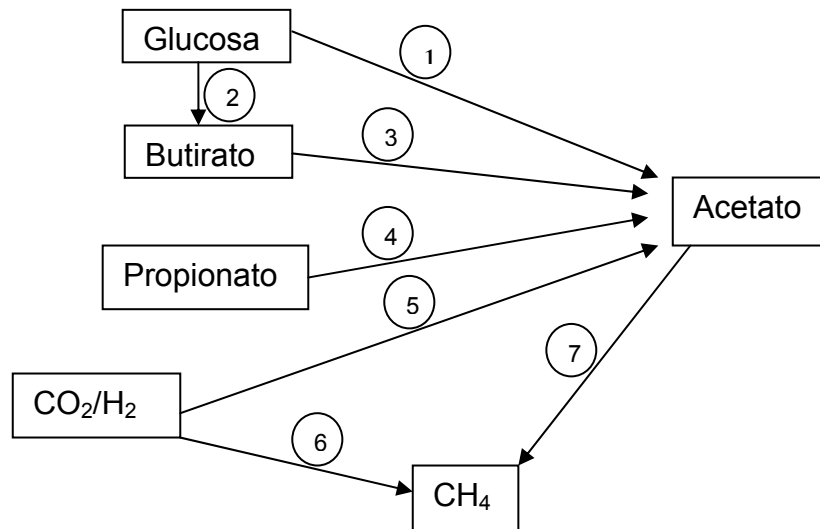
En la Tabla II y en la Figura 1, se reportan las principales reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en el proceso de la digestión anaerobia.

Tabla II. Reacciones bioquímicas en la digestión anaerobia de la materia orgánica

	Tipo de reacción	Ecuación
1	Fermentación de glucosa a acetato	$\text{Glucosa} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{H}^+ + 4\text{H}_2$
2	Fermentación de glucosa a butirato	$\text{Glucosa} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2 + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}^+ + 2\text{H}_2$
3	Fermentación del butirato a acetato e H_2	$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
4	Fermentación del propionato a acetato	$\text{Propionato} + 3\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2$
5	Acetogénesis a partir de H_2 y CO_2	$\text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 4\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O}$
6	Metanogénesis a partir del CO_2 y H_2	$\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$
7	Metanogénesis a partir del acetato	$\text{Acetato} + \text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$

Fuente: Yosvany Díaz Domínguez. **Empleo de pretratamientos básicos para mejorar la digestión anaerobia de los residuales domésticos en la planta de biogás Sobacken, Suecia.** Pág. 16

Figura 1. Mapa conceptual de reacciones bioquímicas para la producción de CH₄



Grupo I: Bacterias Hidrolíticas – Fermentativas.

Las bacterias que llevan a cabo las reacciones de hidrólisis y acidogénesis son anaerobias facultativas y los géneros más frecuentes que participan son los miembros de la familia Enterobacteriaceae, además otros géneros Bacillus, Peptostreptococcus, Propionibacterium, Bacteroides, Micrococcus y Clostridium.

Grupo II: Bacterias Acetogénicas.

Para que tenga lugar una eficiente metanogénesis, los productos de fermentación como el propionato y el butirato deben ser oxidados a acetato, dióxido de carbono (CO₂) e Hidrógeno (H₂). Esta oxidación es llevada a cabo por un grupo denominado: *organismos acetógenos productores obligados de hidrógeno*, OHPA por sus siglas en inglés, mediante un proceso conocido como acetogénesis.

Dentro del grupo de acetógenos existe un grupo de bacterias conocidas como *bacterias homoacetogénicas*, las cuales son anaerobias obligadas y utilizan el dióxido de carbono (CO₂), como aceptor final de electrones, produciendo acetato como producto único de la fermentación anaerobia. Aunque este no es un grupo taxonómico definido, en él se incluyen una variedad de bacterias Gram (+) y Gram (-) formadoras de esporas.

Grupo III: Bacterias Metanogénicas.

Las bacterias metanogénicas pertenecen al grupo actualmente conocido como Archeaea. Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas y producen Metano como principal producto del metabolismo energético. A pesar de los requerimientos estrictos de anaerobiosis obligada y el metabolismo especializado de este grupo, estas bacterias se encuentran ampliamente distribuidas en la naturaleza. La actividad metanogénica es mucho mayor en ecosistemas de aguas dulces y terrestres, la menor actividad detectada en océanos, se debe a la alta concentración de sulfatos, condición que favorece la sulfato reducción en sedimentos marinos.

2.2. Factores que controlan el proceso de biodigestión

Las variables que influyen en la producción del biogás son el potencial de hidrógeno (pH), temperatura, contenido de sólidos, nutrientes y sustancias tóxicas. Durante los procesos de biodigestión se deben controlar la temperatura y el pH, manteniéndolos estables a través de parámetros de proceso o de la adición de nutrientes.

Teniendo en cuenta el someter el proceso a cargas orgánicas y tiempos de retención hidráulica y celular compatibles con el residuo a ser digerido y con el tipo de digester empleado.

El funcionamiento de los bio-reactores anaerobios depende de la selección del tipo de reactor y de la combinación adecuada de los parámetros o factores que intervienen en el proceso de digestión (factores básicos y ambientales).

2.2.1. Factores básicos

Dentro de los factores básicos que intervienen en el control de los procesos anaerobios se destacan: (Menéndez Gutiérrez 2007)

- Bacterias
- Sustrato
- Tiempo de retención
- Edad del lodo

2.2.1.1. Bacterias

Las bacterias metanogénicas son las bacterias claves de la digestión anaerobia y son más sensibles a los cambios ambientales que las formadoras de ácido. Subsisten en completa ausencia de oxígeno molecular. Estas bacterias son poco abundantes en un medio dado, como consecuencia de que la mayor fracción de la energía que se libera en los procesos de oxidación anaerobia queda asociada al metano (CH_4) que se forma, por lo que queda menos energía para ser utilizada en el crecimiento.

2.2.1.2. Sustrato

El sustrato para las bacterias está constituido por los compuestos orgánicos a ser estabilizados. Los compuestos orgánicos que se someten a digestión anaerobia comúnmente son de estructura muy compleja, que son transformados a través de sucesivas etapas hasta la obtención de los productos finales, constituidos fundamentalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) y otros compuestos estables y de bajo contenido energético.

La concentración del sustrato contribuye a la formación del ambiente donde se desarrollan estos microorganismos. Una variación en la concentración de la materia orgánica puede provocar una variación (disminución) de la eficiencia del proceso. Debe tenerse una condición de equilibrio entre la concentración del sustrato y la cantidad de biomasa en el reactor. Una elevada concentración de sustratos puede llegar a alcanzar condiciones de saturación, manifestando eficiencia baja del proceso, al igual que concentraciones bajas de sustratos provocan que la materia orgánica se encuentre menos disponible.

2.2.1.3. Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Es el tiempo necesario de contacto entre el residual líquido y los microorganismos, para lograr la remoción de la materia orgánica deseada. El metabolismo de los microorganismos anaerobios resulta lento, por ello el tiempo de contacto entre ellos y el sustrato debe ser prolongado, basándose en la temperatura de trabajo. A mayor temperatura, menor tiempo de retención hidráulica.

Las velocidades de alimentación deben ser controladas, ya que si son muy bajas la eficiencia de operación disminuye, y al ser altas (cortos tiempos de retención), el tiempo de contacto no es suficiente entre los microorganismos y la materia orgánica a degradar y por lo tanto el residual eliminado no es tratado correctamente, al mismo tiempo pueden provocar que cierta cantidad de microorganismos sea arrastrado, disminuyendo la biomasa del sistema, por consiguiente se obtiene una baja eficiencia en el reactor.

El tiempo de retención hidráulico para la estabilización anaerobia depende de la temperatura y la edad del lodo. Actualmente se conoce que los digestores pueden operar con tiempos de retención de hasta de un día o menos en la medida que la edad del lodo sea mayor que un cierto valor crítico ($\theta_{X,cr}$). Esta edad del lodo crítica es el tiempo por debajo del cual la digestión se inhibe como resultado del lavado de las bacterias, cuyo crecimiento es lento. (Menéndez Gutiérrez 2007)

2.2.1.4. Edad del lodo

La edad del lodo tiene mucha aplicación en el diseño y control de los reactores completamente mezclados, pero en película fija o reactores en los que la biomasa no es homogénea, no tiene uso. Esto se debe a la dificultad práctica de medir la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) dentro del reactor. (Menéndez Gutiérrez 2007)

2.2.2. Factores Ambientales

Dentro de los factores ambientales que intervienen en el control de los procesos anaerobios se destacan:

- Temperatura
- pH
- Sustancias tóxicas
- Condiciones de *stress*

2.2.2.1. Temperatura

Parámetro de operación fundamental, ligado a balances energéticos que pueden facilitar o impedir la aplicación de las técnicas anaerobias. Temperaturas entre los 30 a 40°C presentan tasas máximas de digestión anaerobia. Atendiendo al intervalo de temperatura, la operación en los bio-reactores se clasifica según la siguiente tabla.

Tabla III. Clasificación de microorganismos.

Clasificación	Temperaturas
Psicrófilos	< 15°C
Mesófilos	15°C - 45°C
Termófilos	50°C - 65°C

Fuente: Mayllolis Fragas Chiu. **Comportamiento de reactores anaerobios de lecho fluidizado utilizando zeolita natural como medio de soporte.** Pág. 25

2.2.2.2. Potencial de hidrógeno (pH)

Constituye el factor más importante en los sistemas anaerobios, ya que se debe tener en cuenta la acidez que tenga el digestor. Los microorganismos metanogénicos tienen un limitado rango de pH cerca de la neutralidad, mientras que los organismos hidrolíticos exhiben una poca actividad debajo de 6.5 de pH. A pH neutro, los ácidos grasos volátiles (AGV) están mayoritariamente en forma ionizada, cuando el pH disminuye implica un aumento en el contenido de los AGV (ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico), y estos están menos disociados, es decir son tóxicos. Mientras que un aumento de pH se considera generalmente un indicador de exceso de amoníaco (NH_3), que es tóxico en el proceso. En ambos casos si se detecta a tiempo, puede solucionarse agregando un álcali (generalmente cal), o un ácido (generalmente H_2SO_4), según sea el caso. (Menéndez Gutiérrez 2007)

2.2.2.3. Sustancias tóxicas

Cantidades grandes de sustancias tóxicas perjudica el desarrollo de las bacterias presentes en el proceso y su toxicidad resulta evidente en una reducción de la producción de biogás. Sales solubles de metales como cobre (Cu), cinc (Zn) y níquel (Ni) producen inhibición del proceso; las sales alcalinas pueden acelerar o retardar el proceso dependiendo de la concentración que se encuentre en la mezcla a digerir. El amoníaco (NH_3) es un amortiguador importante en la digestión, pero en altas concentraciones, en especial cuando el pH es menor a 7, afecta el desarrollo de las bacterias metanogénicas. Las concentraciones de amoníaco deben ser inferiores a 2000 mg/L, aunque los desechos porcinos pueden trabajar con valores de hasta 4990 mg/L. (Chamorro Maldonado 2008)

La presencia de ácido sulfúrico (H_2S) generado a partir de los sulfatos (SO_4^-) contenidos en la alimentación tiene efectos inhibidores; sin embargo es posible estabilizar reactores con elevados niveles de sulfatos (<8 g/L). La reducción de sulfato a sulfuro está determinada por la relación DQO/ SO_4 a la entrada del reactor, cuando el valor de esta relación es mayor a 10 puede ocurrir una inhibición insignificante por sulfuro.

El cociente teórico DQO/ SO_4 para una total reducción de sulfatos es de 0.67; por debajo de este valor la reducción se ve afectada por un déficit de materia orgánica, por otro lado pasado de este valor la remoción de materia orgánica puede ocurrir por la vía de las bacterias sulfato reductoras (SRB) o por la vía de bacterias productoras de metano (MPB).

Los detergentes e hidrocarburos clorados como el cloroformo en concentraciones superiores a 15 mg/L, pueden causar dificultades a este proceso. En concentraciones elevadas los desinfectantes y pesticidas crean problemas en la digestión.

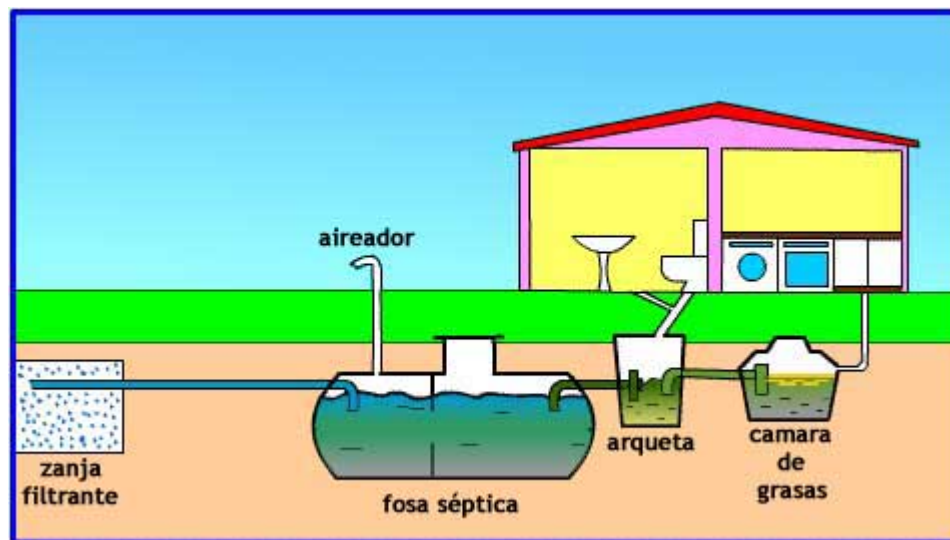
2.3. Proceso de digestión para tratar los residuos orgánicos

2.3.1. Reactores de primera generación

Los reactores biológicos de primera generación son aquellos en que la biomasa se encuentra en relativo reposo, con un mínimo contacto con el sustrato, o también en suspensión, pero sin recirculación de sólidos. Por esta razón la relación (edad del lodo/tiempo de retención hidráulico) es igual a 1, como es el caso de los reactores completamente mezclados.

Ejemplos de reactores de primera generación son las fosas sépticas, los tanques Imhoff, los digestores convencionales, las lagunas anaerobias y los reactores completamente mezclados aplicados a la estabilización de los lodos de extracción de plantas de tratamiento de aguas residuales. En la Figura 2 se muestra un reactor de primera generación.

Figura 2. Reactor de primera generación



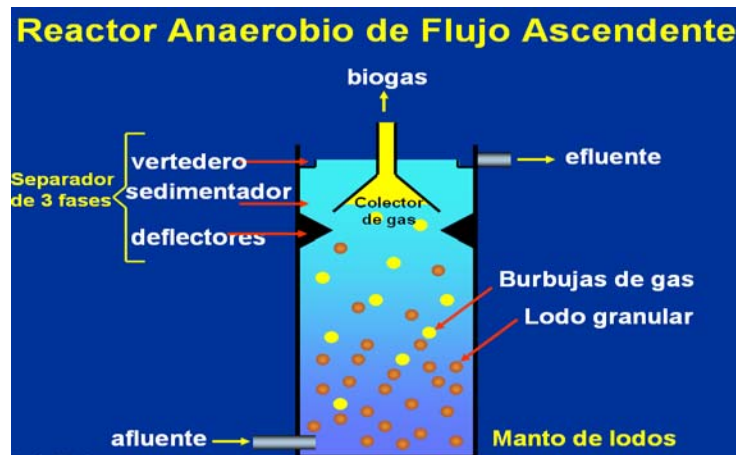
Fuente: http://www.ctv.es/clean_world_hispania/activador_biologico_fosa_septica.jpg

2.3.2. Reactores de segunda generación

Se caracterizan porque los microorganismos son retenidos en el reactor por la presencia de un soporte al que se adhieren o bien por su sedimentación. El tiempo de retención de sólidos es mayor que el tiempo de retención hidráulico y como consecuencia, el proceso es mucho más eficiente.

La primera versión de esta generación es el filtro anaerobio, posteriormente se desarrolló una variante más eficiente con la introducción de un soporte tubular, ordenándose de esta manera el empaque (Van D Berg y Lentz). Lettinga (1980) desarrolló el sistema UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) o Reactor Anaerobio de Manto de Lodos y Flujo Ascendente, con características de película fija pero sin material de soporte, con altos niveles de eficiencia. En la siguiente figura se muestra un reactor de segunda generación.

Figura 3. Reactor de segunda generación

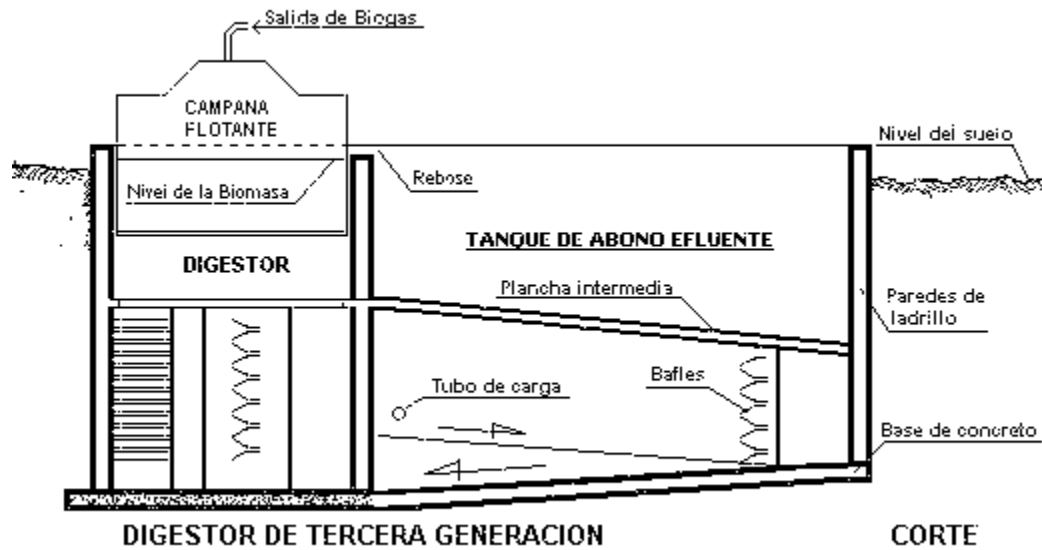


Fuente: Rosa Yaya Beas. Tratamiento anaerobio de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios. www.concytec.gob.pe/proy-oea/tpe2315.ppt

2.3.3. Reactores de tercera generación

Estos reactores contienen microorganismos en forma de biopelícula adherida a un soporte que se expande o fluidiza. Utilizan una corriente de recirculación para provocar un flujo ascendente y mantener fluidizado el lecho de partículas de soporte. Estas partículas pueden ser arena, material plástico o cerámico. El material soporte brinda una gran área superficial sobre la que se adhiere la biopelícula y mantiene una buena sedimentabilidad, garantizando la retención celular. En la Figura 4 se muestra un reactor de tercera generación.

Figura 4. Reactor de tercera generación



Fuente: Fundación Hábitat. **Biodigestores una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes.**

<http://imagenes.tupatrocinio.com/img-bbdd/documentos/biodigestores.doc>

2.3.4. Forma de operación

La producción controlada de biogás puede llevarse a cabo por medio de procesos continuos y por lotes.

2.3.4.1. Operación por lotes

Las plantas *batch* o discontinuas, son cargadas de materia orgánica de una vez y vaciadas por completo después de haber transcurrido el tiempo de retención fijado en el diseño del digestor. Este sistema es aplicable cuando se desea procesar materia orgánica que presenta problemas de manejo, materia orgánica disponible en forma intermitente y cuando se desea obtener principalmente abono orgánico. (C.P. Leslie 1999)

2.3.4.2. Operación semicontinua

La alimentación y extracción de afluentes y efluentes del proceso se realizan de forma periódica, en dependencia del tiempo de retención fijado.

2.3.4.3. Operación continua

Las plantas continuas son cargadas y descargadas de forma continua. En este caso la mezcla debe ser fluida y uniforme. Son más apropiadas para viviendas en zonas rurales; la producción de gas es uniforme y es mayor que en las plantas discontinuas.

2.4. Vinazas en la digestión anaerobia

Las vinazas de las destilerías de alcohol poseen un alto valor de demanda química de oxígeno (DQO) y un bajo pH. Las cantidades de nitrógeno (N) y fósforo (P) deben ser tenidas en cuenta para el tratamiento anaerobio. La concentración de sulfatos en el residual predice que durante este tratamiento se producirá un gas combustible con altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno. (Obaya Abreu 2005)

La digestión anaerobia resulta siempre más eficiente cuando el mismo es complementado con nutrientes, aunque el efecto es más marcado a altos valores de carga y bajos tiempos de retención. El efecto del ajuste del pH de las vinazas a valores alrededor del neutro influye positivamente sobre la velocidad de remoción. Los residuales azucareros son muy biodegradables debido a que están compuestos fundamentalmente por azúcares.

La temperatura influyen considerablemente en la presencia de un grupo u otro de bacterias metanogénicas, predominando en el rango termofílico las metanobacterias hidrogenófilas y en el mesofílico las bacterias acetoclásticas.

Las disminuciones de la temperatura por períodos cortos de tiempo producen efectos rápidamente recuperables. Sin embargo, cuando estos períodos son muy largos, se produce una selección de una microflora a la nueva temperatura, que puede ser muy perjudicial para la estabilidad del sistema.

Las vinazas de destilería por su contenido de sales y nutrientes pueden ser tratadas por procesos anaerobios, porque sirven de sustrato a los grupos tróficos que componen los lodos y son capaces de transformarla en metano.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

Se exponen los materiales y métodos utilizados en el estudio experimental del tratamiento anaerobio de las vinazas. La experimentación se basa en la evaluación de las variables de operación del sistema a escala laboratorio, la planificación de los análisis que caracterizan su comportamiento y la metodología de medición del volumen obtenido de biogás. Se presentan las técnicas de análisis de laboratorio utilizadas. Se muestran los diagramas isométricos del reactor utilizado para aclimatar el lodo anaerobio y del reactor utilizado para las corridas experimentales; seguido del diagrama de Ishikawa.

Figura 5. Diagrama isométrico de reactores utilizados

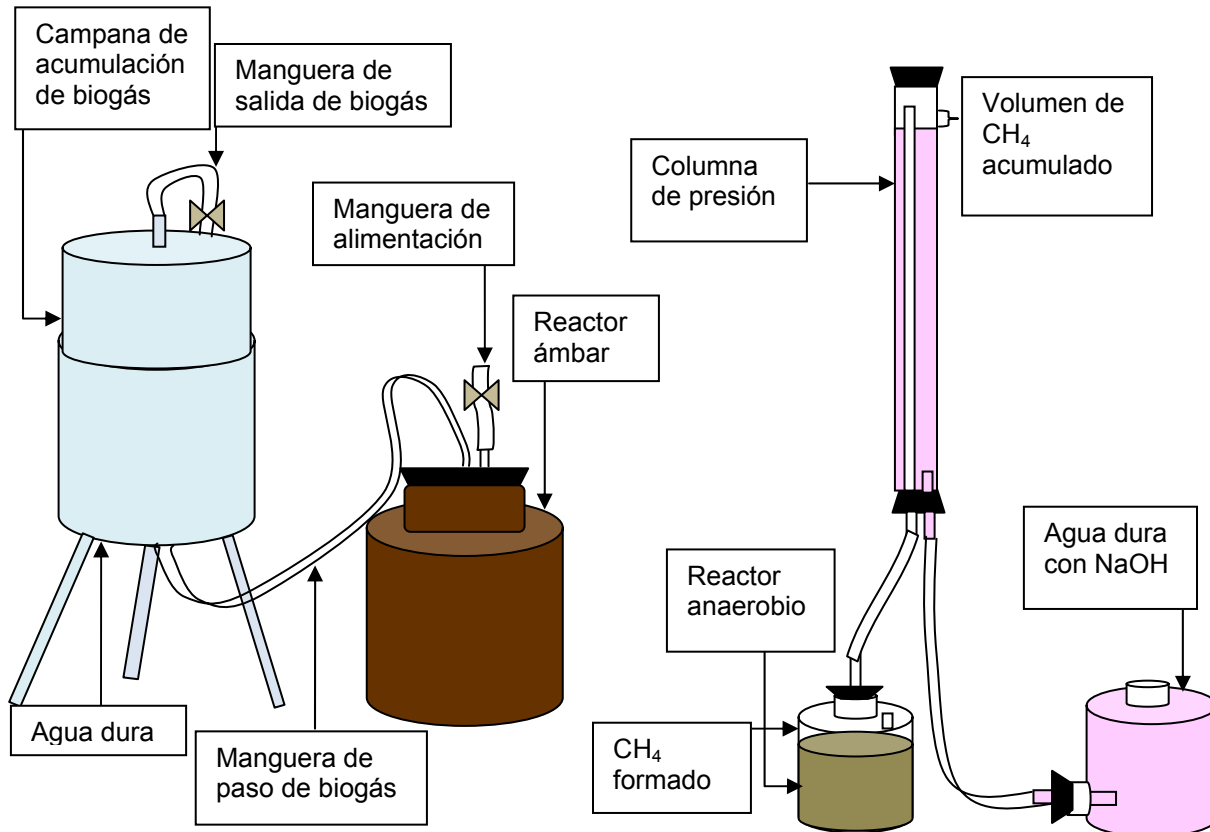
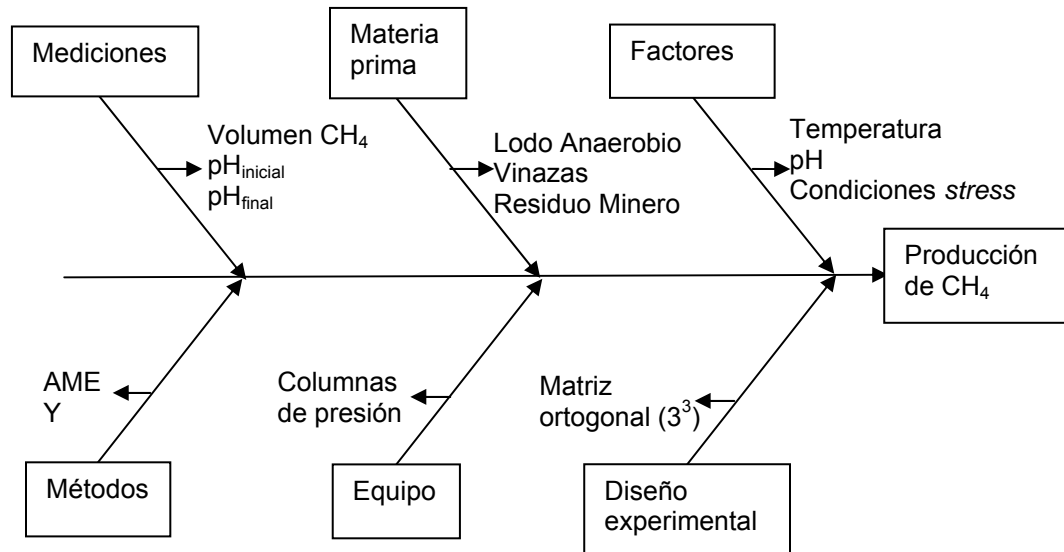


Figura 6. Diagrama de Ishikawa



3.1. Variables

- ✓ Variables controlables:
 - Residuo minero
 - Concentración de lodo
 - Temperatura de operación

- ✓ Variables respuesta:
 - Rendimiento de metano
 - Actividad Metanogénica Específica

El diseño experimental utilizado es una matriz ortogonal (3³) o diseño de Taguchi; del cual se eligieron 12 combinaciones para las experimentaciones realizadas, las cuales se presentan a en la Tabla IV.

Tabla IV. Variables controlables

Temperatura de operación (°C)	Concentración de lodo (DQO/SSV)	Residuo minero (mg)
28	0.25	0
28	0.25	5
28	0.25	10
28	0.37	0
28	0.37	5
28	0.37	10
28	0.50	0
28	0.50	5
28	0.50	10
31	0.25	0
31	0.25	5
31	0.25	10
31	0.37	0
31	0.37	5
31	0.37	10
31	0.50	0
31	0.50	5
31	0.50	10
34	0.25	0
34	0.25	5
34	0.25	10
34	0.37	0
34	0.37	5
34	0.37	10
34	0.50	0
34	0.50	5
34	0.50	10

3.2. Delimitación de campo de estudio

Estudio experimental del tratamiento anaerobio de las vinazas. Obtener datos de óptimas proporciones de residuo mineral - vinaza para maximizar la potencialidad de residuos minerales en el tratamiento de la industria azucarera. Residuo azucarero, lodos residuales, digestión anaerobia.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Centro de Ingeniería de Procesos (CIPRO), Facultad Ingeniería Química, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Ciudad de La Habana, Cuba.

3.4. Recursos materiales disponibles

- Inóculo proveniente de la planta de aguas residuales María del Carmen, Habana, Cuba.
- Vinazas provenientes del ICIDCA.

3.5. Equipo

- pH-metro utilizado, modelo pH 25. CRISON
- Analizador de Carbono Orgánico (SSM-5000)
- Horno mufla modelo CWF110
- Estufa.
- Baño María
- Desecadora
- Balanza analítica modelo CP 3245 SARTORIUS
- Reflujo abierto

3.6. Cristalería

- 12 Columnas de vidrio de 500 ml
- 12 botellas de vidrio con tapas de goma de 500 ml usadas como reactores por cada muestra lodo – vinaza – mineral.
- Beacker
- Balones
- Cápsulas de porcelana

3.7. Reactivos

CaCl ₂	Dicloruro de calcio
EDTA	Etilendiamino tetracetico
H ₃ BO ₃	Ácido brómico
KCl	Cloruro de potasio
KI	Yoduro de potasio
K ₂ Cr ₂ O ₇	Dicromato de potasio
KH ₂ PO ₄	Dihidrogeno fosfato de potasio
K ₂ HPO ₄	Hidrogeno difosfato de potasio
MgCl ₂ 6H ₂ O	Cloruro de magnesio hexahidratado
NaCl	Cloruro de sodio
NH ₄ Cl	Cloruro de amonio

3.8. Técnicas

Se montaron 6 variantes, las cuales a su vez se replicaron a dos temperaturas, empleando como materia prima vinaza, y como fuente de microorganismos lodo activado (inóculo); las variantes se presentan a continuación:

Tabla V. Variantes de reactores

Reactor	Inóculo	Vinaza	Nutrientes	Residual Minero (cola)
I	8 g/L	4 g/L	Macro y micro	0
II			Macro	5 mg
III				10 mg
IV	16 g/L		Macro y micro	0
V			Macro	5 mg
VI				10 mg

Se montaron 9 variantes, para determinar el máximo rendimiento de metano, según se muestra en la tabla VI.

Tabla VI. Variantes de reactores en porcentajes

Reactor	Inóculo	Vinaza	Nutrientes	Residual Minero (cola)
I	50%	4 g/L	Macro y micro	0
II			Macro	5 mg
III				10 mg
IV	70 %		Macro y micro	0
V			Macro	5 mg
VI				10 mg
VII	90 %	Macro y micro	0	
VIII		Macro	5 mg	
IX			10 mg	

Se agregó Hidróxido de Sodio (NaOH) al montar los reactores para ajustar el pH a un valor neutro, ya que la vinaza aporta un pH ácido, el cual causa un estado de *stress* al sistema y un cierto nivel de toxicidad a los microorganismos presentes en la actividad metanogénica, tal como se refirió en los antecedentes. En el primer mes de experimentaciones se realizaron varios montajes como estudio preliminar para delimitar las posibles variantes a emplear en la experimentación y proceder al montaje de las variantes mostradas en las tablas V y VI.

Los reactores montados son de operación por lote y sus dimensiones son las siguientes:

Tabla VII. Medidas geométricas de los reactores

Capacidad total del reactor	500 ml
Volumen efectivo	450 ml
Temperatura de operación	Mesofílica (21 – 36 °C)

Los nutrientes utilizados se emplearon en las siguientes cantidades:

Tabla VIII. Cantidad de nutrientes agregados

MACRONUTRIENTES			MICRONUTRIENTES (g)		
	(g/L)	(g)		(mg/L)	(g)
KH ₂ PO ₄	5	2.25	H ₃ BO ₃	50	0.0225
K ₂ HPO ₄	5	2.25	CaCl ₂	120	0.0540
NH ₄ Cl	5	2.25	MgCl ₂ 6H ₂ O	100	0.0450
NaCl	0.6	0.27	KI	30	0.0135
KCl	4	1.80	EDTA	1000	0.4500
			(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ 4H ₂ O	50	0.0225
			HCl (36%)	1 ml	0.45ml

La vinaza empleada se obtuvo del ICIDCA (Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar); su caracterización así como la de los lodos anaerobios usados me muestra en la Tabla IX.

Tabla IX. Caracterización de los lodos y vinaza utilizada

DQO_(Vinaza) (g/L)	SSV_(Lodo) (g/L)	Procedencia (Lodo)
50	55.45	PTAR M ^a . del Carmen
40	54.50	EDAR QUIBÚ

Los residuos sólidos mineros (colas) provienen de la Industria cubana de extracción de Níquel (Ni) y Cobalto (Co), y son empleados como un suministrador de micronutrientes esenciales al proceso de digestión anaerobia; su caracterización se muestra en la tabla X.

Tabla X. Caracterización del residual minero

Mineral	Concentración Replica 1 (%)	Concentración Replica 2 (%)	Concentración media (%)
MgO	8.0430	7.9780	8.0105
SiO ₂	12.8170	12.562	12.6895
Fe	43.225	43.041	43.1330
Co	0.0788	0.0785	0.0787
Ni	0.3850	0.3760	0.3805
Al ₂ O ₃	6.1380	6.2130	6.1755
Cr ₂ O ₃	3.1190	2.9400	3.0295
MnO	0.7400	0.7560	0.7480

3.8.1. Técnica cualitativa

Prueba de ignición.

3.8.2. Técnica cuantitativa

Los análisis realizados fueron los siguientes: (Colectivo CIPRO 2004)

- a. Potencial de hidrógeno (pH). Medido con un pH-metro digital.
- b. Carbono orgánico total (TOC).
- c. Sólidos. Se realizaron todos por desecación en la estufa e incineración en la mufla.
- d. Demanda química de oxígeno (g/L). Obtenido por valoración con sulfato ferroso amoniacal.

3.8.2.1. Potencial de hidrógeno

La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en los análisis de estos procesos. Es de vital importancia su control puesto que existen rangos de operación para el óptimo desarrollo de los microorganismos con los que se trabaja. Su medición más precisa se logra mediante el empleo de los pH-metros; los cuales son equipos digitales que dan un valor exacto en dependencia de la temperatura que presente el medio a evaluar.

Figura 7. pH-metro utilizado, modelo pH 25. CRISSON



3.8.2.2. Carbón orgánico total (COT)

El contenido de COT se determinó mediante el uso de un equipo analizador de carbono orgánico. Este se calibra con una muestra de concentración conocida, obteniéndose curvas de calibración a diferentes concentraciones que se guardan en su sistema. De acuerdo a estas curvas de calibración, se determina el carbono orgánico total.

Procedimiento:

Para el análisis se toma un determinado volumen de muestra, al cual se le evapora el agua en el baño maría y luego se eliminan los restos de humedad en la secadora durante dos horas. La medición de este volumen no se hace necesaria, ya que sólo se necesitan 200 mg de éste una vez procesado para el análisis.

Figura 8. Analizador de Carbono Orgánico (SSM-5000)



3.8.2.3. Sólidos

La determinación de sólidos suspendidos totales y volátiles es utilizada para evaluar el poder contaminante de los residuales. Con excepción de los gases, todos los demás constituyentes de un residual, si bien no pueden ser identificados, aparecen reflejados cuando se realiza la determinación de sólidos. Cuando se clasifican los sólidos, uno de los términos que se emplea es el de volátiles. Esta denominación de volatilidad es relativa, ya que esa determinación se realiza a 600°C. Otro elemento a destacar es que no se hace distinción entre suspensiones coloidales y soluciones verdaderas. A estos efectos, tanto los coloides como los sólidos disueltos se consideran dentro de la categoría de solubles.

Los sólidos totales (ST) y volátiles (SV) se determinan por diferencia de masa a través del procedimiento descrito en el Standard Methods (1992). La muestra es secada durante 3 horas en estufa a 105°C, posteriormente es enfriada en la desecadora para equilibrar la temperatura y mediante la diferencia de peso se determinan los ST. El residuo obtenido es transferido a la mufla, donde se incinera la muestra a una temperatura de 600°C, durante 1 hora. Transcurrido el tiempo fijado, se procede a su enfriamiento en la desecadora, para continuar con la pesada y determinación de los cálculos correspondientes.

Instrumental utilizado

Figura 9. Cápsulas de porcelana



Figura 10. Horno mufla modelo CWF110



Figura 11. Baño María



Figura 12. Desecadora



Figura 13. Estufa ECOCELL



Figura 14. Balanza analítica modelo CP 3245 SARTORIUS



3.8.2.4. Demanda química de oxígeno (DQO)

DQO es la medida de cuán contaminante puede ser el agua de desecho, en sentido de su carga orgánica. La Demanda Química de Oxígeno es la cantidad de oxígeno consumido en la oxidación de las sustancias reductoras presentes en un residual mediante el empleo de oxidantes químicos. El oxidante más usualmente utilizado es el dicromato de potasio en medio ácido.

Este ensayo consiste en oxidar la materia orgánica presente en la muestra mediante una mezcla hirviendo de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), la muestra es sometida a reflujo abierto en medio ácido y un exceso de $K_2Cr_2O_7$ conocido, realizando una digestión durante dos horas, donde el $K_2Cr_2O_7$ remanente no reducido se valora con una solución de sulfato de amonio de hierro (II) $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ para determinar la cantidad de $K_2Cr_2O_7$ consumido y la materia orgánica oxidada es calculada en términos de equivalente de oxígeno según el Standard Methods (1992).

Figura 15. Reflujo abierto



3.9. Recolección y ordenamiento de la Información

Las mediciones del volumen de gas producido en cada reactor se registran como el equivalente al volumen de líquido desplazado en probetas de medición adaptadas para tal efecto. Estas probetas funcionan como columnas de presión.

3.10. Análisis estadístico

Para la determinación de las condiciones óptimas y los modelos matemáticos asociados a los tratamientos aplicados se realizarán diseños de experimentos que serán procesados por el programa Statgraphics versión XV. (XV; Mayo Abad 2009)

Se aplicó un diseño factorial multinivel, con tres factores experimentales y dos variables respuesta para el cual se obtuvieron 12 corridas experimentales, las cuales se replicaron 2 veces. Los factores son residuo minero, temperatura de trabajo y relación DQO/SSV. En el caso de la relación DQO/SSV se cuenta con valores de 0.5 y 0.25, para el residual mineral valores de 0, 5 y 10 gramos para cada reactor y la temperatura se operó en dos valores: 28 y 36 °C. Se midió el metano producido para determinar como variables respuestas: Rendimiento de metano y Actividad Metanogénica Específica.

La obtención de los lodos, vinazas y mineral utilizados, así como los análisis se realizaron del 14 de Septiembre del 2009 al 19 de Febrero del 2010. Cada corrida tuvo una duración de 7 días durante los cuales se realizaron las mediciones de volumen a cada hora, desde las 8:00 AM hasta las 5:00 PM, a excepción de los sábados donde la medición se realizó hasta las 12:00 PM.

3.11.1. Ensayo de actividad metanogénica (TAM)

El TAM es una prueba que se utiliza para cuantificar la actividad metanogénica de lodos anaerobios, ya que permite:

- Evaluar el comportamiento de la biomasa en presencia de compuestos potencialmente tóxicos.
- Determinar la toxicidad relativa de compuestos químicos presentes en efluentes líquidos o residuos sólidos.
- Establecer el grado de digestión de los diferentes sustratos.
- Monitorear cambios en la actividad del lodo debido a una posible acumulación de materia inerte después de largos periodos de operación de los reactores.
- Evaluar parámetros cinéticos.

En este caso, el TAM se realiza para determinar la potencialidad en la producción de biogás, con diferentes cantidades de residual mineral en el reactor anaerobio bajo estudio. Se usaron soluciones de macro y micronutrientes para acelerar el proceso de digestión.

3.11.1.1. Procedimiento

Se realizaron diferentes corridas experimentales, cada una con 8 a 12 reactores donde se evaluaron diferentes relaciones de sustrato. El primer reactor, usado como reactor de control (blanco) se usó para medir la actividad microbiana del lodo usado como inóculo, la cual de ser apreciable, se le resta a la producción de biogás que tienen los demás reactores del TAM.

3.11.1.2. Puesta en marcha del T.A.M

Para la puesta en marcha de los reactores se utilizó como biomasa de inóculo, lodo activado (lodo fresco) proveniente de la plantas de tratamientos de aguas residuales cercanas al Campus. En la Figura 16 se muestra el montaje de los reactores.

Figura 16. Montaje de reactores



En la columna para la captación de biogás, se utilizó agua con hidróxido de sodio, para que éste reaccionara con el dióxido de carbono (gaseoso) formado y pasara a fase líquida y de esta forma cuantificar solamente el metano producido. Se utilizó el indicador de fenolftaleína. Para observar posible saturación de la columna líquida.

4. RESULTADOS

4.1. Proceso de partida del tratamiento anaerobio

Se expone todo lo relacionado al período experimental y se analizan los resultados obtenidos para cada fase de trabajo. Se definen los parámetros de operación para lograr una mayor efectividad del tratamiento y una mayor producción de biogás. Se obtuvo una detallada caracterización y evaluación del sistema, así como de sus variables de control. Estas pruebas se realizaron a través de los ensayos de actividad metanogénica con el fin de evaluar la potencialidad de producción de metano de las diferentes relaciones de residuo mineral así como de inóculo.

4.2. Variables respuestas

4.2.1. Rendimiento de metano (Y)

La variable respuesta rendimiento de metano, la cual se calcula según la siguiente expresión:

$$Y = \frac{V_{CH_4}}{SSV_i} \quad [mlCH_4 gSSV_i^{-1}] \quad \text{Ec. 4.1}$$

Esta variable definida como la cantidad de metano producido para una cantidad de sólidos suspendidos volátiles iniciales determinada, caracteriza la actividad metabólica de un ecosistema metanogénico. Puede ser utilizada para comparar las capacidades de cada reactor para producir metano bajo determinadas condiciones. De esta forma, indirectamente, es un indicador de la actividad celular en los agregados metanogénicos. Sus variaciones pueden ser tomadas como una respuesta al estrés fisiológico de la biomasa anaerobia.

Muchos han sido los parámetros empleados sobre los cuales se ha referido este rendimiento. La DQO_i y la DQO_e , el COT y los SSV han sido utilizados como referentes. Las variaciones son casi despreciables, así que se puede emplear uno u otro parámetro sin muchas diferencias y de cualquier forma tener una idea de la actividad del consorcio de bacterias anaerobias (Michaud 2005). Mientras más cerca se esté del valor teórico reportado, el proceso es más estable (en condiciones estacionarias), y todo el carbono podría ser utilizado por las bacterias para la respiración anaerobia, su crecimiento y desarrollo.

El principal objetivo, al tomar ésta como variable respuesta, es interpretar bajo cuáles condiciones, el sistema logra acercarse o no, al punto de máxima obtención de metano encontrado bajo el estudio de máxima potencialidad y que se corresponde con el valor de $32.78 \text{ mlCH}_4/\text{gSSV}_i$, para condiciones similares a las que se desarrolla la experimentación (ver epígrafe 4.3).

4.2.2. Actividad Metanogénica Específica (AME)

La variable respuesta Actividad Metanogénica Específica se calcula según la expresión:

$$AME = \frac{\Delta DQO_{CH_4}}{\Delta t * SSV_i} \quad [gDQO_{CH_4} gSSV^{-1} d^{-1}] \quad \text{Ec. 4.2}$$

El término $\Delta DQO_{CH_4} / \Delta t$ se calcula graficando el volumen de CH_4 acumulado vs. el tiempo y de este gráfico se toma la pendiente más pronunciada entre mediciones consecutivas. Luego se toma en cuenta un factor de conversión que, para las condiciones bajo estudio, se corresponde con los valores de 350 y 400 $mlCH_4 gDQO^{-1}$ según la temperatura de trabajo.

La AME es típica de los Ensayos de Actividad Metanogénica y la manera en la que se calcula para este tipo de prueba, fue la misma que se siguió para valorar cada uno de los reactores bajo estudio.

El objetivo es tratar de dilucidar bajo qué condiciones experimentales puede lograrse un alto valor de la AME, lo cual implicaría poder obtener mayor cantidad de metano por gramo de biomasa (microorganismos) añadidos al sistema en menor tiempo.

4.3. Prueba de máxima capacidad de rendimiento de metano

Para lograr determinar la capacidad máxima, bajo las condiciones de trabajo y utilizando los mismos sustratos e inóculos, se realizó un montaje experimental con relaciones de inoculación del 50, 70 y 90 %. Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla XI.

Tabla XI. Prueba de máxima capacidad de rendimiento de metano

Variables control					Variable respuesta	
T (°C)	Mineral (mg)	Lodo (%)	V _{CH4} 25°C,1atm (ml)	V _{CH4} 25°C,0.84atm (ml)	Y _{1atm} (mlCH ₄ /gSSV _i)	Y _{0.84atm} (mlCH ₄ /gSSV _i)
34	0	50	155	184	22.22	26.39
34	0	70	470	558	27.58	32.75
34	0	90	532	632	24.31	28.87
34	5	50	280	333	32.78	38.93
34	5	70	337	400	24.44	29.02
34	5	90	503	597	30.67	36.42
34	10	50	220	261	28.17	33.45
34	10	70	306	363	22.68	26.93
34	10	90	534	634	29.20	34.68

Como puede observarse, el máximo valor esperado para el rendimiento de metano, bajo las condiciones de trabajo, es de 32.78 mL CH₄/gSSV_i. Este valor se obtuvo cuando el sistema estaba inoculado al 50% y con 5 mg de mineral, trabajando en un valor de temperatura considerado óptimo para el intervalo mesofílico (34°C) (Menéndez, 2007).

Con estos resultados podemos establecer como condición de *stress*, trabajar en porcentos de inoculación por debajo del 50% (~30%, ~10%). De esta forma se trabajaría con menor capacidad de bacterias para degradar el sustrato.

4.4. Análisis de los resultados obtenidos

Tabla XII. Variables respuestas para el diseño experimental bajo condiciones de *stress*

Variables control								Variables respuesta		
T (°C)	DQO SSV	Mineral (mg)	V _{CH4} 25°C,1atm (ml)	V _{CH4} 25°C,0.84atm (ml)	pH _{inicial} (±0.15)	pH _{final}	ΔpH (±0.15)	Y _{1atm}	Y _{0.84atm}	AME (gDQO /gSSVd)
							(mICH ₄ /gSSV _i)			
28	0.25	0	107	127	7.15	6.76	0.39	14.88	17.67	0.0111
28	0.5	0	26	31	7.15	6.68	0.47	7.23	8.59	0.0044
28	0.25	5	81	96	7.15	6.78	0.37	11.26	13.37	0.0068
28	0.5	5	31	37	7.15	6.72	0.43	8.62	10.24	0.0033
28	0.25	10	95	113	7.15	6.79	0.36	13.21	15.69	0.0083
28	0.5	10	34	40	7.15	6.74	0.41	9.45	11.22	0.0083
36	0.25	0	136	162	7.15	6.56	0.59	18.91	22.46	0.0143
36	0.5	0	61	72	7.15	6.69	0.46	16.96	20.14	0.0173
36	0.25	5	133	158	7.15	6.7	0.45	18.49	21.96	0.0288
36	0.5	5	95	113	7.15	6.7	0.45	26.42	31.37	0.0231
36	0.25	10	128	152	7.15	7.26	-0.11	17.8	21.14	0.0361
36	0.5	10	82	97	7.15	7.29	-0.14	22.8	27.08	0.0294

Todos los datos que se presentan en la interpretación de resultados están a la presión de trabajo (1 atmósfera) y en las tablas XI y XII se muestran datos a presión 0.84 atmósferas por ser la presión de Guatemala.

4.4.1. Análisis estadístico de la Actividad Metanogénica Específica

Tabla XIII. Análisis de varianza para AME

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Mineral	0.0001531	1	0.0001531	11.56	0.0273
B:DQO/SSV	3.201E-05	1	3.201E-05	2.42	0.1950
C:Temperatura	0.0009505	1	0.0009505	71.76	0.0011
AA	1.126E-06	1	1.126E-06	0.09	0.7851
AB	1.125E-06	1	1.125E-06	0.08	0.7852
AC	0.0001344	1	0.0001344	10.15	0.0333
BC	5.33E-08	1	5.33E-08	0.00	0.9524
Error total	5.298E-05	4	1.324E-05		
Total (corr.)	0.0013254	11			

R-cuadrada = 96.0025 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 89.007 porciento

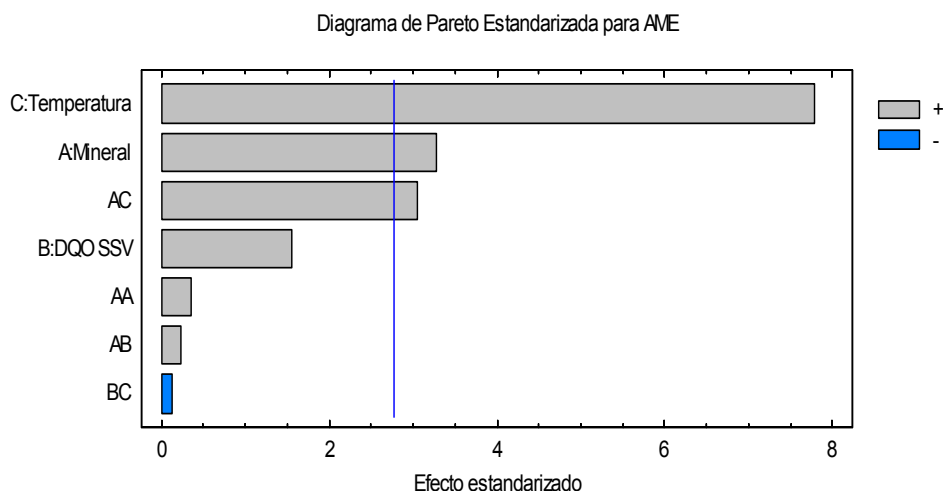
Error estándar del est. = 0.00363948

Error absoluto medio = 0.00188333

Estadístico Durbin-Watson = 2.51513 (P=0.2296)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0. 376534

Figura 17. Diagrama de Pareto estandarizado para AME



Como puede observarse en la Tabla XIII y en la Figura 17, para el caso de la Actividad Metanogénica Específica, tanto la temperatura, como la adición de mineral y la interacción de ambas variables, son significativas de forma positiva para el máximo de la AME. Su máximo valor (0.0361 gDQO/gSSVd) se encuentra cuando se adiciona 10mg de mineral y se trabaja a 36°C a razón de 0.25 gDQO/gSSV.

El gráfico de Pareto muestra que los factores Temperatura (C), Mineral (A) y la interacción AC de los mismos son significativos. Dichos efectos son significativos porque traspasan la línea vertical que representa el test del 95 de nivel de significación. Como se puede observar en la tabla XIII el Valor-P de los factores significativos son menores a 0.05 (5%) y la línea vertical de nivel de significancia es de 2.75.

4.4.2. Análisis estadístico del rendimiento de metano (Y)

Tabla XIV. Análisis de varianza para Y

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Mineral	3.4848	1	3.4848	0.44	0.5455
B:DQO SSV	0.785408	1	0.785408	0.1	0.7698
C:Temperatura	268.191	1	268.191	33.5	0.0044
AA	2.89815	1	2.89815	0.36	0.5798
AB	14.6882	1	14.6882	1.83	0.247
AC	2.18405	1	2.18405	0.27	0.629
BC	52.2084	1	52.2084	6.52	0.0631
Error total	32.0219	4	8.00548		
Total (corr.)	376.462	11			

R-cuadrada = 91.494 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 76.6084 porciento

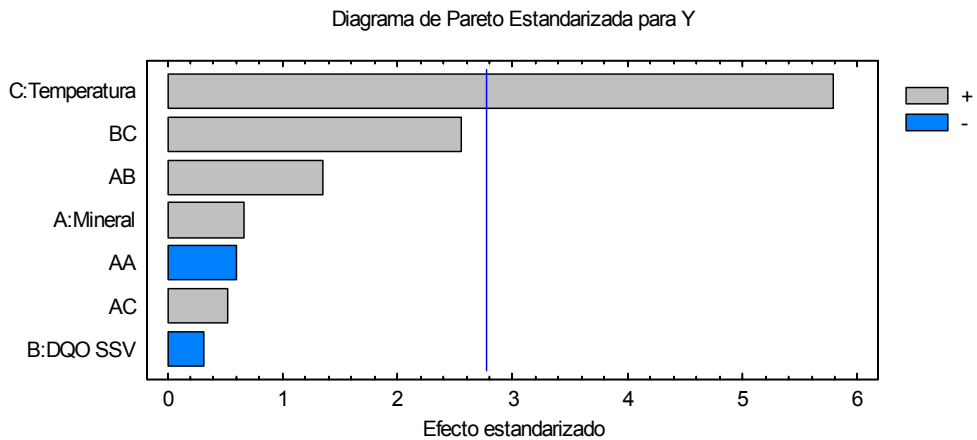
Error estándar del est. = 2.8294

Error absoluto medio = 1.25639

Estadístico Durbin-Watson = 3.1225 (P=0.6550)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0.606539

Figura 18. Diagrama de Pareto estandarizado para Y



En el caso del rendimiento de metano, según la Tabla XIV y la Figura 18, su valor es significativo sólo para la temperatura y de forma positiva influye la adición de minerales, pero sin tener peso en el resultado final. El máximo rendimiento de metano (26.42 mLCH₄/gSSV) puede encontrarse al trabajar a 36°C, con una razón de 0.5 gDQO/gSSV y adicionando 5 mg de mineral. Bajo estas condiciones de trabajo, el sistema logró alcanzar el 80.6% del rendimiento máximo posible. La línea vertical es de 2.79 según el test del 95 de nivel de significación (Valor-P).

No obstante estos resultados, puede encontrarse un punto donde se hace coincidentes los mejores valores, a la vez, de rendimiento de metano y de Actividad Metanogénica Específica:

Tabla XV. Punto coincidente de máxima AME y Y

Mineral (mg)	T (°C)	DQO/SSV	Y (mLCH ₄ /gSSV)	AME (gDQO/gSSVd)
10	36	0.5	22.80	0.0294

Como puede observarse, aún cuando el proceso, trabajando a la máxima carga que puede soportar un sistema en discontinuo (4gDQO/L) y con un mínimo de adición de lodos sin previa adaptación, es posible lograr que el sistema funcione sin cesar la producción de biogás, adicionando al sistema micronutrientes en forma de minerales, tal como ya se obtuvo en experiencias anteriores (Pereda Reyes 2007). La diferencia radicó en que esta vez, los mejores resultados apuntaron a una adición de 10mg de mineral, aún cuando el residual a tratar tiene algún contenido de micronutrientes en su composición, por lo que puede concluirse que es necesario prestar atención a la adición de micronutrientes esenciales para el buen desempeño de la digestión anaerobia.

CONCLUSIONES

1. La máxima capacidad de rendimiento de metano para un sistema discontinuo tratando vinazas y trabajando a 34°C con lodos anaerobios sin previa adaptación, es de 32.78 mlCH₄/gSSV_i a presión de 1 atmósfera.
2. Para el tipo de residual empleado (vinazas almacenadas y refrigeradas) y el inóculo utilizado sin previa adaptación, proveniente de plantas de depuración de aguas residuales albañales, el máximo rendimiento de metano es 26.42 mlCH₄/gDQO añadida (80.6% del rendimiento máximo posible) y la mayor Actividad Metanogénica Específica de 0.0361 gDQO/gSSV_d, a 1 atmósfera de presión.
3. La mayor producción de metano del proceso anaeróbico discontinuo en función del tiempo es 136 ml de metano a presión de trabajo.

RECOMENDACIONES

1. Aclimatar previamente el inóculo con el sustrato a utilizar para obtener mejores rendimientos de metano.
2. Continuar el estudio en sistemas continuos.
3. Es posible estimular el proceso mediante la adición de micronutrientes esenciales.

BIBLIOGRAFÍA

1. Bitton, G. (2005). Wastewater Microbiology. Florida, U.S.A.
2. C. P. Leslie, J. G. T. D. H. C. L. (1999). Biological Wastewater Treatment. New York, U.S.A.
3. Colectivo CIPRO (2004). Manual de Técnicas de Análisis de Aguas Residuales. La Habana, Cuba Centro de Ingeniería de Procesos (CIPRO), ISPJAE.
4. Chamorro Maldonado, M. (2008). Tratamiento anaerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. **Ingeniero Química:** 19-115.
5. Cheremisinoff Nicholas P., P. D. (1996). Biotechnology for waste and wastewater treatment. New Jersey, U.S.A.
6. Del Real O, J. P. G., F.; Otazo S, E. M. "Educación Ambiental." Memorias del X Congreso Nacional y IV Internacional de Ciencias Básicas 21(Cinética y modelado de un proceso de digestión anaerobia en el tratamiento de vinazas): 150.
7. Díaz Domínguez, Y. (2009). Empleo de pretratamiento básico para mejorar la digestión anaerobia de los residuales domésticos en la planta de biogás Sobacken, Suecia. La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. **Master en Ingeniería en Saneamiento Ambiental:** 1-69.
8. Díaz Rodríguez, Y. (2009). Diagnóstico operacional de la planta de biogás del vertedero calle 100. La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. **Ingeniera Química:** 8-68.
9. Fragas Chiu, M. (2002). Comportamiento de reactores anaerobios de lecho fluidizado utilizando zeolita natural como medio de soporte. La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. **Ingeniera Química.**

10. Mancilla Morales, M. (1998). Utilización de un biodigestor anaerobio para la reducción de demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas de desecho de una planta industrial alimenticia. Guatemala, Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. **Químico Biólogo**.
11. Martí Herrero, J. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. Bolivia, GTZ-Energía: 25-32.
12. Mayo Abad, O. (2009). Notas del curso de postgrado Estadística Aplicada.
13. Menéndez Gutiérrez, C. P. O., Jesús (2007). Procesos para el tratamiento biológico de aguas residuales industriales. La Habana, Cuba.
14. Michaud, S., Bernet, N., Buffière, P. y Delgenès, J.P. (2005). Use of the methane yield to indicate the metabolic behaviour of methanogenic biofilms.
15. Obaya Abreu, M. C. V. J., Esperanza (2005). "Mecanismos de desarrollo limpio en una planta de tratamiento de vinazas de azúcar con reactores UASB. Consideraciones técnicas y económicas sobre su aplicación." ICIDCA: 52-59.
16. Osuna, M. B., Iza, J., Zandvoort, M. y Lens, P.N.L. (2003). Essential metal depletion in an anaerobic reactor.
17. Pereda Reyes, I. (2007). Potencialidad de los residuos sólidos mineros como estimulantes del proceso de digestión anaerobia. Centro de estudio de tecnologías energéticas. La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. **Doctor en Ciencias Técnicas**: 15-49.
18. Rossi Machado, G. (2007). Vinaza: Características, usos y manejo. I Feria Energética. Ciudad de Guatemala: 3-26.
19. Speece, R. E. (1996). Trace metals. In: Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Nashville, TN.
20. XV, S. C. Derechos de autor © StatPoint, Inc. 1982-2007. Reservados todos los derechos.

APÉNDICE

Figura 19. Medición de altura de biogás producido en el reactor de climatización



Figura 20. Prueba de ignición en el reactor de climatización



Figura 21. Prueba de ignición en los reactores del TAM



Figura 22. Medición de altura de la columna colectora de biogás



Figura 23. Columna donde todo el NaOH reaccionó con el CO₂



Figura 24. Gráfico para lodo a 50% y 0mg de mineral a 34°C

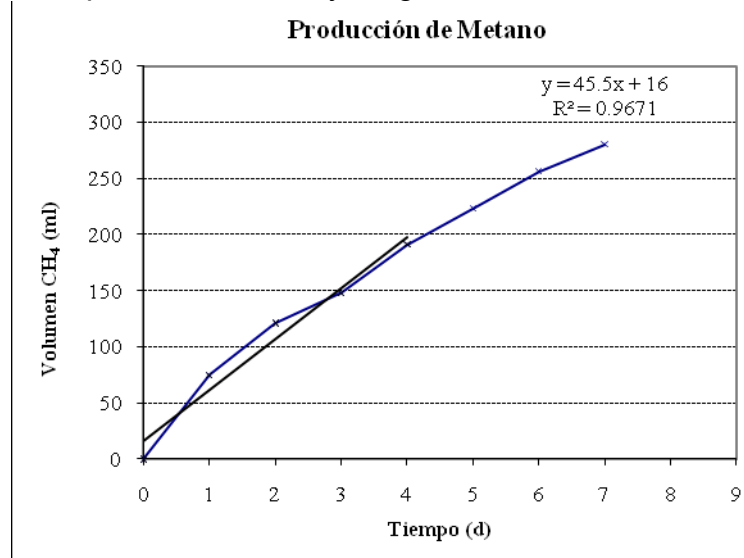


Figura 25. Gráfico para lodo a 50% y 5mg de mineral a 34°C

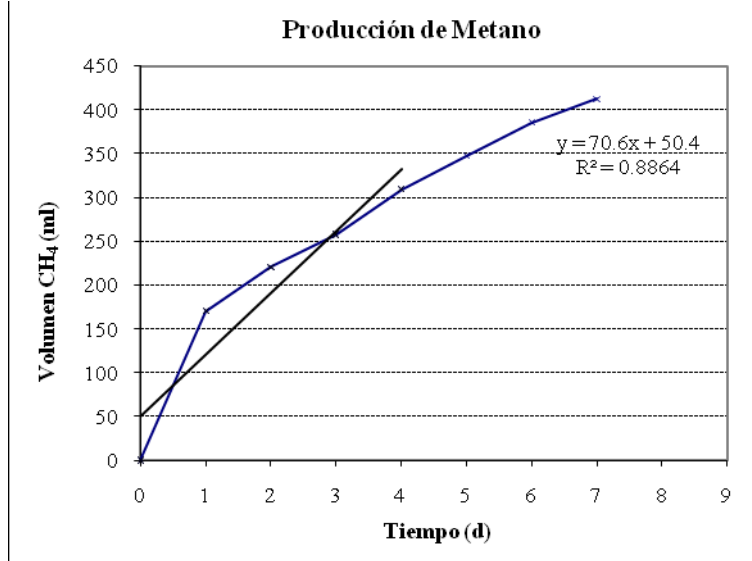


Figura 26. Gráfico para lodo a 50% y 10mg de mineral a 34°C

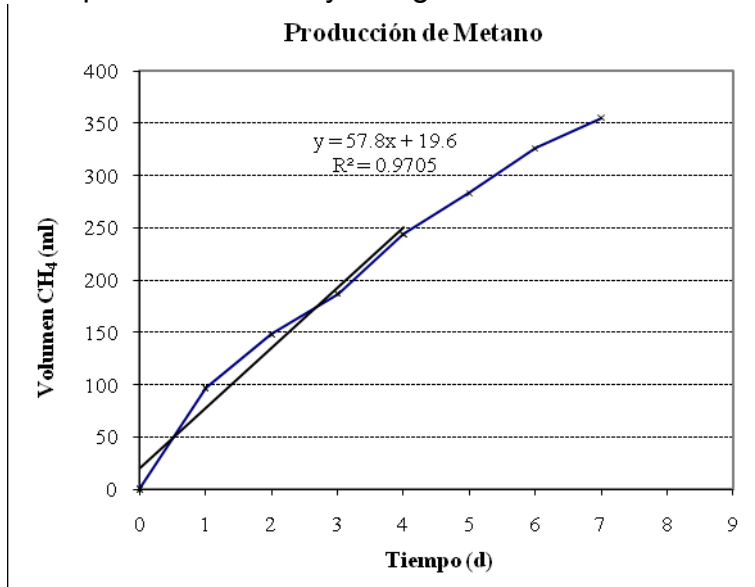


Figura 27. Gráfico para lodo a 70% y 0mg de mineral a 34°C

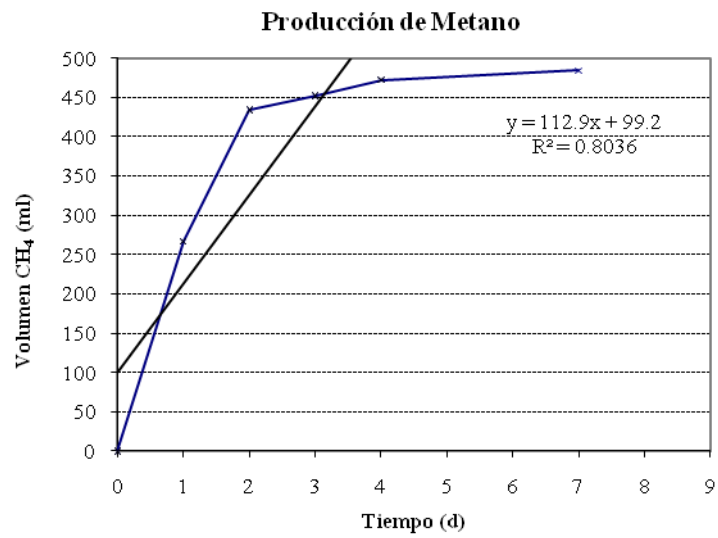


Figura 28. Gráfico para lodo a 70% y 5mg de mineral a 34°C

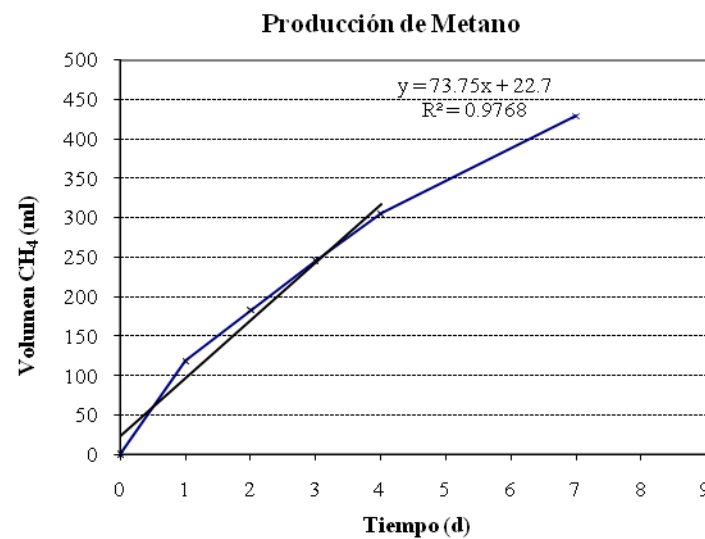


Figura 29. Gráfico para lodo a 70% y 10mg de mineral a 34°C

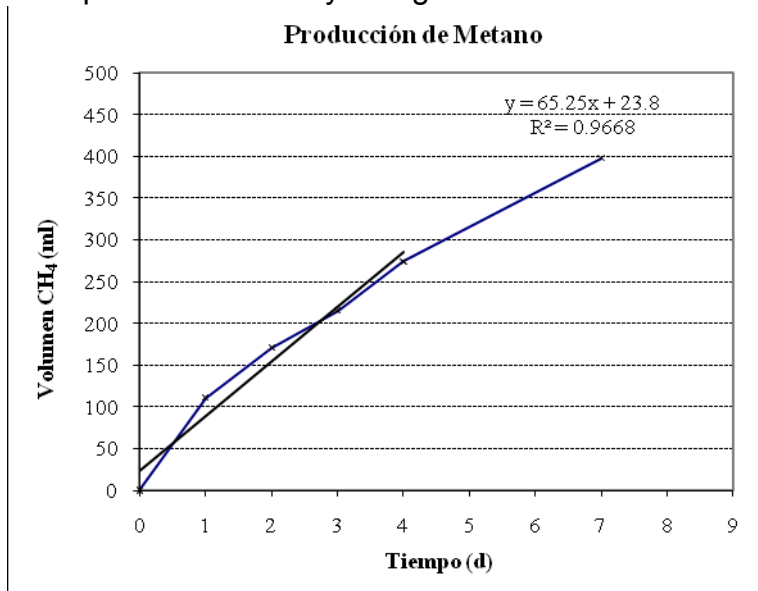


Figura 30. Gráfico para lodo a 90% y 0mg de mineral a 34°C

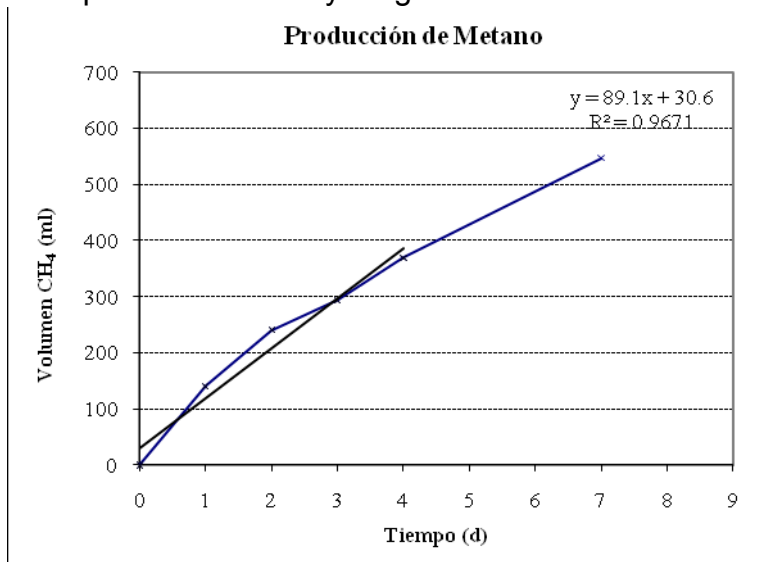


Figura 31. Gráfico para lodo a 90% y 5mg de mineral a 34°C

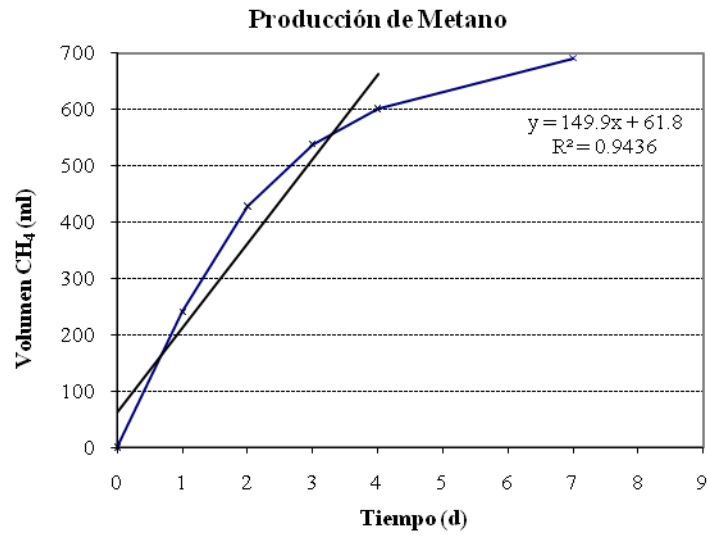


Figura 32. Gráfico para lodo a 90% y 10mg de mineral a 34°C

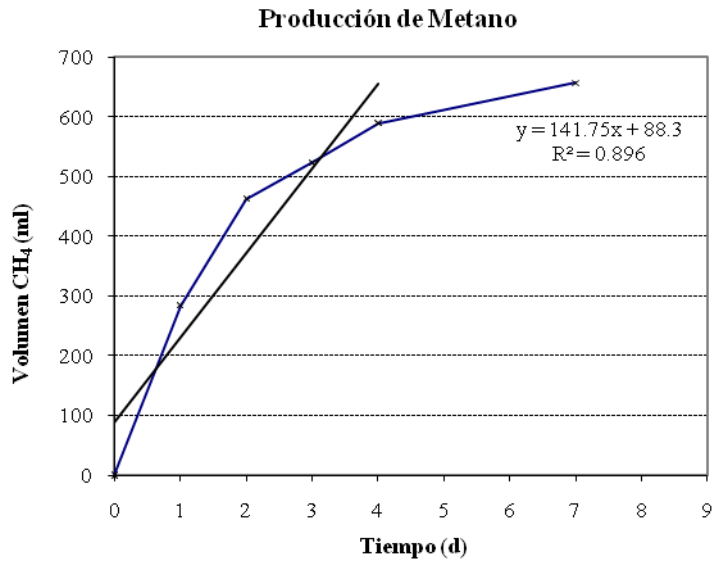


Figura 33. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.5 a 36°C

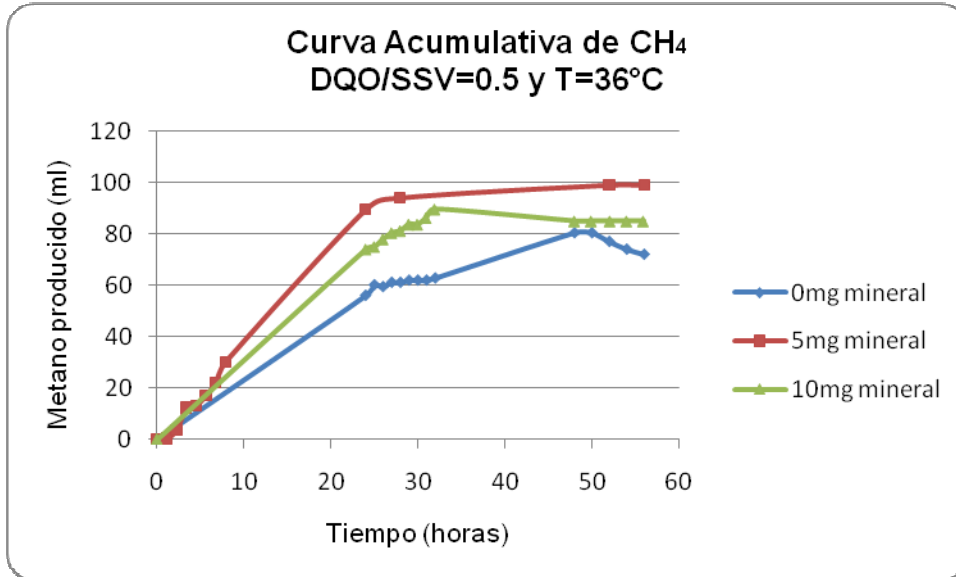


Figura 34. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.25 a 36°C

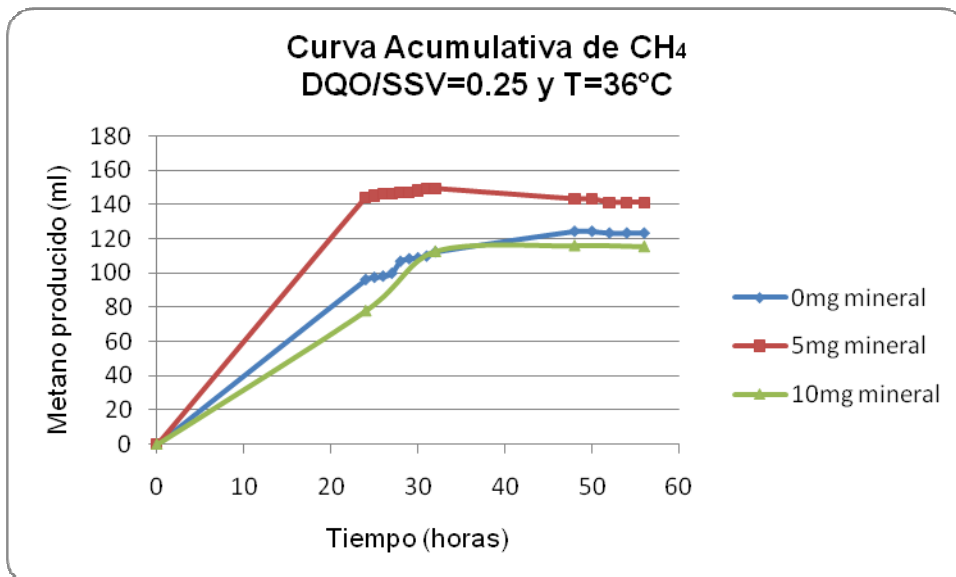


Figura 35. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.25 a 28°C

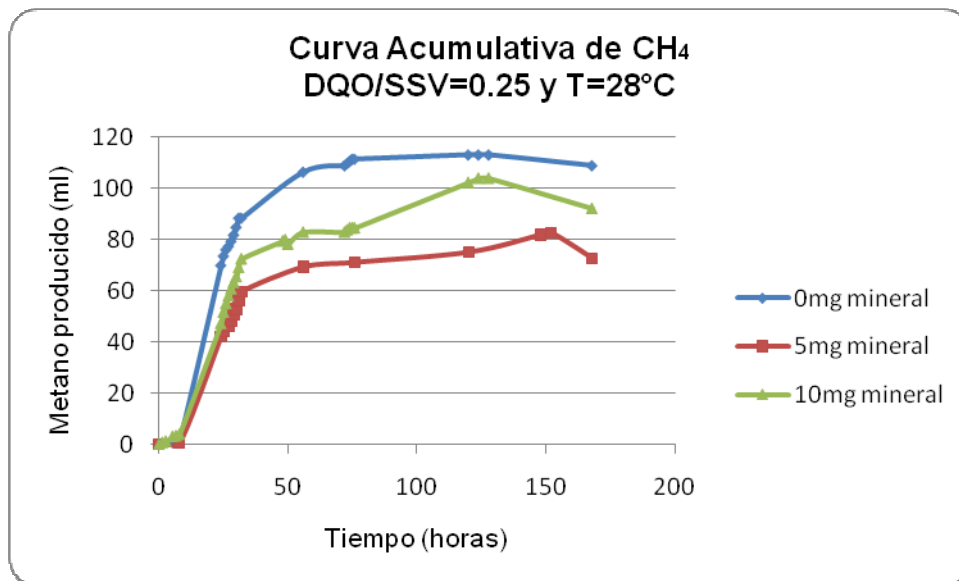


Figura 36. Acumulación de metano vs. tiempo para DQO/SSV=0.5 a 28°C

