



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA

BIOMETANIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO QUÍMICO

Presenta:

LORENA GABRIELA BERRELLEZA ROBLES

Hermosillo, Sonora

Octubre 2014

"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

CONTENIDO

	Página
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. OBJETIVO GENERAL	4
3.1 Objetivos Específicos	4
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
4.1 Residuos Sólidos	5
4.2 Clasificación de los Residuos	6
4.3 Problemática de los Residuos Sólidos Urbanos	7
4.4 Gestión Medioambiental de los RSU en Sonora	7
4.5 Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) y su Clasificación	8
4.5.1 Residuos de alimentos	9
4.5.2 Estiércol	9
4.5.3 Restos vegetales	9
4.5.4 Papel y cartón	9
4.5.5 Cuero	9
4.5.6 Plásticos	9
4.6 Tratamientos Biológicos de los Residuos Sólidos Orgánicos	10
4.6.1 Tratamiento aerobio: Compostaje	10
4.6.2 Tratamiento anaerobio: Biometanización	10
4.7. Digestión Anaerobia	12
4.7.1 Etapas de la digestión anaerobia	13
4.8 Antecedentes de la Biometanización	16

5. MATERIALES Y MÉTODOS	18
5.1 Metodología.....	18
5.2 Residuos Sólidos Orgánicos.....	19
5.2.1 Molienda de los RSO	19
5.2.2 Métodos de ensayo	20
5.3 Ensayos en Lote.....	20
5.3.1 Potencial bioquímico de metano	21
5.3.2 Ensayos de toxicidad de los RSO	22
5.3.3 Efecto de los niveles de inóculo en la producción de metano	22
5.3.4 Análisis de datos	22
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1 Caracterización de los Residuos Sólidos Orgánicos	24
6.2 Potencial Bioquímico de Metano	25
6.3 Ensayos de Toxicidad	29
6.4 Efecto de los Niveles de Inóculo en la Producción de Metano	31
7. CONCLUSIONES	34
8. ANEXOS	36
8.1 Métodos Analíticos.	36
8.1.1 Sólidos suspendidos (método gravimétrico- APHA/SM 2540).....	36
8.1.2 Determinación de metano (Almendariz, 2005)	37
8.1.3 Determinación de nitrógeno (NMX-AA-24-1984).....	37
8.1.4 Determinación de materia orgánica (NMX-AA-21-1985)	41
8.1.5 Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica (NMX-AA-68-1986).....	43
8.1.6 Determinación de la relación carbono/nitrógeno (NMX-AA-67-1985).....	44
8.1.7 Determinación de extracto etéreo (determinación de grasas) mediante la NMX-F-089-S-1978	45
8.1.8 Determinación de humedad (NMX-AA-016-1984).....	47
8.1.9 Factor de conversión de metano a DQOCH ₄	48
9. Bibliografía	50

LISTA DE TABLAS

4.1 Clasificación de los residuos sólidos.....	6
5.1. Métodos analíticos empleados para la caracterización de los RSO.	20
6.1. Caracterización físico química de los RSO del comedor universitario de la Universidad de Sonora.....	24

LISTA DE FIGURAS

	Página
4.1. Esquema de la digestión anaerobia (Massé y Droste, 2000).....	13
5.1. Metodología general.	18
5.2. Molienda de los Residuos Sólidos Orgánicos.....	19
5.3. Medición de metano por desplazamiento de NaOH al 3%.....	21
6.1. Evolución de la producción de metano a concentraciones crecientes de los RSO (gSVT).	26
6.2. Producción total de metano por gramos de SVT inicial de los RSO.	27
6.3. Cinética de primer orden de la AME a diferentes concentraciones de los RSO ($r_A=0.40d^{-1} [RSO]$) $R^2=0.997$	28
6.4. Efecto de la concentración de los RSO en la producción de metano de las bacterias metanogénicas acetoclásticas.	29
6.5. Ajuste del modelo de Haldane en la inhibición por sustrato de las bacterias acetoclásticas.....	31
6.6. Efecto de niveles de inóculo en la producción de metano de los residuos sólidos orgánicos.....	32
6.7. Efecto de los niveles de inoculo en la actividad metanogénica específica durante la producción de metano de los RSO.....	33

RESUMEN

Se conoce como residuo sólido a cualquier material que pierde utilidad tras haber cumplido con su misión o servido para realizar un determinado trabajo. En los últimos años se ha presentado un aumento exponencial de los residuos sólidos el cual propicia una serie de problemas ambientales, que hace necesario tratarlos para así reducir el impacto negativo hacia el medio ambiente. Una alternativa para el tratamiento y que a su vez pueden dar resultados positivos es la producción de metano por medio de una biometanización, dando como productos finales un gas, compuesto fundamentalmente por metano y dióxido de carbono, que puede utilizarse para términos energéticos, ya que de la composición de los residuos, se estima que alrededor del cincuenta por ciento proviene de origen orgánico. El objetivo de este trabajo consistió en evaluar la biometanización de residuos sólidos orgánicos (RSO). Para cumplir dicho objetivo se realizaron estudios fisicoquímicos para la caracterización de los RSO, posteriormente se efectuaron los estudios en lote para valorar la producción de metano. Los RSO presentaron un potencial bioquímico de metano de 579 mL/gSVT, lo que equivale a 80 m³ de metano por tonelada de RSO. Se observó que al aumentar la concentración de los Sólidos volátiles totales (SVT) aumenta la actividad metanogénica siguiendo una cinética de primer orden. La alta concentración de los RSO afectó la Actividad metanogénica específica (AME) de las bacterias metanogénicas. Por último la adición de biomasa anaerobia, mejoró la AME en un 90% con respecto a la prueba sin biomasa. En base a los resultados se concluye que los RSO presentaron un potencial bioquímico de metano viable para su utilización, como fuente de energía y que a su vez contribuye a la sustentabilidad ambiental. Se debe cuidar la carga orgánica utilizada para evitar inhibición por sustrato, así como utilizar una cantidad adecuada de inóculo para optimizar el proceso.

1. INTRODUCCIÓN

La problemática medioambiental a escala mundial se centra, actualmente, en dos importantes aspectos: el incremento de la emisión de gases que potencian el efecto invernadero provocando el denominado cambio climático y la generación exponencial de residuos.

El rápido crecimiento demográfico, el aumento de la población en los centros urbanos, la utilización de bienes materiales de rápido envejecimiento y el uso cada vez más generalizado de envases sin retorno, fabricados con materiales no degradables, son algunas de las principales causas de la generación de residuos. (Forster 2005).

El problema de la recolección y tratamiento de la basura se hace más grande a medida que las ciudades crecen y que la economía se industrializa. De 1950 al 2000, la población del mundo se duplicó, la producción agrícola se triplicó, el consumo de energía y la producción se cuadruplicaron, pero la generación de residuos se quintuplicó (Harris, 2006; Gandy, 1994).

Los residuos sólidos, comúnmente denominados basura, son generados de manera intrínseca en todas las acciones humanas, están compuestos por residuos orgánicos, papel, cartón, madera y en general materiales biodegradables e inorgánicos como vidrio, plástico metales material inerte.

De acuerdo con estudios realizados por INEGI, en el 2011, La recolección promedio diaria por habitante a nivel estatal en Sonora es menor a un kilogramo (0.852kg), mientras que en la ciudad de Hermosillo se generan 600 toneladas diarias de residuos sólidos y la recolección diaria por habitante es 0.76 kg.

Se estima para los próximos años esta cifra aumente considerablemente, por lo tanto es importante implementar nuevas alternativas para el manejo de los residuos sólidos urbanos.

En los últimos años ha habido un gran interés en la aplicación del proceso de digestión anaerobia para el procesamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSO), por la posibilidad de recuperar metano y por el hecho de que el material digerido es similar al compost producido aeróbicamente (Espinosa *et al.*, 2007).

2. JUSTIFICACIÓN

La problemática de los residuos sólidos urbanos en el municipio de la ciudad de Hermosillo es ostensible, es por ello que con el aprovechamiento de los mismos se reduciría en gran medida el impacto negativo hacia el medio ambiente; éstos residuos aunado con los demás desechos generados, con una eficiente gestión integral desde el inicio hasta la disposición final aumentaría en gran medida la sostenibilidad ambiental y con ellos podrían generarse beneficios en relación a costos-beneficios. Es necesario efectuar estudios con respecto al tema, ya que actualmente el municipio de Hermosillo no cuenta con un manejo eficiente de los residuos sólidos urbanos, hay poca investigación de ello con respecto al tratamiento.

En este estudio se utilizó la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, denominados “residuos sólidos orgánicos” con la finalidad de obtener biogás por vía anaerobia, ya que de acuerdo a SEMARNAT (2011) el 52.4% de los residuos generados en México proviene de origen orgánico, el cual hace importante su estudio con el fin de mejorar la sustentabilidad ambiental, y a su vez, ser una alternativa de energía renovable.

Éste trabajo contempló tres etapas experimentales, con el fin de comparar la mayor eficiencia de biogás en cada caso respectivamente, los cuales se detallan en las próximas páginas.

El aprovechamiento de biogás como una energía alternativa, hace necesario su estudio, así como su implementación para tiempos venideros.

3. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de biogás a partir de residuos sólidos orgánicos en sistema en lote.

3.1 Objetivos Específicos

- Evaluar el potencial bioquímico de metano de los residuos sólidos orgánicos.
- Determinar el efecto tóxico de los residuos sólidos orgánicos en las bacterias metanogénicas acetoclásticas.
- Valorar el efecto de los niveles de biomasa anaerobia en la producción de biogás durante la digestión anaerobia de los RSO.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Residuos Sólidos

Existen distintas definiciones con respecto a los residuos sólidos, el cual para su mejor comprensión se presentan algunos conceptos:

Residuo sólido es aquella sustancia u objeto generado por una actividad productiva o de consumo, de la que hay que desprenderse por no ser objeto de interés directo de la actividad principal (Elías, 2009).

Se define a residuo como cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó (LGEEPA, 2008).

Según (Tchobanoglous, 1994) los define como todos los residuos que provienen de las actividades animales y humanas, que normalmente son sólidos y que son desechados como inútiles o superflúos.

4.2 Clasificación de los Residuos

Se puede definir el residuo de acuerdo a la actividad que lo origine y al tipo de sector, en la Tabla 4.1 se muestra la clasificación de los residuos sólidos.

Tabla 4.1 Clasificación de los residuos sólidos.

Fuente	Instalaciones, actividades o localizaciones donde se generan	Tipo de residuos sólidos
Doméstica	Viviendas aisladas y bloques de baja, mediana y elevada altura, etc., unifamiliares y multifamiliares.	Residuos de comida, papel, cartón, plásticos, textiles, cuero, residuos de jardín, madera, vidrio, otros metales, cenizas, hojas en la calle, residuos especiales etc..
Comercial	Tiendas, restaurantes, mercados, edificios de hoteles, moteles, imprentas, gasolineras, talleres mecánicos, etc	Papel, cartón, plásticos, madera, residuos especiales, residuos peligrosos.
Institucional	Escuelas, hospitales, cárceles, centros gubernamentales.	(Como en comercial).
Construcción y demolición	Lugares nuevos de construcción, lugares de reparación/renovación de carreteras, derribos de edificios, pavimentos rotos.	Madera, acero, hormigón, suciedad, etc.
Servicios municipales (excluyendo plantas de tratamiento)	Limpieza de calles, paisajismo, limpieza de cuencas, parques y plazas, otras zonas de recreo.	Residuos especiales, basura, barraduras de la calle, recortes de árboles y plantas, residuos de cuencas. Residuos generales de parques, playas y zonas de recreo
Plantas de tratamiento: Municipales	Agua, aguas residuales y procesos de tratamiento industrial, etc.	Residuos de plantas de tratamiento, compuestos principalmente de fangos.
Residuos sólidos urbanos	Todos los citados.	Todos los citados.
Industrial	Construcción, fabricación ligera y pesada, refinerías, plantas químicas, centrales térmicas, demolición, etc.	Residuos de procesos industriales, materiales de chatarra, residuos no industriales incluyendo residuos de comida, basura, cenizas residuos de demolición y construcción, residuos especiales, residuos peligrosos.
Agrícolas	Cosechas de campo, árboles frutales, viñedos, ganadería intensiva, granjas, etc.	Residuos de comida, residuos agrícolas, basura, residuos peligrosos.

*Los residuos especiales aquí descritos se refieren a artículos voluminosos, electrodomésticos, bienes de línea blanca, residuos de jardín recogidos separadamente, baterías, pilas, aceite, neumáticos.

Fuente: (Tchobanoglous 1994).

4.3 Problemática de los Residuos Sólidos Urbanos

La transformación de la sociedad rural en urbana ha ocasionado un aumento considerable en la generación de residuos procedentes de la actividad doméstica, comercial, institucional, construcción y demolición, servicios municipales (limpieza de calles, parques y jardines), plantas de tratamiento, industrial y agricultura (Forster 2005).

Fenómenos ecológicos, tales como la contaminación del aire y agua han sido también atribuidos a la gestión inapropiada de los residuos sólidos, por ejemplo, el lixiviado de basureros y vertederos mal diseñados han contaminado las aguas superficiales y subterráneas (Tchobanoglous 1996).

Las repercusiones que los residuos sólidos urbanos provocan son considerables, causa el desperdicio de recursos, crea la necesidad de espacios para su deposición, así mismo, presentan riesgos sanitarios provocando enfermedades o lesiones. De manera igualmente importante se inicia una crisis de energía y encarecimiento de materias primas (Barradas, 1999).

La problemática que plantean los RSU como consecuencia de su incremento y las implicaciones sobre la contaminación ambiental y al agotamiento de los recursos naturales hace que sea esencial la búsqueda de caminos para su gestión correcta desde el punto de vista ambiental y social (Mandujano 2001).

4.4 Gestión Medioambiental de los RSU en Sonora

Gestión integral de residuos sólidos (GIRS) es una metodología donde se manipulan los residuos sólidos para su reducción, reciclado, transformación y vertido, así como el control sistemático y determinado de los elementos funcionales como su generación, manipulación, recolección, separación,

procesamiento y transformación, transferencia, transporte, vertido y recuperación de suelo postclausura del vertedero (Tchobanoglous,1994).

De acuerdo a los datos obtenidos de INEGI (INEGI 2010) el estado de Sonora cuenta con 2, 662,480 habitantes, 72 municipios de los cuales la gran mayoría conformado por poblaciones rurales. Un estudio reciente (INEGI 2013) señala que en todos los municipios del estado se cuenta con servicios de recolección y disposición final de los residuos sólidos urbanos, sin embargo, es importante señalar que en los 72 municipios no se da tratamiento alguno de los residuos.

En la entidad se recolectan en promedio 2,268 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos o desechos generados en las viviendas, parques, jardines y edificios públicos, principalmente, que representan 3% de la recolección nacional.

La problemática de la generación de residuos sólidos urbanos y su mal manejo propicia a una serie de afectaciones ambientales y de salud pública, el cual, el gobierno y las sociedades deben de atender el problema con responsabilidad para el bienestar de la población y de las siguientes generaciones.

4.5 Residuos Sólidos Orgánicos (RSO) y su Clasificación

Se define a los residuos sólidos orgánicos como aquellos residuos que provienen de restos de productos de origen orgánico, la mayoría de ellos son biodegradables (se descomponen naturalmente). Se pueden desintegrar o degradar rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica. Ejemplo: los restos de comida, frutas y verduras, carne, huevos, etcétera (Flores, 2001).

Los residuos sólidos orgánicos según su naturaleza de fuente se clasifican en:

4.5.1 Residuos de alimentos

Son restos de alimentos que provienen de diversas fuentes, entre ellas, restaurantes, comedores, Hogares y otros establecimientos de expendio de alimentos.

4.5.2 Estiércol

Son residuos fecales de animales (ganado) que se aprovechan para su transformación en bio-abono o para la generación de biogás.

4.5.3 Restos vegetales

Son residuos provenientes de podas o deshierbe de jardines, parques u otras áreas verdes; también se consideran algunos residuos de cocina que no han sido sometidos a procesos de cocción como legumbres, cascara de frutas, etc.

4.5.4 Papel y cartón

Son residuos con un gran potencial para su reciclaje pero no materia de desarrollo en este trabajo

4.5.5 Cuero

Son residuos mayormente derivados de artículos de cuero en desuso.

4.5.6 Plásticos

Son considerados como residuos de origen orgánico ya que se fabrican a partir de compuestos orgánicos como el etano (componente del gas natural), también son fabricados utilizando algunos derivados de petróleo (Jaramillo et al., 2008).

4.6 Tratamientos Biológicos de los Residuos Sólidos Orgánicos

El tratamiento biológico se enfoca en los residuos orgánicos, como los alimentos y los residuos de jardín. El seleccionar los residuos orgánicos tiene varios beneficios: convertir los residuos orgánicos en un producto útil; composta o biogás.

4.6.1 Tratamiento aerobio: Compostaje

El compostaje es un sistema de tratamiento o estabilización de los residuos orgánicos basados en una actividad microbiológica compleja llevada a cabo en condiciones aerobias y termófilas controladas con el que se obtiene un producto final estable, libre de patógenos y semillas, que puede ser utilizado como abono, enmienda o sustrato (Haug 1993). Durante el proceso se logra una transformación de la fracción orgánica más degradable del sustrato, liberándose CO₂, agua, minerales y energía y quedando finalmente la fracción orgánica más estable e higienizada (Labrador, 1996).

Las primeras plantas de composta producida a partir de residuos sólidos datan de los años 1925 a 1930 en la India y Holanda. Los países que más usan esta tecnología actualmente son España, Francia y Suecia. En México se han instalado aproximadamente 10 plantas industriales de composteo pero no han sido proyectos exitosos debido a problemas de mercado, debido a la falta de estudios técnicos orientados a determinar su viabilidad en la región de interés (Sedesol, 2001).

4.6.2 Tratamiento anaerobio: Biometanización

Otra opción para dar un tratamiento a los desperdicios sólidos y que a su vez pueden dar resultados positivos es la producción de metano por medio de una digestión anaerobia.

El término técnico biometanización hace referencia a la digestión anaerobia, es decir proceso de oxidación de la materia orgánica de los residuos, en ausencia de oxígeno atmosférico, dando como productos finales un gas, compuesto fundamentalmente por metano y dióxido de carbono (biogás con importante poder calorífico y, por lo tanto, susceptible de aprovechamiento energético), y un residuo con una menor concentración de sólidos volátiles u orgánicos, que puede utilizarse como mejorador de suelo. (Forster 2005).

El biogás es el producto de la degradación anaerobia de la materia orgánica presente en los desechos mediante la acción de un grupo de arqueos bacterias anaeróbicas estrictas (microorganismos metanógenos) que emplean generalmente el H_2 como donante de electrones en ausencia de oxígeno.

Los compuestos más importantes que constituyen al biogás, son el metano (CH_4), el dióxido de carbono (CO_2), el vapor de agua (H_2O) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S), representando éstos más del 99% del biogás. La composición de la mezcla es de manera general 65% metano y 35% dióxido de carbono. (Mata 2003).

De los gases que componen el biogás, el metano resulta ser el de mayor interés desde el punto de vista económico, debido a su utilidad como combustible, ya que el metano puede ser quemado para cocinar o para la iluminación de la casa. También se puede utilizar para motores de combustión de energía para accionar un motor o generar electricidad (Montalvo y Guerrero 2003).

Los factores cruciales en la producción de biogás en la digestión anaerobia son: las poblaciones microbianas (Díaz *et al.*, 2002), la composición química de los residuos, la humedad del residuo al interior del relleno, la temperatura, la presencia de compuestos inhibidores, la disponibilidad de nutrientes, etc. La humedad que contienen los residuos sólidos urbanos (RSU) es muy variable; Westlake (1995), afirma que la humedad típica de los RSO se encuentra entre 20-30% en ciudades en desarrollo y entre 40-50% en ciudades desarrolladas,

esta variación en el contenido de humedad se presenta principalmente por los estilos de vida de cada zona (Flores 2007).

4.7. Digestión Anaerobia

La fermentación o digestión anaerobia es un mecanismo de degradación de biomasa por el cual las moléculas orgánicas complejas son descompuestas en sus componentes energéticos individuales de forma espontánea (sin adición de energía) por la acción de microorganismos. El producto gaseoso de la fermentación se denomina biogás, y consiste fundamentalmente en una mezcla de metano y dióxido de carbono que puede destinarse a aplicaciones energéticas (Jarabo, 1999).

Los microorganismos que llevan a cabo estas etapas son: (1) bacterias fermentativas o acidogénicas, (2) bacterias acetogénicas o productoras de hidrogeno, (3) los metanógenos acetoclásticos y (4) los metanógenos reductores de CO₂ (Massé y Droste, 2000). En la Figura 4.1 se muestra el esquema de las diferentes fases de la digestión anaerobia y los microorganismos que intervienen en los diferentes procesos.

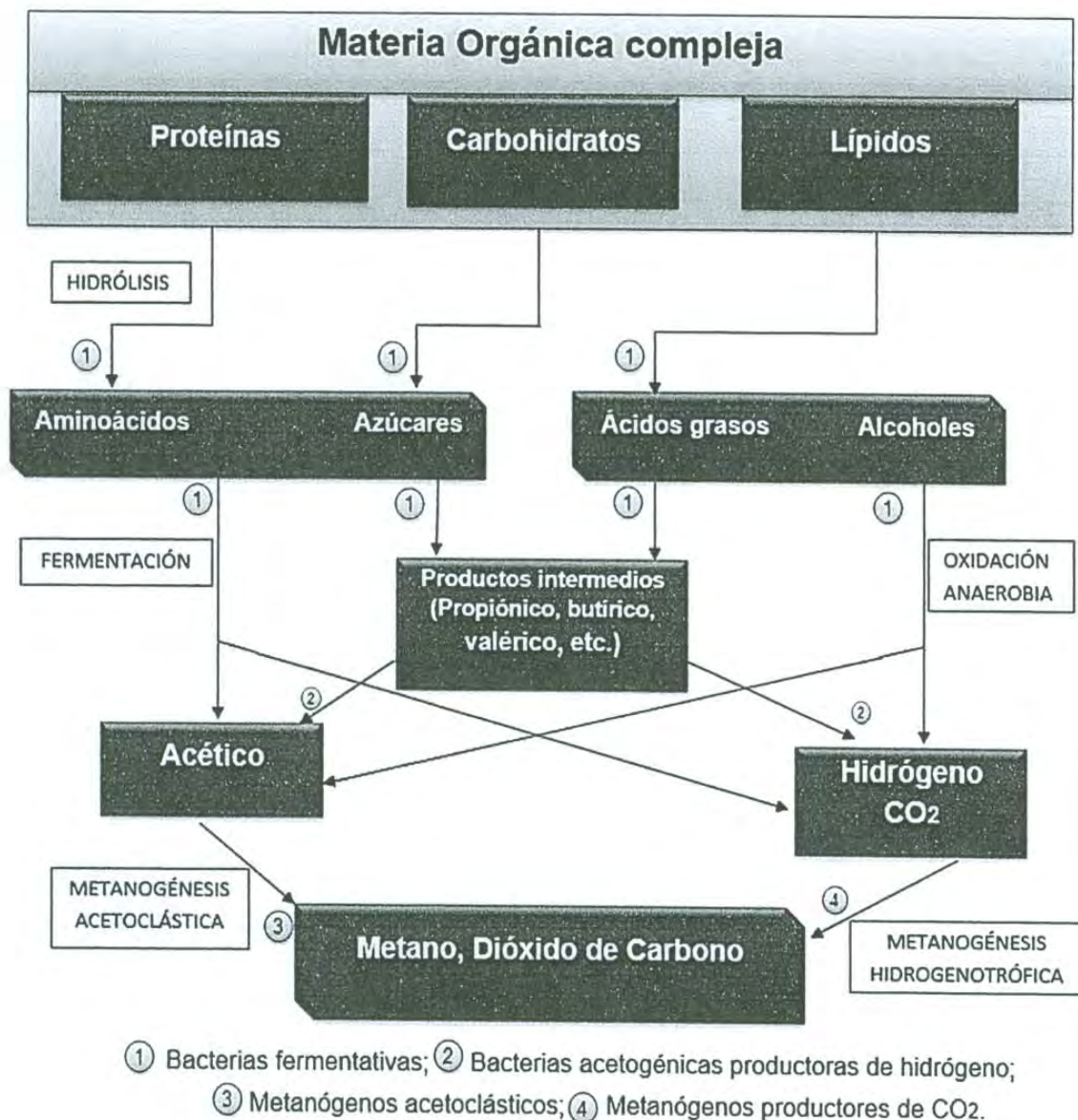


Figura 4.1. Esquema de la digestión anaerobia (Massé y Droste, 2000).

4.7.1 Etapas de la digestión anaerobia

a. Etapa Hidrolítica

Esta etapa consiste en el rompimiento enzimático de compuestos de alto peso molecular, como polímeros y lípidos, que pueden servir como fuente de energía y carbono a los microorganismos, al ser transformados en monosacáridos, ácidos grasos y aminoácidos, entre otros. La hidrolisis es considerada una

hidrógeno, para ser metabolizados por los organismos metanogénicos. Los procesos acetogénicos son energéticamente difíciles, por lo que necesitan ser ayudados por los organismos metanogénicos u otros organismos consumidores de hidrógeno (Stams, 1994).

Las bacterias acetógenas productoras obligadas de hidrógeno, transforman los ácidos grasos de cadena corta en acetato, CO₂ e H₂, pero se ven inhibidas por el H₂ que ellas mismas producen. Su característica distintiva es que mantienen estrecha relación con las bacterias metanógenas hidrogenófilas las cuales remueven el H₂ producido, de tal forma que su actividad no se ve inhibida. Esta relación sintrófica recibe el nombre de transferencia interespecie de hidrógeno (Saval y Noyola 1992).

d. Etapa metanogénica

Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores siendo además los que dan el nombre al proceso general de biometanización, fermentación del metano o metanogénesis. Las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de substratos monocarbonados con dos átomos de carbono unidos por una especie covalente: acetato, H₂, CO₂, formiato, metanol y algunas metilaminas (Madigal *et al.*, 1998).

Los metanógenos se dividen en *hidrogenotróficos*, que consumen hidrógeno y fórmico, y *acetoclásticos*, que consumen grupos metilo del acetato, metanol y algunas aminas (Cairó y París, 1988).

La metanogénesis es muy sensible a los cambios de pH y prefieren un ambiente neutro a levemente alcalino. Si se permite que el pH baje de 6.5, las bacterias metanogénicas tendrían pocas posibilidades de desarrollarse. La metanogénesis es la que controla el proceso de la digestión anaerobia porque las bacterias metanogénicas tienen una tasa de crecimiento mucho más lenta

que las bacterias en la acidogénesis, por lo tanto la cinética del proceso entero se puede describir por la cinética de metanogénesis (Cornwell y Davis 1998).

4.8 Antecedentes de la Biometanización

La digestión anaerobia se ha reconocido como una tecnología amigable con el medio ambiente para convertir residuos orgánicos sólidos y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en energía renovable (Li *et al.*, 2010), reduciendo así el uso de combustibles fósiles y por lo tanto reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero (Francese *et al.*, 2000).

Autores como Vázquez *et al.*, (1996) han implementado esta tecnología para los desechos orgánicos de los residuos sólidos urbanos en sistema en lote, se utilizaron frascos de suero de 2 litros de capacidad y se mantuvieron a 35°C por un periodo de 251 días. La carga orgánica utilizada fue de 25,75,92 y 160 gST/L, la adición de inóculo fue en dos proporciones diferentes (20% w/w en los tres reactores menos cargados y 50% w/w en el más cargado). El arranque de los reactores se dió en relación directa con la carga aplicada, la producción de metano fue mayor en el reactor con carga inferior ($0.06 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kgDQO}$) y en los otros reactores la producción fue media ($0.015 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kgDQO}$).

Flores (2001) utilizó la digestión anaerobia para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos orgánicos en régimen mesófilo a 40°C, y señala que las condiciones de temperatura son un factor fundamental para alcanzar rápidamente la etapa metanogénica de los digestores anaerobios, además reporta que se obtuvieron mejores resultados a esta temperatura tanto en producción de biogás como en el contenido de metano del mismo.

Por otro lado, los autores Gallardo *et al.*, (2013) realizaron ensayos de biodegradabilidad anaerobia a los rechazos de una planta de tratamiento de

compostaje de los residuos municipales, ya que el porcentaje de rechazos de la planta oscila entre 50-60%. Los reactores se mantuvieron en agitación durante 100 días a 35°C, se obtuvo un producción promedio de 62.5 L/kgSV de biogás, y una compsiación máxima de metano del 40% .

5. MATERIALES Y MÉTODOS

El equipo experimental fue ubicado en las instalaciones del laboratorio de Biorremediación del Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad de Sonora, edificio 5-C.

5.1 Metodología

En la Figura 5.1 se muestra el diagrama esquemático de la metodología que se siguió durante el desarrollo del proyecto.

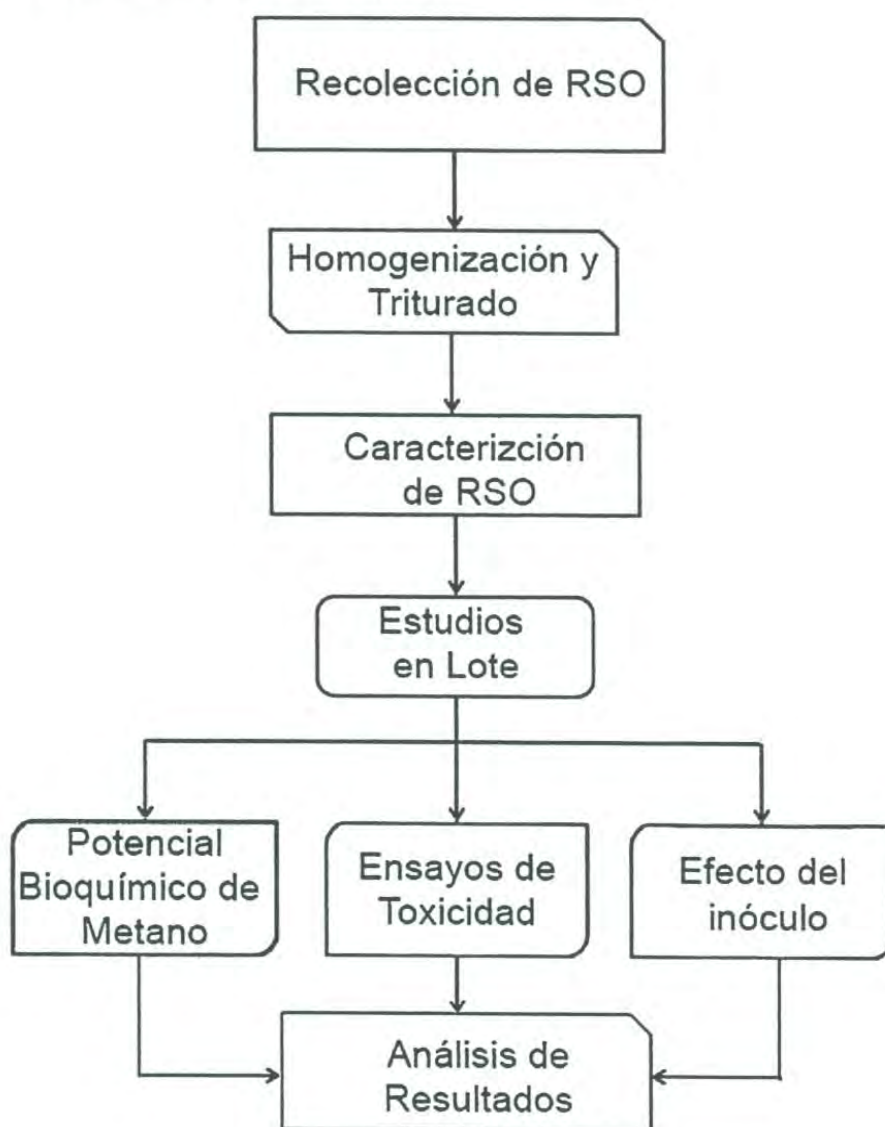


Figura 5.1. Metodología general.

5.2 Residuos Sólidos Orgánicos

La primera parte en la etapa experimental de este trabajo contempla la selección de los residuos orgánicos (RSO) procedentes del comedor universitario de la Universidad de Sonora. La composición de los residuos orgánicos se encontró muy variada de acuerdo al tipo de comida preparada en el día de la recolección. Se encontró gran cantidad de productos de origen vegetal, harinas, productos cárnicos (carnes y hueso).

5.2.1 Molienda de los RSO

Se obtuvo una muestra de aproximadamente 10 kg. (Figura 5.2). Posteriormente se realizó una trituration en condiciones húmedas utilizando un molino de carne convencional hasta obtener tamaño de partícula de 0.3 a 5 mm de diámetro. Después se realizó su caracterización físico-química de acuerdo a los métodos referidos en la Tabla 5.1 Los cuales se describen en el anexo 8.



Figura 5.2. Molienda de los Residuos Sólidos Orgánicos.

5.2.2 Métodos de ensayo

Se aplicaron métodos de ensayos de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana para residuos sólidos urbanos y por los métodos estándares (APHA 1995). En la Tabla 5.1 se muestran los distintos métodos analíticos utilizados para la caracterización físico-química de los residuos sólidos orgánicos.

Tabla 5.1. Métodos analíticos empleados para la caracterización de los RSO.

Parámetro	Método estándar
Sólidos Totales (ST)	Método Gravimétrico- APHA/SM 2540
Sólidos Fijos (SF)	Método Gravimétrico- APHA/SM 2540
Sólidos Volátiles Totales(SVT)	Método Gravimétrico- APHA/SM 2540
Grasas	NMX-F-089-S-1978
Humedad	NMX-AA-016-1984
Mat. Orgánica	NMX-AA-21-1985
PH	NMX-AA-25-1984
Hidrógeno	NMX-AA-68-1986
Nitrógeno total	NMX-AA-24-1984
Carbono	Golueke 1977
C/N	NMX-AA-67-1985

5.3 Ensayos en Lote

Con el objetivo de determinar la cantidad de materia orgánica que puede ser bioconvertida a metano; el efecto tóxico de los RSO sobre las bacterias acetoclásticas y la cantidad optima de biomasa para mejorar la producción del biogás, se llevaron a cabo los ensayos en lote.

Antes de ser agregados a las botellas los RSO en sus diferentes concentraciones fueron licuados por 5 minutos en una licuadora convencional. Los lodos anaerobios fueron obtenidos del digestor de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una industria cervecera.

5.3.1 Potencial bioquímico de metano

Los estudios se llevaron a cabo en botellas serológicas de capacidad de 160 mL con un volumen de operación de 120 mL, las pruebas se realizaron por triplicado. La relación de carga de los RSO aplicada a las botellas fue de 0.06, 0.12, 0.24, 0.6 y 1.2 gSVT respectivamente; Posteriormente las botellas se inocularon con lodo anaerobio a 0.24 gSSV, se taparon con tapones de caucho y arillos de aluminio. Con el fin de controlar el pH se adicionó bicarbonato de sodio (NaHCO_3) a una concentración de 5 g/L. La temperatura de incubación se efectuó en rango mesofílico (35°C), con agitación moderada de 50 rpm y el metano producido se midió por desplazamiento de una solución de NaOH al 3% en un sistema tipo Mariotte (Figura 5.3.1).

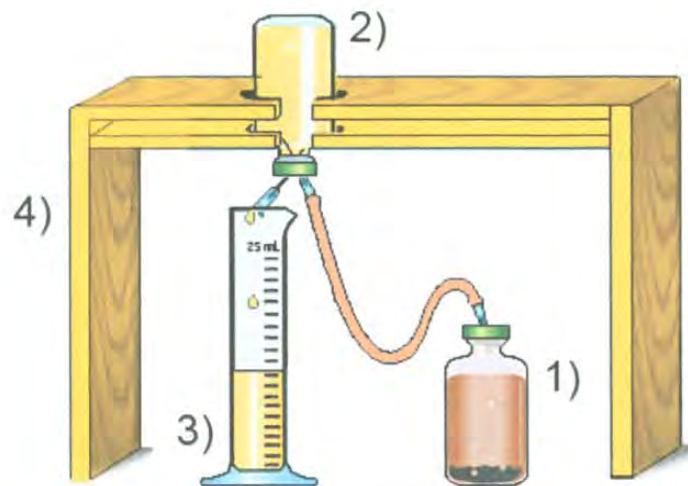


Figura 5.3. Medición de metano por desplazamiento de NaOH al 3%.
1) Botella serológica, 2) Botella serológica con solución de NaOH 3% 3) probeta para medir el NaOH desplazado, 4) Soporte. (Almendariz 2005; ZEEUW, 1987).

5.3.2 Ensayos de toxicidad de los RSO

Se llevaron con las mismas condiciones y concentraciones de RSO utilizados en los ensayos del BMP, sin embargo, en este caso se adicionó acetato de calcio en una concentración de 5 g/L a cada una de las botellas con el fin de activar las bacterias acetoclásticas y así observar el efecto de los posibles compuestos tóxicos contenidos en los residuos sobre éstos microorganismos.

5.3.3 Efecto de los niveles de inóculo en la producción de metano

El siguiente estudio cinético se realizó bajo los mismos parámetros de operación que los ensayos anteriores. En este caso se manejó una concentración de los RSO fija de 0.24 gSVT para todas las botellas y la concentración de los lodos anaerobios fue de 0, 1.66, 2.26 y 5.66 gSSV respectivamente. El biogás se monitoreó de la misma forma que los ensayos anteriores.

5.3.4 Análisis de datos

a. Actividad metanogénica específica de los RSO.

Es una medida experimental de la capacidad de la materia orgánica y del sustrato para generar metano (CH_4). En el cual, éste procedimiento indica la cantidad de CH_4 como demanda química de oxígeno (DQO) que se produce por unidad de biomasa por día, y que se expresa en $\text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV}\cdot\text{d}$ donde SSV representa la cantidad de gramos de sólidos suspendidos volátiles de la muestra a estudiar. El CH_4 producido se calcula por desplazamiento del líquido, en este caso, hidróxido de sodio (NaOH) (ZEEUW, 1987).

El volumen de gas producido con respecto al tiempo fue calculado tomando en cuenta la temperatura de la cinética y la presión atmosférica de la ciudad de Hermosillo, Sonora. La AME está descrita por la ecuación 5.1:

$$AME = \frac{m}{\frac{y_{CH_4}}{DQO} \cdot X} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

En donde:

$$\text{Pendiente} = m = \frac{L_{CH_4}}{d} \text{ (STP)}$$

$$\text{Biomasa} = X = \frac{g_{SSV}}{L}$$

$$\text{Conversión de Metano} = \frac{m}{\frac{y_{CH_4}}{DQO}} = 0.35 = \frac{L_{CH_4}}{g_{DQO}}$$

Desde el reactor biológico se conecta a una botella invertida que contiene una sustancia alcalina a base de NaOH al 5%, por medio de una manguera, la cual funciona como botella de Mariotte; esta botella está tapada con un tapón de caucho, tiene dos agujas hipodérmicas a una de las cuales se le conecta la manguera que transporta el biogás proveniente del reactor. Debido al alto valor de pH contenido de la botella, el CO₂ queda retenido en la sustancia alcalina, mientras que el metano no se disuelve, genera un desplazamiento del líquido, el cual representa el volumen de CH₄ contenido en el biogás (STERLING, 1989).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Caracterización de los Residuos Sólidos Orgánicos

Para la caracterización de los RSO utilizados en este trabajo se emplearon distintos métodos de análisis cuantitativos para determinar de manera más precisa la composición fisicoquímica de los mismos (Tabla 6.1). Los métodos utilizados se describen en el capítulo 8 de anexos.

Tabla 6.1. Caracterización físico química de la RSO del comedor universitario de la Universidad de Sonora.

Parámetro	Valores iniciales
Sólidos Totales (ST)	21.20%
Sólidos Fijos (SF)	3.53%
Sólidos Volátiles (SVT)	13.91%
Grasas	4.06%
Humedad	74%
Mat. Orgánica	23.35%
PH	5.15
Hidrógeno	1.55%
Nitrógeno total	3.68%
Carbono	9.7%
C/N	2.63

Se encontró un porcentaje de humedad de los residuos de un 74% y un porcentaje de sólidos totales de 21.20% en peso, estos valores son similares de acuerdo a los datos publicados por otros autores. Forster (2005) reportó un contenido de humedad del 69,0% y un porcentaje de sólidos totales del 31% en peso de los residuos orgánicos del comedor universitario de la Universidad de Cádiz, España, mientras que la materia orgánica se encontró en un porcentaje bajo de 23.35%, lo cual puede deberse a la heterogeneidad de los residuos del comedor de la Universidad de Sonora.

El alto contenido de humedad y de las fracciones orgánicas (SVT) del RSO lo hace susceptible para el tratamiento anaerobio, ya que la etapa de hidrolisis que generalmente es un paso limitante en la digestión anaerobia no inhibe el proceso por la alta cantidad de líquidos (Juanga 2005).

6.2 Potencial Bioquímico de Metano

La producción de biogás en las botellas serológicas fue medido por 30 días. La concentración de la RSO afectó la producción de metano. En la Figura 6.1 se observa que al incrementar la concentración de los SVT aumenta la producción de metano, logrando una producción máxima de 437 mL en la concentración de 1.2 gSVT a los 26 días. En las concentraciones de 0.6 y 1.2 gSVT se observó un aumento en la velocidad de producción de metano partir del día 15, posiblemente debido a una adaptación de las bacterias anaerobias a la alta concentración de materia orgánica o bien al crecimiento necesario de los microorganismos para lograr la degradación de altas concentraciones de materia orgánica (Speece, 1996).

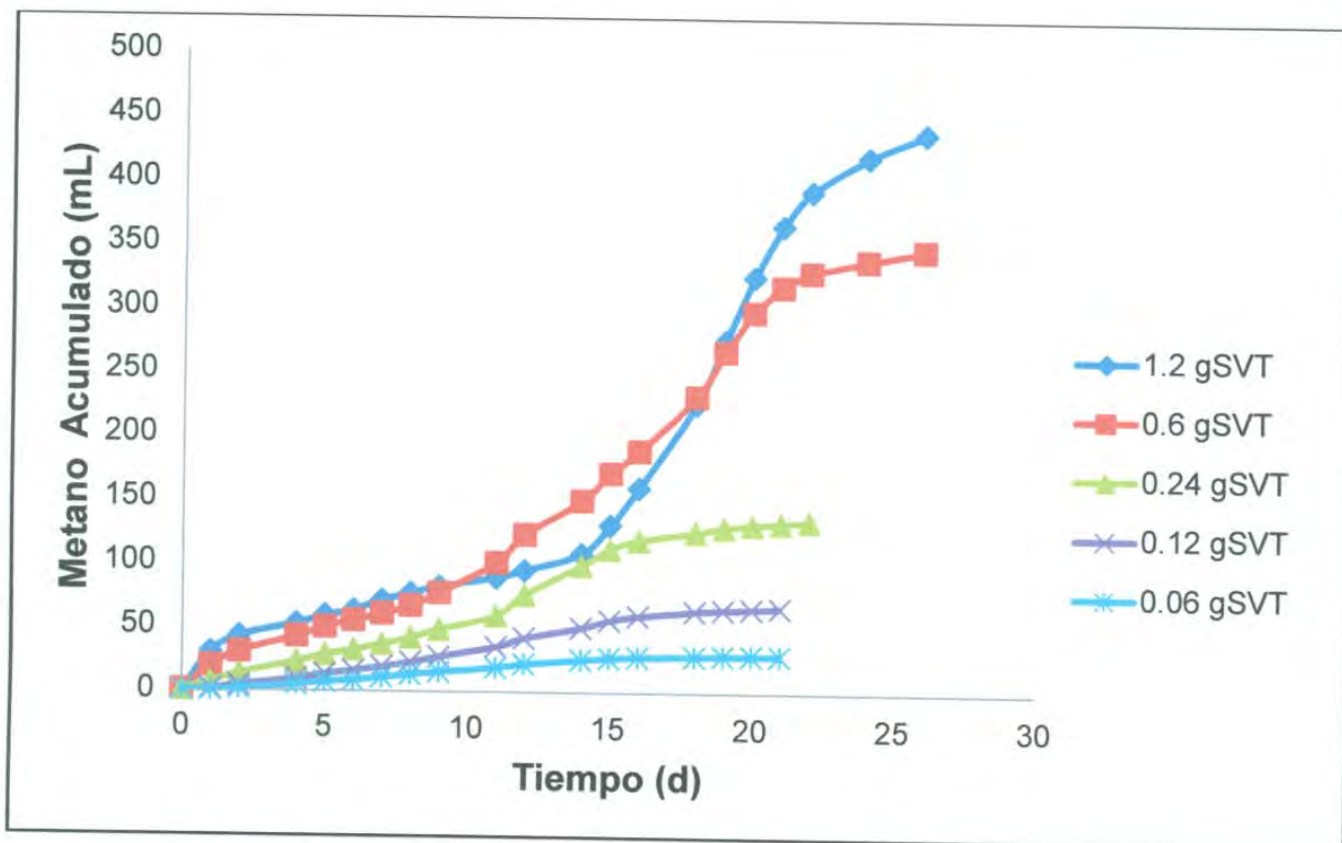


Figura 6.1. Evolución de la producción de metano a concentraciones crecientes de los RSO (gSVT).

En base a los volúmenes totales de metano producido en cada uno de los ensayos (Figura 6.2), en este estudio se produjeron 579 mL de metano por gramo de SVT inicial de los RSO. Tomando en cuenta el contenido de los SVT en los residuos orgánicos se obtuvo una producción total de 80m³ de metano por tonelada de RSO. Estos datos son superiores a los reportados por Thomas *et al.*, (2010) quienes reportaron una producción de 260 mL de metano por gramo de SVT así como 40 m³ de metano por tonelada de desechos de alimentos.

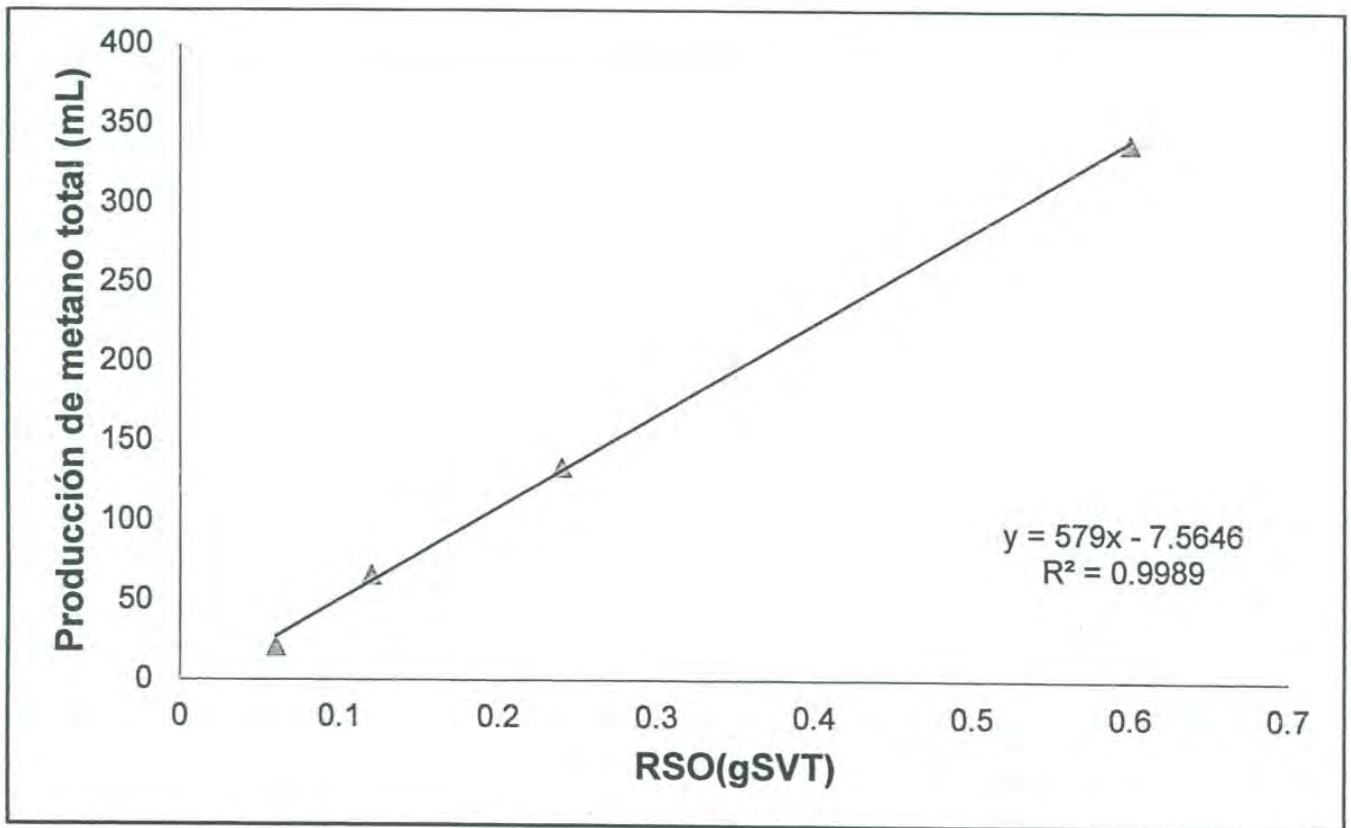


Figura 6.2. Producción total de metano por gramos de SVT inicial de los RSO.

En base a las tendencias de la producción de metano de la Figura 6.3, se determinaron las actividades metanogénicas específicas ($\text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV}\cdot\text{d}$) para cada una de las concentraciones probadas. En la Figura 6.3 se observa que al aumentar la concentración de los SVT aumenta la actividad metanogénica siguiendo una cinética de primer orden, el cual está descrito por la siguiente ecuación (Ecuación 6.1):

$$r_A = K(S)^n \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde r_A es la actividad metanogénica específica ($\text{gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV}\cdot\text{d}$), K es la constante de reacción (d^{-1}), S es la concentración del sustrato (gSVT) y n es el orden de reacción (adimensional). Para cinéticas de primer orden, el valor de n es igual a la unidad. En este caso, una línea recta con una pendiente igual a K y un intercepto en el eje "y" igual a cero expresa el efecto de la concentración de los RSO en la actividad metanogénica específica. La figura 6.3 ilustra la

influencia de la concentración de los RSO en la actividad metanogénica en donde la línea recta teórica obtenida con el intercepto igual a cero indica que un modelo de primer orden describe satisfactoriamente los datos experimentales. La pendiente obtenida, el cual representa el valor de la constante de reacción (K) fue de 0.40 d^{-1} con un ajuste de R^2 igual a 0.997. Este modelo de primer orden predice con precisión el comportamiento de la cinética del potencial bioquímico de metano, mostrando desviaciones inferiores al 5% entre los valores experimentales y teóricos de la AME. Los valores teóricos del modelo cinético fueron estimados mediante la herramienta solver en una hoja de cálculo de Excel.

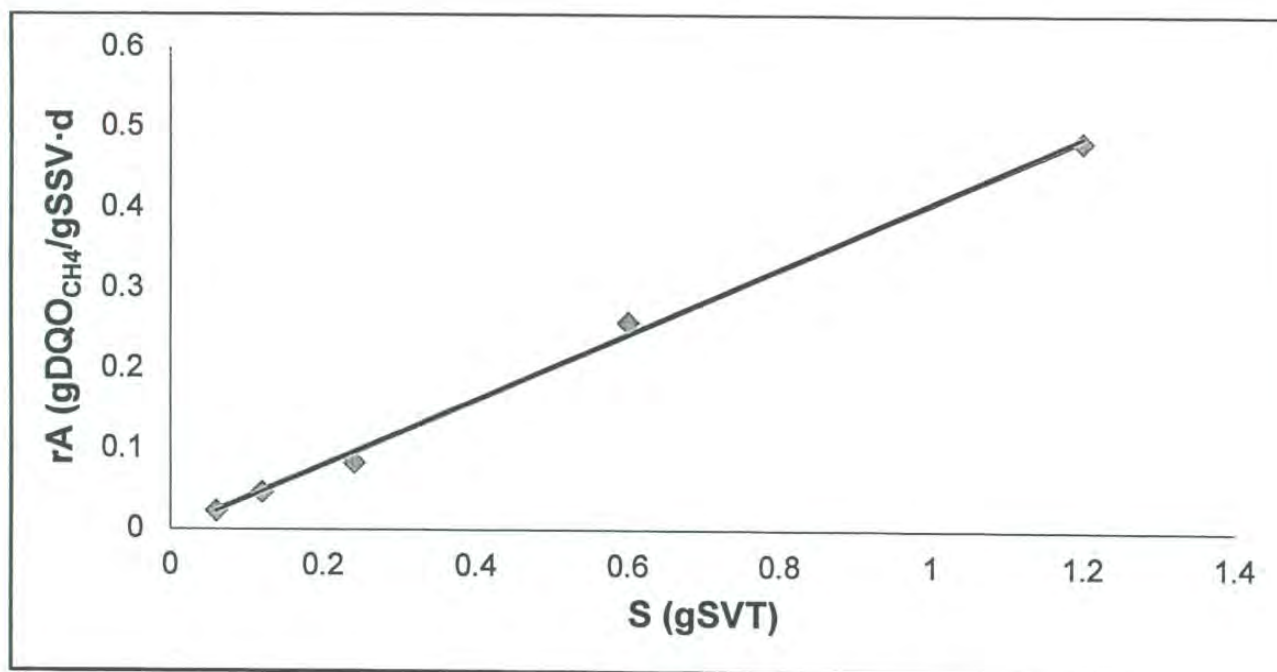


Figura 6.3. Cinética de primer orden de la AME a diferentes concentraciones de los RSO ($rA=0.40\text{d}^{-1}$ [RSO]) $R^2=0.997$.

6.3 Ensayos de Toxicidad

En la Figura 6.4 se muestra el efecto de la concentración de la RSO en la producción de metano de las bacterias metanogénicas acetoclásticas, en donde a bajas concentraciones (0.06 a 0.24 gSVT) se observó una fase de retardo de siete días, mientras que la fase exponencial comenzó a partir del día 10 con una producción de metano máxima de 300 mL en la concentración de 0.24 gSVT. Por otro lado, en altas concentraciones la fase exponencial empezó a partir del día 14, con producciones máximas de metano de 505 y 663 mL para 0.6 y 1.2 gSVT respectivamente.

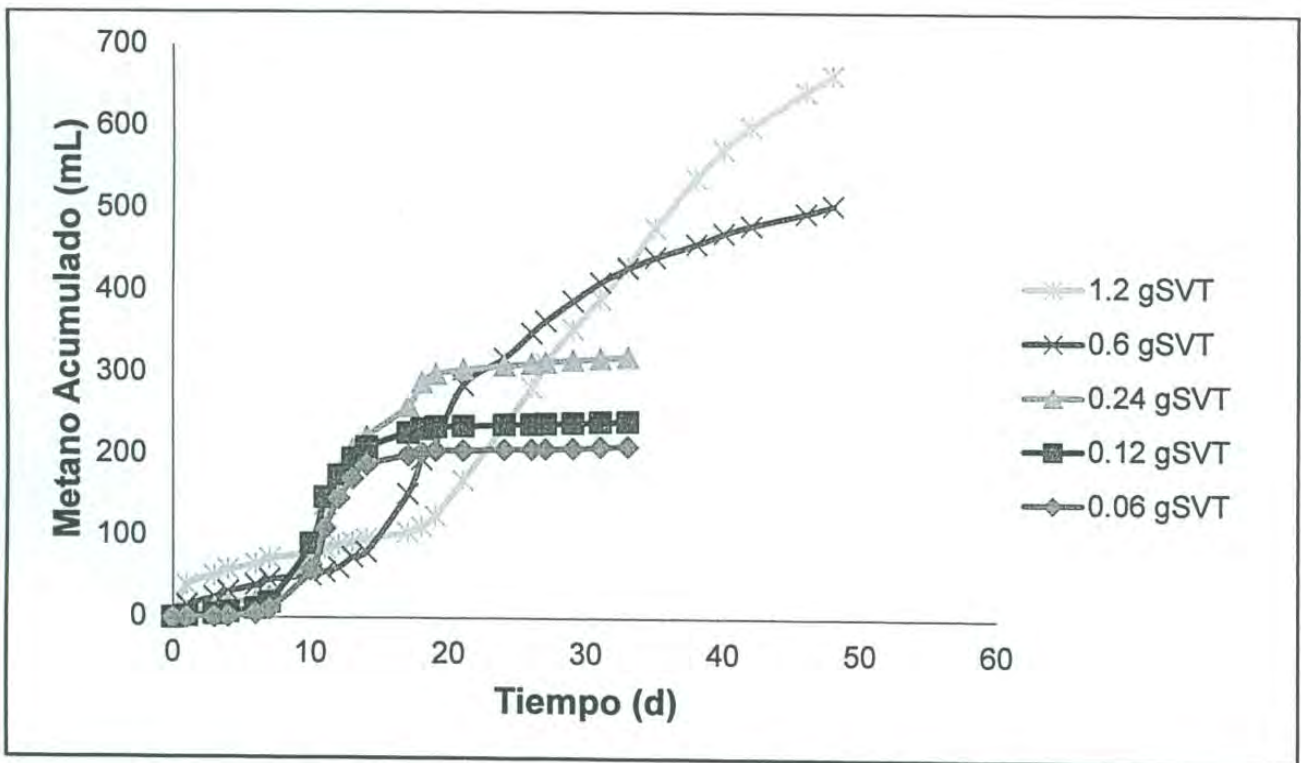


Figura 6.4. Efecto de la concentración de la RSO en la producción de metano de las bacterias metanogénicas acetoclásticas.

En base a las tendencias de la producción de metano de la Figura 6.5, se determinaron las actividades metanogénicas específicas para cada una de las concentraciones probadas. Las altas concentraciones de la RSO afectó la actividad de las bacterias metanogénicas acetoclásticas. A bajas concentraciones se observó un aumento gradual de la actividad metanogénica con las concentraciones de 0.06 a 0.24 gSVT con un máximo de 0.06 gDQO_{CH₄}/gSSV·d, mientras que a altas concentraciones la AME disminuyó un 56%. Los datos experimentales se ajustaron al modelo del Haldane (Ecuación 6.2) el cual es uno de los más utilizados en pruebas de inhibición por sustrato (Rigo *et al.*, 2010), de acuerdo al modelo se obtuvo una μ_{max} de 0.097d⁻¹, K_s de 0.021 g/L y una K_i de 0.46 g/L. La constante de inhibición representa la concentración de sustrato en donde la μ (AME) es igual a la parte media de la μ_{max} (AME_{max}) en ausencia del inhibidor (Rigo *et al.*, 2010). Los valores teóricos del modelo de Haldane fueron estimados mediante la herramienta solver en una hoja de cálculo de Excel.

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{S}{K_s + K_i \cdot S^2} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde:

μ = Velocidad específica de crecimiento (AME)

μ_{max} =Velocidad máxima de actividad

S= Sustrato RSO (gSVT)

k_i= Constante de inhibición del sustrato

K_s=Concentración de sustrato, donde $\mu = \mu_{max}$

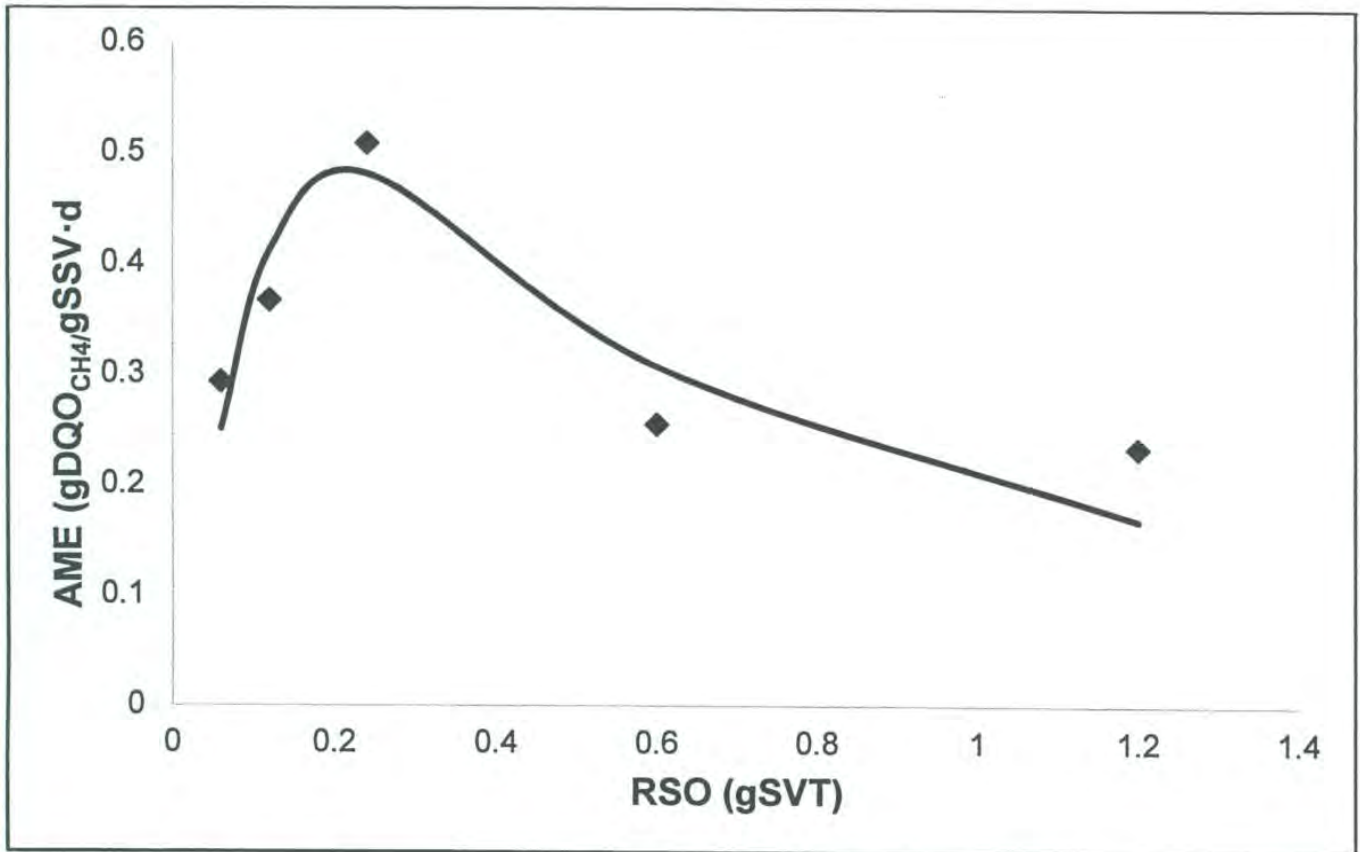


Figura 6.5. Ajuste del modelo de Haldane en la inhibición por sustrato de las bacterias acetoclásticas.

6.4 Efecto de los niveles de inóculo en la producción de Metano

En la Figura 6.6 se observa el efecto de la adición de biomasa sobre la producción de metano de los residuos orgánicos. La cantidad de materia orgánica utilizada para cada ensayo fue de 0.24 gSVT. Mientras que la cantidad de inóculo se varió de 0 a 5.66 gSSV. La producción de metano incrementó con el aumento de los niveles de biomasa. Sin biomasa, se observó una baja producción de metano de 11 mL a los 24 días, mientras que en niveles superiores (1.66 a 5.66 gSSV) se presentó un aumento en la producción de metano logrando una producción máxima de 134 mL en el día 24.

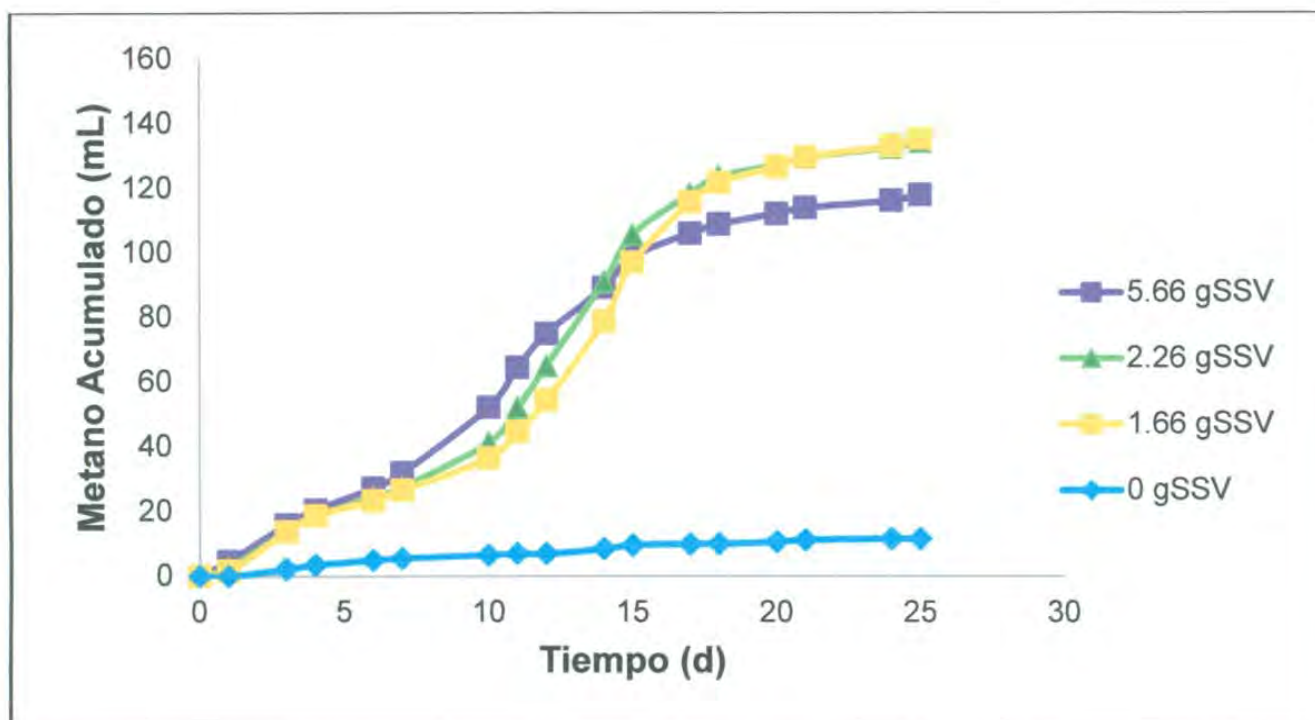


Figura 6.6. Efecto de niveles de inóculo en la producción de metano de los residuos sólidos orgánicos.

En base a las tendencias de la producción de metano de la Figura 6.7, se determinaron las actividades metanogénicas específicas para cada una de las concentraciones probadas con el objetivo de observar el efecto de los niveles de inóculo en las actividades. Sin adición del inóculo la AME fue casi nula con un valor de $0.072 \text{ gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV}\cdot\text{d}$, y se incrementó a 0.67 al aumentar el nivel de biomasa a 1.13 gSSV/L , posteriormente la actividad se estabilizó en $0.76 \text{ gDQO}_{\text{CH}_4}/\text{gSSV}\cdot\text{d}$, en los subsecuentes niveles probados, por lo tanto, es recomendable trabajar con niveles de biomasa alrededor de 1.5 gSSV/L . Gómez y Goma, (1986) observaron este efecto en la velocidad de la producción de ácido láctico al aumentar los niveles del inóculo.

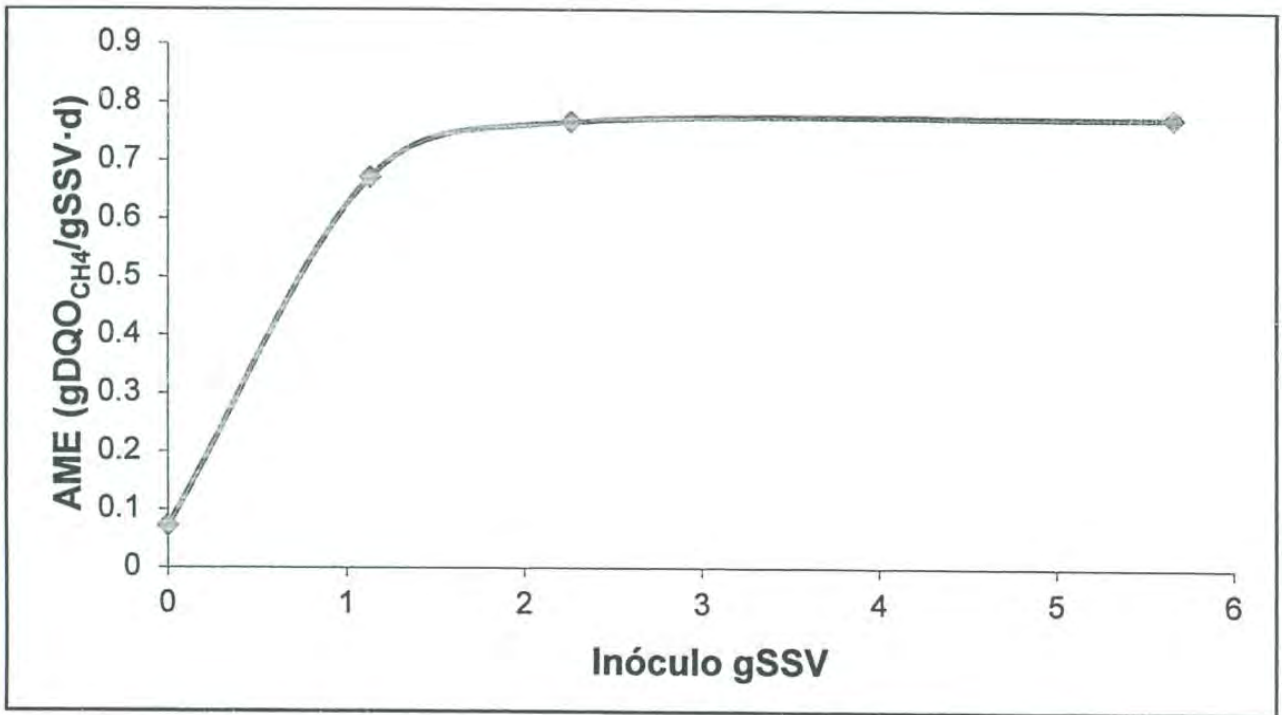


Figura 6.7. Efecto de los niveles de inóculo en la actividad metanogénica específica durante la producción de metano de los RSO.

7. CONCLUSIONES

La composición de los residuos es un parámetro importante que influye en la degradación y producción de metano. La caracterización de los RSO presentó un elevado contenido de humedad lo cual es favorable para solubilizar la materia orgánica susceptible a la biometanización. También presentó un contenido rico en materia orgánica y nitrógeno entre otros elementos que satisfacen las necesidades de crecimiento y producción de metano de las bacterias anaerobias.

El potencial bioquímico de metano es un método valioso para evaluar la máxima producción de metano de los RSO además de su biodegradabilidad, así como su tasa específica de biometanización. La fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos del comedor universitario presentó una producción de 80 m³ de metano por tonelada de RSO lo cual es superior reportado en la literatura.

Las altas concentraciones de la RSO afectó la actividad de las bacterias metanogénicas acetoclásticas por lo que se debe cuidar la carga orgánica utilizada para evitar inhibición por sustrato de éstas bacterias las cuales son las que realizan el 70% de la producción de metano.

Es importante utilizar una cantidad adecuada de inóculo para optimizar el proceso. La producción de metano incrementó con el aumento de los niveles de biomasa. Los resultados de este trabajo se demuestra que se requiere una baja cantidad de biomasa (1.5 gSSV/L) y en concentraciones superiores no se favoreció el proceso.

La producción de metano de los RSO es viable para su utilización como fuente de energía y que a su vez contribuye a la sustentabilidad ambiental. Los resultados de las pruebas del potencial bioquímico de metano pueden ser

utilizados para la calibración de modelos matemáticos y simular los procesos de digestión con el fin de predecir el comportamiento de digestores a escala real.

La biometanización presenta resultados prometedores que deben ser objeto de mayores estudios como el seguimiento de metabolitos primarios y secundarios durante la metanización, así como investigar nuevos diseños para optimizar el proceso.

8. ANEXOS

8.1 métodos Analíticos.

Para determinar las características de un residuo es muy importante el análisis del mismo, seleccionando aquellos parámetros que permitan obtener la mayor información posible.

En esta sección se describen los distintos métodos analíticos utilizados en este trabajo experimental y posteriormente se presentan los resultados de la concentración de los residuos sólidos urbanos utilizados en estos ensayos experimentales.

8.1.1 Sólidos suspendidos (método gravimétrico- APHA/SM 2540)

Se determinaron los sólidos suspendidos de los residuos sólidos urbanos. Se lavaron los crisoles y se calentaron en la mufla a 550 °C durante una hora; posteriormente se pasaron al desecador para que se enfriaran antes de pesarlos. Una vez obtenido este peso, se registró como “peso del crisol”. Se pesó 1 g de RSO por triplicado y se pusieron en los crisoles, después se colocaron en una estufa a 100 °C hasta que se eliminó el agua remanente, posteriormente se pasaron al desecador, se pesaron y se anotó este peso como “peso seco a 100 °C”. Los residuos, se calcinaron a 550 °C durante 30 minutos y se pasaron al desecador, tomándose este peso como “peso de ceniza a 550 °C”. Una vez obtenidos los tres pesos, se procedió a determinar los sólidos suspendidos totales, fijos y volátiles de la siguiente manera:

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales } \left(\frac{\text{g}}{\text{g muestra}} \right) = \frac{\text{Peso seco a } 100^{\circ}\text{C} - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso muestra}}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Fijos } \left(\frac{\text{g}}{\text{g muestra}} \right) = \frac{\text{Peso de ceniza a } 55^{\circ}\text{C} - \text{Peso del crisol}}{\text{Peso muestra}}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Volátiles } \left(\frac{\text{gSSV}}{\text{g muestra}} \right) = (\text{Sólidos Totales} - \text{Sólidos Fijos})$$

8.1.2 Determinación de metano (Almendariz, 2005)

El metano producido se midió mediante la técnica de desplazamiento de una solución saturada de NaOH (300 mg/L), y como indicador del cambio de pH por disolución se usó rojo de metilo. El volumen desplazado se midió en una columna de 4.45 cm de diámetro interno con una altura de 25 cm.

La determinación del volumen de biogás producido se determinó de la siguiente manera:

$$\text{Producción de metano } \left(\frac{\text{mL}}{\text{d}} \right) = \frac{A_r \cdot h}{t}$$

Dónde:

$$A_r = \text{Área seccional de la columna de biogás (cm}^2\text{)} = \frac{\pi \cdot \varnothing^2}{4}$$

\varnothing = Diámetro de la columna (cm).

h = Altura desplazada en la columna (cm).

t = Tiempo (días).

8.1.3 Determinación de nitrógeno (NMX-AA-24-1984)

Método Kjeldahl

El método Kjeldahl es el más aceptado para la determinación de proteínas en alimentos. En este el nitrógeno de las proteínas y otros compuestos orgánicos se convierten a sulfato de amonio por medio de una digestión con ácido sulfúrico en ebullición y en presencia de un ion metálico como catalizador (cobre o mercurio). El residuo de la digestión se enfría, se diluye con agua y se agrega hidróxido de sodio. El amonio presente se desprende y a la vez se

destila y recibe en una solución de ácido bórico que luego se valora con una solución ácida estandarizada.

Nitrógeno total

Es la suma de los nitrógenos amoniacal y orgánico presentes en la muestra, conocido como nitrógeno Kjeldahl.

Resumen del método

La muestra es digerida en presencia de ácido sulfúrico concentrado, sulfato de potasio y sulfato cúprico hasta desprendimiento de humos blancos y que la solución sea transparente e incolora de un tono amarillo paja. El residuo es enfriado, diluido y llevado a condiciones alcalinas para la determinación del amonio. El amonio destilado se cuantifica volumétricamente.

Materiales y reactivos

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser grado analítico, (a menos que se indique lo contrario), siempre que se mencione agua debe entenderse agua destilada.

Materiales

- Granalla de zinc de 20 mallas
- Perlas de vidrio
- Reactivos
- Sulfato de potasio (K_2SO_4)
- Sulfato cúprico ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$).
- Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- Ácido salicílico ($C_2H_2O_4$)
- Tiosulfato de sodio cristalino ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$)
- Alcohol etílico (CH_3-CH_2-OH) al 95%

- Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 10 N
- Solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1N
- Solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.1N
- Solución de anaranjado de metilo en la colección de 50 cm³
- Solución indicadora mixta de rojo metileno que acuerdo de bromocresol (Pesar 1 g de rojo de metilo y 0.5 g de bromocresol, se disuelven en 100 cm³ de alcohol etílico lleva a un pH = 4.5).

Procedimiento

Digestión

- Correr un blanco de agua.
- Pesar 0.5 g de muestra y se transfiere a un matraz Kjeldahl.
- Agregar 2 g de ácido salicílico y 40 cm³ de ácido sulfúrico concentrado, agitar, hasta que el ácido se incorpore totalmente a la muestra, formándose el ácido nitrososalicílico.
- Dejar reposar 30 minutos, y después añadir 10 g y de tiosulfato de sodio con el fin de reducir al ácido nitrososalicílico; agitar y dejar reposar por un período de 5 minutos.
- Transcurrido el tiempo calentar la mezcla a flama baja en el matraz Kjeldahl hasta que no exista desprendimiento de humos blancos y la solución se clarifique.
- Continuar la digestión durante 30 minutos más.
- Retirar el matraz y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Añadir 1 g de sulfato cúprico y 10 g de sulfato de potasio llevar a digestión hasta que la solución sea incolora ó de color amarillo paja.
- Preparar un matraz Erlenmeyer de 500 cm³, dentro del cual se vierten 25 cm³.
- de solución de ácido sulfúrico y de 3 a 4 gotas de solución indicadora de anaranjado de metilo y se coloca abajo del condensador de manera que la punta quede en el seno del líquido.

- Agregar al matraz Kjeldahl de 4 a 5 granallas de zinc y 10 perlas de vidrio.
- Adicionar con cuidado 100 cm³ de solución de hidróxido de sodio 10 N resbalando por las paredes del cuello del matraz y conectar al Destilador.

Destilación

- Encender la parrilla del Destilador
- Inclinar el matraz y agregar con mucho cuidado 150 cm³, de la solución de hidróxido de sodio.
- El matraz se calienta hasta que destile todo el amoniaco (Un máximo de 150 cm³ de destilado se obtiene aproximadamente en 30 minutos).
- Colocar el matraz colector del destilado en forma tal que el tubo de vidrio, de descarga conectado al condensador quede sobre la boca del matraz libre del contacto con la solución del ácido sulfúrico 0.1N y se continua destilando aproximadamente cinco minutos con el objeto de llenar el tubo de descarga.
- Se interrumpe el calentamiento, se retira el matraz colector y se titula con la solución de ácido sulfúrico 0.1N hasta que la solución vire a rosa.

Cálculos

El nitrógeno total en por ciento se calcula con la siguiente fórmula:

$$N_T \text{ en } \% = \frac{(A \cdot N_1 - B \cdot N_2) \cdot (0.014)(100)}{M}$$

Dónde:

A= Volumen de la solución de ácido sulfúrico empleado en la recolección del amoniaco destilado.

N1= Normalidad del ácido sulfúrico.

B= Volumen de la solución de hidróxido de sodio empleado en la neutralización de la solución de ácido sulfúrico.

N2= Normalidad de la solución del hidróxido de sodio 0.1N

M= Masa de la muestra en g.

0.014= Miliequivalente del nitrógeno.

100= Para relacionar el nitrógeno a por ciento.

Reproducción de la prueba

La diferencia máxima permisible en el resultado de pruebas efectuadas por duplicado, no debe exceder de 0.3% en caso contrario, se debe repetir la determinación.

Para las cantidades de reactivos y muestras indicadas son de esperarse resultados que varían de 0.5 a 2.5 % de nitrógeno total. En residuos sólidos, cuyo contenido de nitrógeno esperado sobrepase el rango mencionado debe variarse la cantidad indicada según convenga.

8.1.4 Determinación de materia orgánica (NMX-AA-21-1985)

Aparatos y equipo

Equipo usual de laboratorio.

Materiales y reactivos

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser de grado analítico a menos que se indique.

- Sulfato Ferroso 0.06 N.
- Dicromato de Potasio 1 N.
- Difenilamina al 1 %.
- Ácido sulfúrico concentrado al 98%.
- Ácido Fosfórico al 95%.

Obtención de la muestra

La muestra se obtiene según la Norma Mexicana NMX-AA-52 y en cantidad suficiente para efectuar la determinación con dos series de cinco pruebas cada una.

Procedimiento

- Simultáneamente correr un blanco por cada serie para obtener el factor de corrección.
- Triturar la muestra en un mortero hasta obtener una consistencia similar al talco.
- Pesar 0.1 g de la muestra y transferirlos a un matraz Erlenmeyer de 250 cm³ o mayor.
- Agregar con bureta 10 cm³ de dicromato de potasio.
- Agregar 20 cm³ de ácido sulfúrico concentrado.
- Agitar enérgicamente durante un minuto.
- Dejar reposar durante 30 minutos.
- Posteriormente agregar 100 cm³ de agua.
- Agregar 10 cm³ de ácido fosfórico.
- Añadir 0.06 cm³ de difenilamina.
- Titular con sulfato ferroso 0.06 N hasta que vire de violeta oscuro a verde.

Cálculos

El porcentaje de materia orgánica se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Materia orgánica en \%} = \frac{V_1 \cdot N_1 - V \cdot N_F}{P}$$

Dónde:

V1 = Volumen (cm³) de solución de dicromato de potasio empleado en la muestra.

N1 = Normalidad de la solución de dicromato de potasio.

V = Volumen (cm³) de solución del sulfato ferroso gastado en la titulación de la muestra.

N_F = Normalidad de la solución de sulfato ferroso.

P = Peso de la muestra en g.

$$K=0.69=0.003\frac{1.72}{0.74}*100$$

Dónde:

0.003 = Mili equivalente del carbono.

0.74 = Factor de recuperación.

1.72 = Factor para convertir el % de carbono en % de materia orgánica.

8.1.5 Determinación de hidrógeno a partir de materia orgánica (NMX-AA-68-1986)

Esta Norma Mexicana especifica un método para la determinación de Hidrógeno de los Residuos Sólidos Municipales, para planear y diseñar sus sistemas de disposición final.

Aparatos y equipo

Son los utilizados en las determinaciones de materia orgánica.

Materiales y reactivos

Son los utilizados en la determinación de materia orgánica.

Cálculos

Están en función del por ciento de materia orgánica obtenido de acuerdo a la constante de Jackson.

Para conocer el por ciento de hidrógeno (% H) en una muestra se emplea la siguiente fórmula:

$$\% H = \frac{\% \text{ de materia orgánica}}{15}$$

Dónde:

15 = Factor de correlación que utiliza Jackson, obtenido de datos Experimentales (Jackson, 1970) (ver bibliografía).

8.1.6 Determinación de la relación carbono/nitrógeno (NMX-AA-67-1985)

La presente Norma Mexicana especifica un método para la determinación de la relación Carbono/Nitrógeno de los Residuos Sólidos Municipales, para planear y diseñar los sistemas adecuados de disposición final de los mismos.

Definiciones

Relación Carbono/Nitrógeno.

Es el parámetro utilizado como control de calidad de los residuos sólidos dentro de un sistema, utilizando como base la materia orgánica.

Aparatos y equipo

Son los utilizados en las determinaciones de Materia Orgánica y Nitrógeno Total.

Materiales y reactivos

Son los utilizados en las determinaciones de Materia Orgánica y Nitrógeno Total.

Cálculos

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) está en función del % de materia orgánica (%M.O.) obtenido de acuerdo a la constante de Jackson y del % de Nitrógeno total (%N).

Para determinar el contenido de carbono se multiplica el % de materia orgánica x 0.58, donde:

0.58 = constante dada por Jackson (Ver Bibliografía).

Por lo tanto, la ecuación para determinar la relación (C/N) es:

$$C/N = \frac{\% \text{ M.O.}}{\% \text{ N}} * 0.58$$

Dónde:

% N = % Nitrógeno total obtenido según NOM-AA-24.

% M.O. = % Materia orgánica obtenida según norma NOM-AA-21,

8.1.7 Determinación de extracto etéreo (determinación de grasas) mediante la NMX-F-089-S-1978

La grasa presente en un alimento se determina mediante su extracción con un solvente orgánico. El éter de petróleo (fracción de 40-60°C) es el mejor agente de extracción directa de la grasa en el material seco. El éter etílico es más eficiente pero también extrae material no graso. Los otros componentes del alimento se consideran insolubles en estos solventes. Debido al uso

generalizado de dichos solventes para la determinación de grasa en los alimentos y debido a que pueden estar presentes en el extracto pequeñas cantidades de otras sustancias, diferentes a la grasa, el resultado generalmente se reporta como “grasa cruda” o “extracto etéreo”. La extracción puede ser continua utilizando el equipo Goldfish o bien utilizando el equipo Soxhlet.

Método de extracción por lote

- Reactivos
- Éter etílico o de petróleo

Procedimiento

- Pesarse un dedal de papel filtro, introducir la muestra dentro del dedal y volver a pesarse. Colocar el dedal con la muestra dentro del lixiviador soxhlet. En caso de contar con los dedales adecuados se puede envolver la muestra con papel filtro, siguiendo los pasos de 1 a 12 como se muestra en la sig. Figura.
- Colocar 150 ml del solvente en un matraz balón de 250 ml con cuello esmerilado y montar el aparato.
- Abrir la llave del refrigerante y llevar a cabo la extracción durante 16 horas. Dejar enfriar el aparato.
- Remover el dedal y evaporar el residuo de éter que contenga, colocándolo, en una estufa a 105°C por 15 minutos.
- Enfriar a temperatura ambiente colocando el dedal en un desecador y pesarse. Calcular el porcentaje de grasa o aceite.

Cálculos:

$$\% \text{Grasa Cruda} = \frac{(b-c)}{(c-a)} * 100$$

- a Peso del dedal
- b Peso del dedal con muestra
- c Peso del dedal después de extraer

8.1.8 Determinación de humedad (NMX-AA-016-1984)

Aparatos y equipos

- Balanza analítica con sensibilidad de 0.001g
- Espátula para balanza
- Estufa capaz de mantener una temperatura constante (103±5°C)
- Cajas de aluminio
- Guantes de asbesto
- Desecador con deshidratante

Procedimiento

- Colocar las cajas de aluminio por dos horas en la estufa a 103°C, posteriormente pasar al desecador y mantener hasta alcanzar un peso constante.
- Pesarse la caja vacía y registrar peso.
- Agregar 1g aproximadamente y registrar el peso exacto (G).
- Nuevamente introducir con ayuda de pinzas la caja de aluminio con muestra y mantener por 24 horas.
- Colocar en el desecador hasta obtener peso constante.
- Pesarse en la balanza analítica y registrar peso final (G₁).

Cálculos

El porcentaje de humedad se calcula con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{(G - G_1)}{G} * 100$$

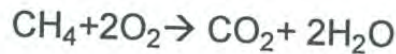
H=Humedad en %.

G= Peso de la muestra húmeda en g.

G₁=Peso de la muestra seca en g.

8.1.9 Factor de conversión de metano a DQOCH₄

Para la obtención del factor de equivalencia de un mol de metano a DQO se utiliza la ecuación de combustión del metano y los valores del peso molecular de cada sustancia que se encuentra en la reacción. La ecuación estequiométrica que se utiliza para establecer el cálculo es el siguiente:



Bajo la suposición de que 1 g de DQO es igual a 1 g de O₂ y que además una mol de CH₄ reacciona con 2 moles de O₂, y conociendo los pesos moleculares de cada reactivo (CH₄=16 g/mol y O₂=32 g/mol) se obtiene:

$$\frac{2 \cdot (32\text{gO}_2)}{(16\text{gCH}_4)} = \frac{4\text{gDQO}}{1\text{gCH}_4} = \frac{1\text{gDQO}}{0.25\text{gCH}_4}$$

Dado que la densidad del metano es 714g/ml a unas condiciones de presión de 1 atmosfera y una temperatura de 273K se tiene:

$$\frac{0.25\text{gCH}_4}{1\text{gDQO}} = \frac{1\text{gCH}_4}{714\text{mL}} = \frac{0.00035\text{m}^3\text{CH}_4}{1\text{gDQO}}$$

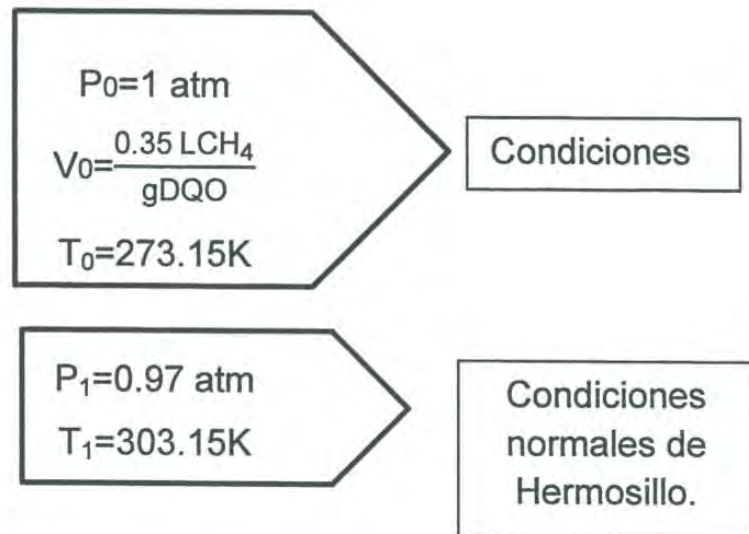
Es decir que bajo condiciones normales de 1 atmosfera de presión y 273K, 1 g de DQO es equivalente a 0.35L de CH₄. De acuerdo con la ecuación de estado para los gases ideales que tiene un porcentaje de error muy bajo en estados en los que el gas se encuentra con altos volúmenes molares, es decir bajas presiones y altas temperaturas se obtiene el equivalente para la presión atmosférica estándar de la ciudad de Hermosillo y una temperatura de 30°C y una presión de 0.97 atm a la cual se realizó el ensayo:

$$P_1V_1T_0=P_0V_0T_1$$

Entonces:

$$V_1=\frac{P_0V_0T_1}{P_1T_0}$$

Dónde:



$$V_1=\frac{(1\text{atm})\left(\frac{0.35\text{LCH}_4}{\text{gDQO}}\right)(303.15\text{K})}{(0.97\text{atm})(273.15\text{K})}=0.3963\frac{\text{LCH}_4}{\text{gDQO}}\approx 0.4$$

Por lo cual, en condiciones de presión y temperatura de la ciudad de Hermosillo (30°C y 0.97 atm) 1g de DQO es equivalente a 0.4L de CH₄.

9. Bibliografía

- Almendariz F. (2005). Tratamiento de sosas gastadas en un reactor de lecho expandido de lodo granular anaerobio. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F.
- Barradas A. (1999). Investigación sobre la metodología adecuada para la planificación de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos y rurales aplicada a la zona Minatitlan-Cosoleacaque, Veracruz. Tesis doctoral. UPM.
- Cairó, J.J., París, J.M. (1988). Microbiología de la digestión anaerobia, metanogénesis. Actas del 4th seminario de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Valladolid, España.
- Elías X. (2009). Reciclaje de Residuos Industriales, residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora. 2da edición.
- Flores D, Márquez L., Buenrostro O. (2011). Biometanización de residuos sólidos urbanos por adición de lixiviados de alta carga orgánica en régimen mesófilo. Facultad de biología MCIA. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.
- Flores D. (2001). Guía Práctica No. 2. Para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos. Quito Ecuador.
- Forster Carneiro T. (2005). Digestión anaerobia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: Estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización en el biorreactor. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz, España
- Gallardo A. Laines J. Colomer F. Miralles T. Gómez A. (2013). Biometanización de los rechazos procedentes del proceso de afino del compost. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Tabasco, México.
- Gandy, Matthew (1994) Recycling and the Politics of Urban Waste. New Cork: St. Martin Press.
- Ghyoot W. (1997). Anaerobic digestion of primary sludge from chemical precipitation. Water science & technology. 6-7, 357-65.

T-150104

- Gomez, J, and Goma, G. Effect of different Inoculum levels of Heterogeneous Mixed culture in Acidogenic Fermentation. Departamento de Biotecnología , Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa, 1986
- Harris, Jonathan M. (2006) Environmental and Natural Resource Economics: A Contemporary Approach. 2nd. Edition, Tufts University, Global Development and Environmental Institute.
- Haug. R.T. (1993). The practical handbook of compost engineering. Lewis publishers. CRC press LLC. Florida.
- Jackson M.L. (1970). Análisis Químico de Suelos. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Jarabo-F. (1999). La energía de la biomasa. 2° ed. Madrid: S.A.P.T Publicaciones técnicas.
- Jaramillo G.-Zapata L. (2008). Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia. Universidad de Antioquia. Monografía. Colombia.
- Juanga J. P. (2005). Optimizing Dry Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste. Master Thesis. Asian Institute of Technology. Thailand 2005.
- Labrador. J. (1996). La materia orgánica en los agrosistemas. 2ª edición. Madrid, España.
- Madigal, M.T., Mertinko, J.M., Parker, J. (1998). Brock Biology of microorganisms. Edit. Prentice may International (UK) Ltd 8ª ed.
- Mandujano-Sanchez P. (2001). Digestión anaerobia de sólidos en alta concentración. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Manual técnico-Administrativo para el servicio de limpia Municipal. (Sedesol, 2001).
- Massé D. I.-Droste R. L. (2000). Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in a sequencing batch reactor.

- Mata J (2003) Fundamentals of the Anaerobic Digestion Process. In: Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes. IWA Pub, London.
- Montalvo S. y Guerrero L. 2003. Tratamiento Anaerobio de Residuos. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso Chile.
- Reyes A. (2006). Residuos sólidos, opciones para un manejo eficaz. Revista Ciencia y Desarrollo [en línea]. Vol. 32, no.195. Disponible en: <http://cyd.conacyt.gob.mx/195/Articulo/Residuossolidos/Residuos00.htm#a>. [Consulta: 27 junio 2014].
- Rigo M., Monte R. Vidal J. Coelho N., Gaspar R. (2010). Catechol Biodegradation Kinetics Using Candida Parapsilosis. Universidad Estadual de Campinas. SP Brasil.
- Saval S. y Noyola A. (1992). Aportaciones de la biotecnología al tratamiento anaerobio de aguas residuales. Vol. 2. No.5-6. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México, Distrito Federal. México
- Speece R. E. (1996). Anaerobic Biotechnology for Industrial wastewaters Archae press USA.
- Stams, A. J.M. (1994). Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogens environments. Antoine Van Leeuwenhoek.
- Tchobanoglous G., Theisen H. & Vigil S. (1994). Gestión integral de residuos Sólidos. McGrawHill-Interamericana. España
- Tchobanoglous, G., Theisen H. y S. Vigil 1996. Gestión integral de residuos sólidos. Vol. I. McGraw-Hill, España.
- Vázquez C., Duarte L., Povinelli J. (1996). Digestión anaerobia de residuos sólidos generados en restaurante inoculado con lodo de reactor UASB. Universidad de Sao Paulo.
- ZEEUW.W (1987). Granular sludge in USAB reactors, Proceeding of the gasmat workshop. Lungstem Netherlands.