

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA**



**FERMENTACIÓN EN SECO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS  
UTILIZANDO RASTROJO DE MAÍZ Y ESTIÉRCOL DE BOVINO.**

**POR**

**SANTIAGO SUAREZ BLANCO**

**TESIS**

**Presentada como Requisito Parcial para Obtener el**

**Título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Febrero del 2010**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO**  
**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA**  
**DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO**

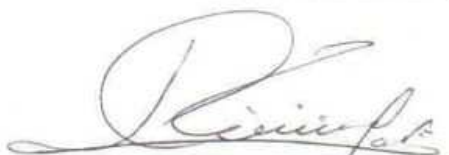
**FERMENTACIÓN EN SECO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS  
UTILIZANDO RASTROJO DE MAÍZ Y ESTIÉRCOL DE BOVINO.**

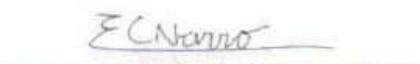
**TESIS**


Presentado por:

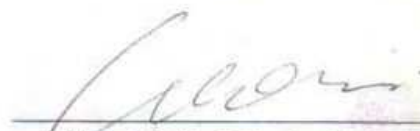
**Santiago Suarez Blanco**

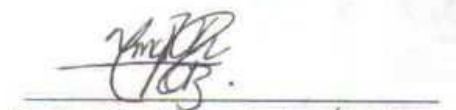
Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador, como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Producción.

  
Dr. Juan Carlos Zúñiga Enriquez  
Asesor principal

  
Dr. Efraín Castro Narro  
Sinodal

  
Dr. Jairo Iván Aguilera Soto  
Sinodal

  
M.C. Adolfo Ortega Pérez  
Sinodal

  
Dr. Ana Verónica Charles Rodríguez  
Sinodal

  
Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo  
Coordinador División de Agronomía  
  
Coordinación  
División de Agronomía

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Febrero de 2011

## **AGRADECIMIENTO**

Solo tengo que decir gracias a toda mi familia que me apoyo incondicionalmente para lograr un éxito más en mi vida profesional. Afortunadamente tengo a todos estos seres queridos a los que quiero tanto y que me ofrecieron su apoyo para salir adelante. Me llena de orgullo saber que tengo una familia en la cual se ha inculcado el apoyo mutuo entre todos. Gracias a cada uno de estas personas, he salido adelante.

He entendido que la unión de la familia es el motor más importante en esta vida, ya que mediante esta unión se pueden derribar todos los obstáculos existentes en la vida por más difíciles que sean.

Doy gracias a toda mi querida familia por haberme apoyado a cada momento y en todos los aspectos tanto morales como económicos, y también a cada una de las personas que de una u otra manera me ofrecieron su apoyo incondicional y no puedo nombrarlos ya que si escribiera sus nombres me llevaría una eternidad para terminar de mencionarlos.

En especial a mi razón de vivir mi hijo José ángel a esta personita que le dio una revolución muy diferente a mi vida. A este ser tan especial existente en mi vida al igual que a su sagrada madre por apoyarme a cada momento.

Gracias a todas las personas que confiaron en mi y, que afortunadamente he recibido un verdadero apoyo incondicional.

Solo me resta decirles **GRACIAS**

## Querida mamá

Mamá, el otro día, observando mi ombligo, me detuve a pensar qué pequeño y curioso testimonio de una conexión tan importante,  
¡Una conexión que me recuerda cómo comenzó mi vida, cómo comencé a ser yo!

Hoy es difícil imaginar que alguna vez fuera tan pequeño, que dependía completamente de alguien, Y ese alguien eras tú, mamá.

Tú me mostraste mi primera mariposa y mi primer arco iris.  
Estabas a mi lado cuando ensayé mis primeros pasos.  
Fuiste la primera persona que me hizo reír  
y escuchaste que la primera palabra que dije fue: "Pa-pá" (¡perdóname, mamá!)

Me encanta que la gente diga que me parezco a ti, ¡porque es verdad!  
Tenemos los mismos ojos, las mismas orejas y la misma nariz.  
Y si los miras de cerca, verás que hasta los dedos de nuestros pies son parecidos.  
Aunque, si lo piensas bien, no es tan sorprendente, siempre seré una parte de ti por que tú me creaste.  
Has esculpido mi rostro con un millón de besos cariñosos.

Me has enseñado todas las cosas importantes de nuestro mundo y mi lugar en él.  
Todo lo aprendí de ti, mientras te escuchaba y te observaba.  
Has compartido conmigo todos los valores que te hacen tan especial:  
la bondad, el perdón, la honestidad, la perseverancia, la consideración y principalmente, la paciencia.

También me enseñaste que, incluso el día más terrible, parece mejor con un vaso de leche tibia y galletas.  
(Tu serena filosofía de leche tibia y galletas, mamá, me ha ayudado a atravesar los momentos más difíciles, mucho más a menudo de lo que puedes imaginarte).

Lo que trato de decirte, mamá, es que eres la base sobre la que se ha formado mi personalidad.  
Y sólo me queda una palabra: ¡Gracias!

¡Gracias! por haberme colmado siempre de abrigo, de seguridad y de amor, por haberme dado todo lo que necesitaba para crecer y desarrollarme.

¡Gracias! por que siempre estabas dispuesta a llevarme a todos lados.

¡Gracias! por las exquisitas comidas de las que te ocupabas con tanto amor, día tras día, año tras año.

Y te agradezco especialmente, mamá,  
por aquel increíble aroma de pan recién tostado, por las mañanas.

¡Gracias!, por dejar a tu tesoro de dos años jugar con tus posesiones más valiosas  
y por no haber dicho: “Te lo dije, te lo dije”, todas las veces que hubieras querido.

¡Gracias! por levantarme cada vez que necesitaba un abrazo o ver algo desde la mejor ubicación.

Lo que seguramente no ha sido nada bueno para tu espalda, mamá.

¡Gracias! por volar a rescatarme cada vez que me oías gritar: “¡Quiero a mi mamá!”

Siempre has sabido qué decir o qué callar, para hacerme sentir mejor.

¡Gracias! por tantos cálidos y amorosos abrazos.

Por que arreglabas juguetes y corazones rotos una y otra vez, gracias mamá.

¡Gracias! por alentarme a buscar la belleza dentro de mí y a mantenerme siempre en pie.

¡Gracias! por asegurarme que podría crecer y alcanzar el éxito en cualquier cosa que me propusiera, si creía en mí de la misma manera en que tú lo hacías.

Pero mamá, los dos sabemos que aunque nuestra relación ha sido maravillosa, no siempre fue tranquila y perfecta.

Por que yo, que soy la alegría de tus ojos no siempre te hice reír.

¡Perdóname! por las veces que te hice enojar,  
o por haber hecho que te preocuparas por mí, y por todas las noches de insomnio que te causé.

¡Perdóname! por haberme revolcado en el barro,  
después de que me hubieras puesto mi mejor ropa y mis zapatos nuevos  
y por preguntar: “¿Falta mucho?, ¡falta mucho? Cada vez que salíamos.

Discúlpame por intentar huir tantas veces del baño y por ponerme difícil a la hora de ir al colegio o cuando no me dejaste hacerme aquel tatuaje.

Me arrepiento de todas las ocasiones en que me puse insoportable,  
especialmente, en los mejores lugares.

Hoy me siento mal por las veces que te desperté a las cinco de la mañana el día de mi cumpleaños  
o en Navidad y por todas aquellas noches en que no había manera de que me durmiera.

Perdóname por no haberte dado más tiempo para ti misma.

Aunque fueran unos pocos momentos tranquilos para pensar, para soñar.

Ahora comprendo a cuántas cosas renunciaste por mí.

Por que mi tiempo para jugar siempre estuvo primero que tu tiempo para descansar,  
mis comidas eran más importantes que las tuyas,  
y mi entrenamiento para dejar los pañales estaba absolutamente antes que nada.

Cada vez que tratabas de relajarte, yo irrumpía en tu habitación exigiendo:  
“¡Mamá, me muero de hambre!”

“¡Mamá me aburro!”

“¡Mamá, no encuentro a mi mascota en ninguna parte. Levántate y ayúdame a buscarla ahora mismo!”

Hoy comprendo cuántas cosas he logrado gracias a ti, mamá  
y quisiera tener más de una vida para devolverte todo lo que me has dado.

Me mostraste un mundo lleno de amor y maravillas,  
me enseñaste a encontrar mi propio camino y me has hecho mucho más feliz  
de lo que puedas imaginar.

Quiero que todo el mundo lo sepa: ¡Mi mamá es la mejor mamá del Universo!

¡Gracias! mamá. ¡Gracias por todo!

## DEDICATORIA

Dedico mi trabajo en particular a mis padres que son mis dioses en la vida y les agradezco que estén siempre a mi lado para apoyarme y a mis hermanos, a todos estos seres queridos tan especiales en mi vida, ya que gracias a ellos e culminado un eslabón más en mi vida profesional.

He recibido todo el apoyo incondicional de parte de cada uno de los integrantes de mi familia, y es lo que más me enorgullece en la vida a ellos dedico mi trabajo.

Sé muy bien que naufragar por los laberintos de la vida es difícil, pero se puede lograr cuando se tiene una mano amiga a lado, y afortunadamente en mi vida siempre ha sido así. Mi familia es mi impulso diario para seguir adelante por eso dedico mi trabajo a todos ellos.

Y por otra parte a mi hijo y su querida madre a estas dos personas que me apoyaron a cada momento, ya sea alegre o triste que pasaba. Solo tengo que decirles gracias y los amo.

También agradezco a todos los colaboradores para la realización de este trabajo que es de suma importancia para mí.

*"Para producir hay que dejar las  
oficinas, salir al campo y ensuciarse  
las manos ya que es el único lenguaje  
que entienden las plantas y animales"*

*"Norman Ernest Borlaug"*

## Mis padres

Mamá y Papá, lindas palabras que me enseñaron a decir desde niño.

Papa, quiero decir algo antes de que sea demasiado tarde y el día de mañana no estés por eso quiero decirte lo que siento.

Te quiero.

Sé que nunca te lo digo. Tal vez porque me da pena, pero en silencio y en mi mundo, siempre pienso en ti y pienso como estarás.

Sé que a veces soy egoísta porque me encierro en mis cosas. Pero eso no quiere decir que no te quiero, a lo mejor no se como demostrarlo y quiero que sepas esto papá:

Te quiero porque...

Porque entre más humano te veo más te quiero y te admiro. Saber que eres tan humano como yo eso si es de importancia, porque se cuanto sufres. Sé que a veces tienes problemas pero lo guardas en tu silencio con mi madre para no preocuparnos.

Sentirte como yo de carne y hueso, sentir que sientes como yo, que eres capaz de levantarte ante alguna derrota y volver a empezar de nuevo, pero para hacerlo mejor. Eso para mí es de importancia

Porque desde niño, la más linda palabra que me enseñaste a decir "Papá", que hoy digo con cariño, emoción, orgullo y sobre todo, con amor.

Por eso te digo esto antes de que sea demasiado tarde.

Mamá, tú que siempre estás conmigo, ahora quiero decirte lo mucho que significas para mí porque no quiero que sea tarde.

Y después no haber podido haberte dicho esto:

Tu corazón es bueno, se preocupa por sus hijos. Entiende. Les das consejos y se preocupa por ellos. Por eso hoy quiero que sepas esto:

Te agradezco porque...



*Antes que nada, porque eres mi Madre. Me cargaste 9 meses en tu  
vientre y porque desde ahí acariciaste mi frágil cuerpo.*

*Por enseñarme a decir esa linda palabra que hoy me gusta decir con  
amor y cariño: "Mamá".*

*He logrado saber de tus desvelos y de tus sufrimientos. Se cuanto sufres  
cuando lloro.*

*Sé que hay veces que no necesitamos tantas palabras para expresar lo  
que sentimos. Solo con una palabra sabemos cuanto nos quieren.*

*Y sé que ya soy una adolescente pero soy muy sensible. Que con  
cualquier cosita me siento triste o me alegro, pero hay veces que  
necesito de tus consentimientos y necesito tu ternura. Tu calor. Tus  
consejos que me enseñan sobre la vida.*

*Quiero agradecerte por haberme cargado 9 meses en tu vientre, por  
darme de tu pecho, por darme la vida, tu sangre. Por darme tu tiempo,  
tu espacio y parte de tu cuerpo.*

*Y le doy gracias a Dios por darme el mejor regalo de mi vida. Gracias  
por tu amor incondicional que me das a tu manera. Por el tiempo que  
tomas en mí y te preocupas.*

*Por eso les digo hoy:*

*Gracias por su tiempo. Su amor. He logrado saber de sus desvelos y los  
he visto pensando en mi futuro. Ahora se, que de tanto que me quieren,  
sufren más que yo cuando me regañan o son duros*

*El poder y la persona misma desaparecerán, pero la virtud de unos  
grandes Padres vivirá para siempre.*

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>ÍNDICE DE GRAFICAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xv</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>3</b>
<b>REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
Historia del biogás.....	4
El biogás a nivel mundial.....	6
Situación del biogás en México.....	7
Perspectivas de aplicación de la tecnología anaerobia a nivel mundial.....	8
Definición de biogás.....	9
Características del biogás.....	11
Composición del biogás .....	12
Propiedades del biogás.....	13
Valor calorífico del biogás y del gas natural.....	13
Usos del biogás .....	14
Beneficios de la tecnología del biogas.....	14
Análisis de las fuentes orgánicas para la producción de biogas. ....	17
Residuos ganaderos.....	17
Fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.....	17
Residuos industriales biodegradables.....	17
Lodos de depuración de agua residuales urbanas.....	18
Aspectos ambientales.....	18
Barreras en la fase de aplicación de biogás: .....	19
Elevadas inversiones.....	19
Falta de información.....	20
Tecnología idónea.....	20
Condiciones para la biodigestión.....	20
Temperatura.....	20
Ph.....	21
Nutrientes.....	22

Toxicidad.....	22
Acidez.....	23
Relación carbono- nitrógeno (c:n).....	23
Co-digestión .....	23
Tiempo de retención hidráulico .....	25
Carga orgánica .....	25
Criterios para considerar en el diseño de un biodigestor.....	26
Factores humanos.....	26
Factores biológicos .....	26
Factores físicos.....	26
Factores de construcción .....	27
Factores utilitarios .....	27
Que es fermentación.....	27
Fermentación anaerobia .....	28
Degradación anaerobia de la materia orgánica.....	28
Metanogénesis en una sola fase. ....	29
Metanogénesis en dos fases .....	29
Metanogénesis en multi etapas. ....	30
Anaerobiosis de los sustratos más importantes.....	33
Anaerobiosis de los lípidos. ....	34
Anaerobiosis de las proteínas. ....	34
Etapas de la digestión anaerobia.....	35
Hidrólisis.....	35
Acidogénesis .....	36
Acetogénesis.....	37
Metanogénesis.....	38
La fermentación anaerobia en seco .....	39
Descripción del proceso de fermentación en seco .....	39
Proceso-batch .....	39
Menor consumo de energía en el proceso.....	40
Gas de alta calidad y rendimiento.....	41
<b>MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>43</b>
Localización geográfica.....	43
Material biológico.....	44

Material de laboratorio .....	44
Análisis del material en laboratorio.....	44
Metodología .....	45
Análisis estadístico.....	45
Diseño estadístico .....	45
Descripción de los tratamientos .....	46
Fabricación de biodigestores.....	46
Almacenamiento del gas .....	46
Parámetros a evaluar.....	47
Temperatura del agua en el recipiente. ....	47
Ph de la mezcla: .....	47
Volumen de biogás. ....	47
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>48</b>
Composición del estiércol .....	48
Composición del rastrojo de maíz.....	49
Análisis del material biológico antes y después del experimento.....	49
El nitrógeno en el proceso de fermentación en seco.....	52
Biogás obtenido de los tratamientos evaluados .....	53
Efecto del potencial hidrógeno (ph) en la producción de biogás .....	57
Efecto de la temperatura en la producción de biogás. ....	62
Efecto de la temperatura en relación al ph.....	63
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
Cuadro No. 1	Algunas características principales del biogás.....	<b>11</b>
Cuadro No. 2.	Composición del biogás derivado de diversas fuentes.....	<b>12</b>
Cuadro No. 3.	Composición química del biogás.....	<b>13</b>
Cuadro No. 4	valor calorífico del biogas.....	<b>13</b>
Cuadro No.5.	Estimación de las emisiones mundiales de metano.....	<b>19</b>
Cuadro No.6.	Descripción de los tratamientos utilizados en el experimento.....	<b>46</b>
Cuadro No.7.	Datos de porcentaje de proteína en estiércol de bovino alimentado con diferentes raciones de concentrados, reportado por varios autores.....	<b>48</b>
Cuadro No. 8.	Análisis químico del material biológico al inicio y final de la investigación, de producción en seco de biogás. Buenavista. Saltillo, Coahuila. México. Septiembre-octubre 2010.....	<b>50</b>
Cuadro No. 9.	Análisis de varianza para producción en seco de biogás en dos tratamientos de materia orgánica. Buenavista, saltillo, Coahuila. México. Septiembre - octubre. 2010.....	<b>53</b>
Cuadro No.10.	Comparación de medias en la producción de biogás.....	<b>54</b>
Cuadro No.11.	Resumen de los resultados para producción de biogás.....	<b>55</b>
Cuadro No 12.	Análisis de varianza (anva) para la evolución del pH en dos tratamientos en la producción en seco de biogás. Buenavista, saltillo, Coahuila, México. Sept-oct.2010.....	<b>57</b>
Cuadro No. 13.	Comparación de medias de la evolución de pH en la producción en seco de biogas. UAAAN, Buenavista, saltillo, Coahuila. México. Sep.-oct. 2010.....	<b>58</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
Figura No. 1.	Beneficios del biogas.....	15
Figura No. 2.	Ejemplo de digester con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.....	16
Figura No.3.	Producción de metano en la anaerobiosis de sustratos complejos.....	30
Figura. No. 4.	Esquema simplificado de las etapas metabólicas de la anaerobiosis...	32
Figura No. 5.	Etapas metabólicas de la anaerobiosis.....	33
Figura No. 6.	Esquema del proceso de fermentación en seco de la empresa Bekon...	40
Figura No. 7:	localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la republica mexicana. ....	43

## ÍNDICE DE GRAFICAS

<b>Grafica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
	Gráfica No.1. Producción de biogás con dos substratos orgánicos en un proceso de fermentación en seco.....	<b>41</b>
	Grafica No. 2. Comportamiento del porcentaje de cenizas al inicio y final del proceso de fermentación en seco de dos tipos de materia orgánica para la producción de biogás. Buenavista. Saltillo, Coahuila. México. Septiembre-octubre 2010.....	<b>51</b>
	Grafica No 3 porcentaje de nitrógeno al inicio y final del proceso de fermentación en seco de dos tipos de materia orgánica para la producción de biogás. Buenavista. Saltillo, Coahuila. México. Septiembre-octubre 2010.....	<b>52</b>
	Grafica No 4. Evolución de la producción en seco de biogás en litros en dos diferentes tipos de materia orgánica. UAAAN, Buenavista. Saltillo, Coahuila. México. Septiembre - octubre 2010.....	<b>55</b>
	Grafica No .5. Evolución del pH en dos tratamientos en la producción en seco de biogas. UAAAN, Buenavista, saltillo, Coahuila. México. Sep.-oct. 2010.....	<b>58</b>
	Grafica No 6. Efecto del pH en relación con la producción en seco de biogás por día para el tratamiento 1. UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coahuila. México. Sept.-oct. 2010.....	<b>59</b>
	Grafica No 7. Efecto del pH en relación con la producción en seco de biogás por día para el tratamiento 2. UAAAN, Buenavista, saltillo, Coahuila. México. Sept.-oct. 2010.....	<b>60</b>
	Grafica No 8. Efecto de la temperatura en la producción de biogás por día en fermentación en seco de rastrojo de maíz y estiércol de bovino. UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coahuila. México. Sept-oct. 2010.....	<b>62</b>
	Grafica No 9. Efecto de la temperatura en relación con el ph para el tratamiento 1. UAAAN, Buenavista, saltillo, Coahuila. México. Sept.-oct. 2010.....	<b>64</b>
	Grafica No 10. Efecto de la temperatura en relación con el ph para el tratamiento 2. UAAAN, Buenavista, saltillo, Coahuila. México. Sept.-oct. 2010.....	<b>65</b>

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como fin principal iniciar el estudio a nivel laboratorio de la técnica de fermentación en seco para la generación de biogás, con la utilización de residuos de cosecha y estiércol de bovino. Los parámetros evaluados fueron temperatura del agua en el recipiente, temperatura de la mezcla en el biodigestor, pH de la mezcla y volumen de biogás producido. Para la medición del biogás se utilizó un medidor de fluidos de gases especialmente calibrado para el biogás modelo Top-Trak<sup>a</sup> Mass Flow Meters, Serie 820 de la compañía Sierra Instruments. El diseño experimental que utilizado fue bloques al azar con dos tratamientos y cuatro repeticiones. El modelo estadístico fue:  $Y_{ij} = \mu + Z_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$ . Se utilizó la prueba de comparación de medias DMS ( $p < 0.05\%$ ), para aquellas variables que manifestaron diferencias estadísticas significativas.

Los resultados muestran que el mejor tratamiento en la producción de biogás, fue el dos a base de estiércol de bovino con una producción total de 0.2625 litros en un periodo de 5 días. La producción por día fue de 0.066 lts. El tratamiento uno (rastrajo de maíz) produjo 0.1076 litros de biogás, con una producción por día de 0.022 lts. El pH fue más alto en el tratamiento uno con un valor promedio de 8.56, a diferencia del tratamiento dos que promedió 7.05.

Se concluye que en el proceso de fermentación en seco, el estiércol es el material orgánico que mostró el mejor comportamiento para la producción de biogás en comparación con el rastrojo de maíz, ya que lo superó en producción de biogás en un 59%.

Se recomienda tomar en cuenta al mejor tratamiento de este trabajo como base para posteriores investigaciones y explorar mezclas de materiales orgánicos similares a los estudiados.

**Palabras clave:** Biogás, fermentación en seco, metano, energías alternativas, bioenergía, energías de biomasa.



## Introducción

En pleno siglo XXI nuestros recursos naturales para la generación de energías están siendo exterminados inconscientemente y a un ritmo acelerado, la razón, subsistencia.

Como se menciona en <http://emison.es> (2010) la tecnología de la biogásificación o metanización puede ser considerada aún como una tecnología en desarrollo. En efecto, la digestión anaeróbica de materias con alto contenido orgánico, ha sido desarrollada durante los últimos 30 años sufriendo sucesivas mejoras, todas con la finalidad de obtener procesos más eficientes, versátiles y con un mínimo impacto ambiental. La digestión anaeróbica como técnica de tratamiento y aprovechamiento energético de los residuos sólidos urbanos permite reincorporar el contenido energético de estos residuos en el sistema productivo ya sea en forma de calor o electricidad.

Por lo tanto según [www.cubasolar.com](http://www.cubasolar.com)(2008) menciona que la biogásificación como tecnología de obtención de biogás a partir de la fracción orgánica de diferentes tipos de residuos, se basa en la aplicación o desarrollo de varios procesos bioquímicos consecutivos, es decir, hidrólisis, acidificación y metanización, donde la acción de diferentes bacterias en condiciones adecuadas juega un papel fundamental tanto para la producción como para la calidad del biogás generado. Todos los residuos orgánicos (basura de cocina, restos de cultivos, aserrines, estiércol de ganado etc.) Son adecuados para ser fermentados anaeróbicamente, siempre y cuando exista la tecnología adecuada para su aprovechamiento.

En [textoscientificos.com](http://textoscientificos.com) (2009) afirma que como es bien sabido las bacterias son consumidoras de carbono y nitrógeno, y como resultado se produce una combinación de gases formada por metano (CH<sub>4</sub>), anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y (ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno) (H<sub>2</sub>S).

Los alimentos de las bacterias anaeróbicas son el carbono (en la forma de carbohidratos) y el nitrógeno (en proteínas, nitratos, amoníaco, etc.). El carbono se utiliza para obtener energía y el nitrógeno para la construcción de estructuras celulares.

El lixiviado es la fase líquida procedente, principalmente, de la degradación de la materia orgánica, al que se le suman otros líquidos presentes en el residuo, así

como aguas de lluvias, etc., este líquido arrastra y por tanto contiene bacterias que facilitan la biodegradación de la materia orgánica en condiciones anaerobias.

En [www.Ambientum.com](http://www.Ambientum.com) (2007) se referencia que la composición media de estos líquidos varía considerablemente según áreas geográficas, edad del vertedero y tipo de residuo depositado en el mismo, pero todos coinciden en una alta carga orgánica (DQO y DBO5), su principal factor contaminante.

Los parámetros básicos de caracterización de un lixiviado son, además de los anteriormente citados, la concentración de sólidos disueltos y en suspensión, la dureza y concentración de fosfatos y nitratos, etc.

Por otro lado [www.upa.es](http://www.upa.es)(2010) se menciona que el biogás como material energético ha presentado en los últimos años un gran interés por sus múltiples aplicaciones, entre las que caben citar: producción de calor, electricidad, biocombustible para la automoción, pila de combustible y material para la elaboración de diferentes productos químicos como el H<sub>2</sub> y metanol.

Según <http://erenovable.com> (2000) las implicaciones del tratamiento biológico (digestión anaerobia) y la valorización energética de los residuos sobre el medio ambiente hay que analizarlas teniendo en cuenta tres aspectos fundamentales: reducción del volumen de residuos, reducción del volumen de emisiones y efluentes y generación de vapor y/o electricidad. Sin embargo la tecnología actual para la producción de este energético ocasiona una gran demanda en la utilización de agua, recurso natural limitante para muchas regiones agrícolas. Lo que limita la producción de biogás en dichas regiones.

Una alternativa de solución es el desarrollo de un nuevo sistema de producción denominado "fermentación en seco", el cual se basa en la fermentación bajo condiciones de baja humedad, para la generación de biogás.

La fermentación seca representa un interesante aporte a la producción de biogás, frente a los procesos por vía húmeda, por la nueva posibilidad de uso de algunos sustratos biológicos. La tecnología se encuentra todavía en fase inicial, pero posee sin embargo, un elevado potencial para el aprovechamiento energético de la biomasa fermentada producida en sectores como los municipios o la agricultura. La rentabilidad de las plantas depende, como en los procesos de vía húmeda, de marcos

legales específicos. Por lo general, en la fermentación seca de biomasa suelen ser las plantas grandes suelen ser más rentables que las pequeñas

La presente investigación tiene como fin principal el iniciar el estudio a nivel laboratorio de la técnica de fermentación en seco, para la generación de biogás, con la utilización de residuos de cosecha y estiércol de bobino.

### **Objetivo**

- ✓ Generar biogás a partir de la técnica de fermentación en seco utilizando residuos de cosecha y estiércol de bovino.

### **Hipótesis**

- ✓ Mediante la utilización de la técnica de fermentación en seco es posible la generación de biogas utilizando residuos de cosecha y estiércol de bovino.

# REVISIÓN DE LITERATURA

## Historia del biogás

WERNER (1983) menciona que desde hace siglos, la producción de biogás se viene realizando en países como China y la India. La obtención de biogás se realiza a través de la fermentación anaeróbica, es uno de los procesos biológicos más frecuentes usados por la naturaleza para descomponer los materiales orgánicos. En el se encuentran gases como metano, dióxido de carbono, hidrógeno y trazas de otros gases (pero no amoníaco).

<http://emison.es> (2010) cita que en el año 1890 se construye el primer biodigestor a escala real en la India y ya en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores que fermentaban los lodos cloacales de la ciudad.

Como cita [prosaponline.gov.ar](http://prosaponline.gov.ar) (2010), tras las guerras mundiales comienza a difundirse en Europa las llamadas fábricas productoras de biogás cuyo producto se empleaba en tractores y automóviles de la época. En todo el mundo se difunden los denominados tanques Imhoff para el tratamiento de aguas cloacales colectivas. El gas producido se lo utilizó para el funcionamiento de las propias plantas, en vehículos municipales y en algunas ciudades se lo llegó a inyectar en la red de gas comunal.

Por otra parte [abcpedia.com](http://abcpedia.com) (2010), establece que durante los años de la segunda guerra mundial comienza la difusión de los biodigestores a nivel rural tanto en Europa como en China e India que se transforman en líderes en la materia. Esta difusión se ve interrumpida por el fácil acceso a los combustibles fósiles y recién en la crisis energética de la década del 70 se reinicia con gran ímpetu la investigación y extensión en todo el mundo incluyendo la mayoría de los países latinoamericanos.

Los últimos 20 años han sido fructíferos en cuanto a descubrimientos sobre el funcionamiento del proceso microbiológico y bioquímico gracias al nuevo material de laboratorio que permitió el estudio de los microorganismos funcionales en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno).

Estos progresos en la comprensión del proceso microbiológico han estado acompañados por importantes logros de la investigación aplicada obteniéndose grandes avances en el campo tecnológico.

En [webdelcampo.com](http://webdelcampo.com) (2010), cita que los países generadores de tecnología más importantes en la actualidad son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU., Filipinas y Alemania. A lo largo de los años, la tecnología de la digestión anaeróbica se fue especializando abarcando actualmente muy diferentes campos de aplicación con objetivos muy diferentes.

La misma fuente cita que las plantas de tratamiento de desechos industriales, han tenido una importante evolución en los últimos años y habiendo superado una primera etapa a nivel piloto, en Europa y China se encuentran actualmente siendo difundidas para determinados fines en combinación con tratamientos aeróbicos convencionales. Estos reactores anaeróbicos son de enormes dimensiones (más de 1,000 m<sup>3</sup> de capacidad), trabajan a temperaturas mesofílicas (20°C a 40°C), o termofílicas (más de 40°C) poseen sofisticados sistemas de control y están generalmente conectados a equipos de cogeneración que brindan como productos finales; calor, electricidad y un efluente sólido de alto contenido proteico, para usarse como fertilizante o alimento de animales.

Continúa mencionando que la aplicación del biogás en el área rural ha sido muy importante, dentro de ella se pueden diferenciar dos campos claramente distintos. En el primero, el objetivo buscado es dar energía, sanidad y fertilizantes orgánicos a los agricultores de zonas marginales o al productor medio de los países con sectores rurales de muy bajos ingresos y difícil acceso a las fuentes convencionales de energía. En este caso la tecnología desarrollada ha buscado lograr digestores de mínimo costo y mantenimiento, fáciles de operar pero con eficiencias pobres y bajos niveles de producción de energía.

El segundo tipo de tecnología está dirigido al sector agrícola y agroindustrial de ingresos medios y altos. El objetivo buscado en este caso es brindar energía y solucionar graves problemas de contaminación. Los digestores de alta eficiencia desarrollados para esta aplicación tienen un mayor costo inicial y poseen sistemas que hacen más complejo su manejo y mantenimiento.

Ambos tipos de digestores se encuentran hoy día en continua difusión. Los reactores sencillos han tenido una amplia aceptación en China, India, Filipinas y Brasil;

debido a que en estos países se ejecutaron importantes planes gubernamentales que impulsaron y apoyaron con asistencia técnica y financiera su empleo. En el resto de los países del mundo la difusión alcanzada por este tipo de digestores no ha sido significativa

Con respecto a los digestores de alta eficiencia la mayoría se encuentran instalados en Europa (se estima un total de 500 digestores en los países de la CEE. ;( Comunidad Económica Europea); en el resto del mundo no se ha superado aún la etapa de unidades demostrativas o emprendimientos particulares aislados.

El relleno sanitario, práctica muy difundida en el mundo para eliminar las enormes cantidades de desperdicios generados en las grandes ciudades han evolucionado, incluyendo hoy en día modernas técnicas de extracción y purificación del gas metano generado, el cual en décadas pasadas generaba graves problemas entre los cuales figuraba el ambiental, por muerte de la vegetación que se encontraba en las zonas cercanas, malos olores que molestaban a los residentes y explosivas mezclas de gases que se acumulaban en los sótanos de la vecindad.

El avance de esta técnica ha permitido que importantes ciudades del mundo, como es el caso de Santiago de Chile en América Latina, incluyan un importante porcentaje de gas procedente de esta fuente en la red de distribución urbana de gas natural.

Todos los campos de aplicación analizados muestran que la tecnología bajo estudio se encuentra en una franca etapa de perfeccionamiento y difusión.

Las causas que motivarán y regularán su futura expansión se encuentran centradas en dos aspectos críticos del futuro como son la energía y la contaminación.

## **EL BIOGÁS A NIVEL MUNDIAL**

Encontrado en (bibliociencias.com) Asia es el continente que más instalaciones de biogás ha reportado. Desde 1973 se estableció la Oficina de Difusión del Biogás y posteriormente el Centro Regional de Investigación en Biogás para Asia y el Pacífico Sur adjunto al Ministerio de la Agricultura. En la República Popular China la situación actual en las zonas rurales se caracteriza por una grave escasez de energía donde alrededor de 130 millones de familias carecen de combustible para uso doméstico

durante tres meses del año. El 70 % de combustible para uso doméstico proviene de paja y tallos de cultivos. El estado solo puede solucionar el 13 % de las necesidades energéticas individuales para el sector rural. Actualmente funcionan en ese país aproximadamente 6,7 millones de instalaciones de este tipo.

En la India, país donde se construyó la primera instalación para producir biogás, en fecha cercana al año 1900, alrededor de 500 000 familiares utilizan plantas de biogás, para producir energía como sustituto del combustible doméstico.

En Europa existen alrededor de 564 instalaciones productoras de gas biológico que representan unos 269 000 m<sup>3</sup> de digestores. De estas 174 000 m<sup>3</sup> digestores corresponden a instalaciones industriales. El resto, 95 000 m<sup>3</sup> de digestores corresponden a instalaciones agrícolas. Al inicio el desarrollo del biogás fue más fuerte en la zona rural. Hoy el tratamiento de desechos municipales mediante instalaciones productoras de energía y abonos llevan el peso fundamental en el desarrollo de esta tecnología donde se trabaja fuertemente por lograr cada día una eficiencia más óptima de procesos con tiempo de retención extremadamente bajos.

En Estados Unidos existen algunas plantas de biogás de gran tamaño y que funcionan bien <http://books.google.com.mx> (2006). Otra instalación significativa resulta la de una planta de biogás construida para el procesamiento de excreta de vacas lecheras en la ciudad de Monroe, y Washington. Esta instalación posee un digestor de 190m<sup>3</sup> de capacidad comenzó a trabajar en 1977 concebida para 200 vacas estabuladas. (OLADE organización latinoamericana de energía).

## **SITUACIÓN DEL BIOGÁS EN MÉXICO**

Según la comisión reguladora de energía (2003) citada por Transforma (2003) el biogás (también conocido como Biomasa) es una opción que ha tenido una buena aceptación como fuente alterna de energía, ya que presenta importantes ventajas económicas y ambientales. El costo nivelado de esta tecnología es de entre 5 y 8 centavos de USD/kWh, lo cual podría considerarse relativamente alto con respecto a otras fuentes de generación (incluso las alternas). Sin embargo, debe considerarse que este costo ya incluye el desarrollo y equipamiento del relleno sanitario. Pese a lo

elevado de su costo, debe tomarse en cuenta que independientemente de la decisión de construir una central de biogás, la basura debe confinarse en un relleno sanitario debido a que en la actualidad los tiraderos a cielo abierto no son permitidos. En otras palabras, se puede obtener un beneficio a partir de una actividad obligatoria, como la disposición de la basura en un relleno sanitario para cumplir con las normas ecológicas.

Saldaña (2003) citado en The International Conference on Technology Policy and Innovation, habla sobre el Sistema Metropolitano de Procesamiento de Desechos Sólidos (SEMIOPRODESO) que en conjunto con una empresa de la Iniciativa Privada ha desarrollado un proyecto que generará energía para alumbrar a varios municipios del Estado de Nuevo León mediante la correcta utilización del biogás.

Por otra parte las energías renovables en México y el mundo (2005), el biogás también se produce en rellenos sanitarios, que contienen gran proporción de desechos orgánicos húmedos, y en donde existen las condiciones adecuadas para que proliferen las bacterias 40 anaerobias que al digerir esos desechos producen el metano y el bióxido de carbono en el interior del relleno, por ejemplo, un relleno sanitario de la Ciudad de México con 5.6 millones de toneladas de residuos sólidos produce suficiente biogás para alimentar una planta de 5 MW de capacidad para operar durante 10 años.

## **PERSPECTIVAS DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA ANAEROBIA A NIVEL MUNDIAL**

Pichardo (1986) así como Fiesta y Borja (1991), citan que en muchas partes del mundo existen y se producen enormes cantidades de residuos agropecuarios, de las industrias azucareras y sus derivados y de la alimenticia, de origen urbano (sólidos y líquidos), etc., que contribuyen seriamente a la contaminación ambiental, fundamentalmente de las aguas superficiales y subterráneas, por lo que se hace imprescindible purificar estos residuos antes de su vertimiento al medio ambiente.

La aplicación de los procesos anaerobios tiene interesantes perspectivas ya que, no solo se podían alcanzar resultados positivos en la mejora del medio ambiente, sino que, además, se obtendrían cantidades importantes de biogás para múltiples



usos, esto permitiría amortizar en parte o en algunos casos totalmente, la inversión de no solo el proceso anaerobio sino también de la planta de tratamiento de residuales que se construya para depurar estos.

Hulshoff Pol (1998), menciona que la aplicación de la digestión anaerobia como método de tratamiento de la fracción orgánica de los residuales sólidos municipales ha evolucionado en Europa de una capacidad de 122,000 toneladas por año en 1990 a 1,023,000 toneladas en el 2001. Sin embargo, esto representa, solo el 0.7 % de la cantidad de la fracción orgánica total producida en Europa.

Hashimoto (1992) y Carty (1994) citan que como subproducto del proceso anaeróbico, en la mayoría de las ocasiones se obtiene un lodo con propiedades de biofertilizantes, que resulta en ciertos casos hasta más valioso desde el punto de vista económico que el biogás obtenido en el proceso, si se tienen en cuenta los problemas de contaminación secundaria que generan los fertilizantes químicos, que además resultan caros, y por otra parte, estos no sirven como acondicionadores de suelo, propiedad que sí presentan los biofertilizantes. Esta propiedad adquiere una importancia muy significativa en los suelos tropicales y subtropicales debidos a la rápida degradación que experimentan las tierras cultivables bajo estas condiciones climáticas. Las temperaturas en estas regiones permitirían aprovechar la mayoría del volumen de biogás generado en el proceso anaerobio, ya que este requeriría poco calentamiento para alcanzar las temperaturas requeridas para llevarlo a cabo las cuales se encuentran entre 32 y 37°C como óptimas en el rango mesófilo.

Smart y Boyko (1977), citan que en otras regiones esto constituye una limitante para el proceso principalmente en los países fríos, ya que el biogás producido tiene que ser utilizado en su mayor parte en el propio proceso para auto mantenerlo energéticamente. Sin embargo para los países tropicales y subtropicales en vías de desarrollo donde existen condiciones de clima muy favorables para la biometanogénesis y que, en su mayoría posee limitados recursos energéticos, esto es favorable.

### **Definición de biogás**

El sitio [www.proyectosfindecarrera.com](http://www.proyectosfindecarrera.com)(2006), considera que con el término biogás se designa a la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias.

El biogás se produce en un recipiente cerrado o tanque denominado biodigestor el cual puede ser construido con diversos materiales como ladrillo y cemento, metal o plástico. El biodigestor, de forma cilíndrica o esférica posee un ducto de entrada a través del cual se suministra la materia orgánica (por ejemplo, excremento animal o humano, las aguas sucias de las ciudades, residuos de matadero) en forma conjunta con agua, y un ducto de salida en el cual el material ya digerido por acción bacteriana abandona el biodigestor. Los materiales que ingresan y abandonan el biodigestor se denominan afluente y efluente respectivamente. El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás.

El proceso de digestión que ocurre en el interior del biodigestor libera la energía química contenida en la materia orgánica, la cual se convierte en biogás (gas metano). Este gas se puede utilizar para cocinar, como fuente de energía eléctrica, etc. Y es un tipo de energía renovable no contaminante. En nuestro país no es una forma de energía muy difundida, pero su uso es muy generalizado en China e India, donde por medio de tanques (biodigestores) construidos para producir metano, se han solucionado (por lo menos en gran parte), las necesidades de combustibles para fines domésticos en áreas rurales.

En otra definición según [www.planthogar.net](http://www.planthogar.net) (2009) define el término biogás como la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias. La composición de biogás depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. Los principales componentes del biogás son el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Aunque la composición del biogás varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se presenta a continuación.

- Metano,  $\text{CH}_4$  54 - 70% volumen
- Bióxido de carbono,  $\text{CO}_2$  27 – 45%
- Hidrógeno,  $\text{H}_2$  1 - 10%
- Nitrógeno,  $\text{N}_2$  0.5 – 3%
- Acido Sulfhídrico,  $\text{H}_2\text{S}$  0.1%

## Características del biogás

Según el sitio [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com) (2007), se llama biogas a la mezcla constituida por metano CH<sub>4</sub> en una proporción que oscila entre un 50% a un 70% y dióxido de carbono conteniendo pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. Sus características han sido resumidas en el cuadro siguiente:

**CUADRO No. 1 ALGUNAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL BIOGÁS**

CARACTERÍSTICAS	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> S	OTROS	BIOGAS 60/40
Proporciones % Volumen	55-70	27-74	1	3	100
Valor Calórico MJ/m <sup>3</sup> kCal/m <sup>3</sup>	35,8 8600	-- --	10,8 2581	22 5258	21,5 5140
Ignición % en aire	5-15	-- --	--	--	6-12
Temperatura de ignición °C	650-750	-- --	--	--	650-750
Presión crítica en Mpa	4,7	7,5	1,2	8,9	7,5-8,9
Densidad nominal en g/l	0,7	1,9	0,08	--	1,2
Densidad relativa	0,55	2,5	0,07	1,2	8,3
Inflamabilidad Vol. en % aire	5-15	--	--	--	6-12

FUENTE: [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com) (2007)

Según (Werner 1989), la condensación del vapor es con frecuencia un problema debido a que el biogás está generalmente más tibio que las cañerías por donde pasa, por lo tanto es esencial una trampa de agua y puntos de drenaje en la tubería.

Por su parte el sitio [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com)(2000), el hidrógeno es un intermediario en el metabolismo anaeróbico y algunas bacterias pueden producir

trazas de CO. La presencia de nitrógeno y/o oxígeno puede indicar una entrada accidental de aire y esto constituye un grave peligro debido al riesgo de explosiones. El oxígeno es consumido por los microorganismos facultativos dejando el nitrógeno residual, tanto el azufre orgánico, presente por ejemplo en algunos aminoácidos y el inorgánico pueden ser reducidos a H<sub>2</sub>S, un gas muy tóxico y altamente reactivo con los metales tales como hierro y cobre, originando corrosión. Esta reactividad hace que su contenido sea muy bajo en el gas de los rellenos sanitarios.

Por otra parte el amonio liberado por ejemplo durante la diseminación de las proteínas, permanece en solución.

El cuadro siguiente resume la composición promedio del biogás según la fuente citada [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com) (2009).

**CUADRO No. 2. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS DERIVADO DE DIVERSAS FUENTES.**

Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Propiedades
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-65%	Combustible
CO <sub>2</sub>	30-50%	20-50%	30-50%	34-55%	Acido, asfixiante
Vapor de agua	saturación	saturación	saturación	Saturación	corrosivo
Hidrógeno	0-2%	0-5%	0-2%	0-1%	Combustible
H <sub>2</sub> S	100-7000ppm	0-1%	0-8%	0,5-100ppm	Corrosivo, olor, tóxico
Amoniaco	trazas	Trazas	trazas	Trazas	Corrosivo
CO	0-1%	0-1%	0-1%	Trazas	Toxico
Nitrógeno	0-1%	0-3%	0-1%	0-20%	inerte
Oxígeno	0-1%	0-1%	0-1%	0-5%	corrosivo
Orgánicos	trazas	Trazas	trazas	5ppm	Corrosivo, olores

**Composición del biogás**

Los principales componentes del biogas son el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Aunque la composición del biogas varía de acuerdo a la biomasa utilizada, su composición aproximada se representa a continuación:

### CUADRO No. 3. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIOGÁS

Metano, CH <sub>4</sub>	40-70% volumen
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	30-60%
Sulfuro de hidrógeno, H <sub>2</sub> S	0-3%
Hidrógeno, H <sub>2</sub>	0-1%

FUENTE: <http://www.cubasolar.cu>(2009)

El metano es el principal componente del biogás, es el gas que le confiere las características combustibles del mismo. El valor energético del biogás por lo tanto está determinado por la concentración de metano el cual es de alrededor de 20-25 MJ/m<sup>3</sup>, comparado con 33-38 MJ/m<sup>3</sup>, para el gas natural. Si deseamos mejorar el valor calorífico del biogás debemos limpiarlo del CO<sub>2</sub>. Por su parte [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com) (2001) establece que el valor calorífico varía entre 17 y 34 MJ/m<sup>3</sup> según el contenido de metano.

#### Propiedades del biogás

- Densidad 0,8 a 1,2 (/aire)
- Incoloro, fuerte olor, tóxico,
- Combustible.

#### Valor calorífico del biogás y del gas natural

A continuación se presenta el valor calorífico del biogás dependiendo de la concentración de metano.

### CUADRO NO. 4 VALOR CALORÍFICO DEL BIOGAS

Valor Calorífico	Biogás (65% de CH <sub>4</sub> )	Biogás (55% de CH <sub>4</sub> )	Gas natural
Valor calorífico superior KWh/m <sup>3</sup> STPa	7.1	6.0	12.0
Valor calorífico inferior KWh/m <sup>3</sup> STPa	6.5	5.5	10.8

FUENTE: <http://www.textoscientificos.com> (2010)

## Usos del Biogás

El biogás producido en procesos de digestión anaerobia puede tener diferentes usos:

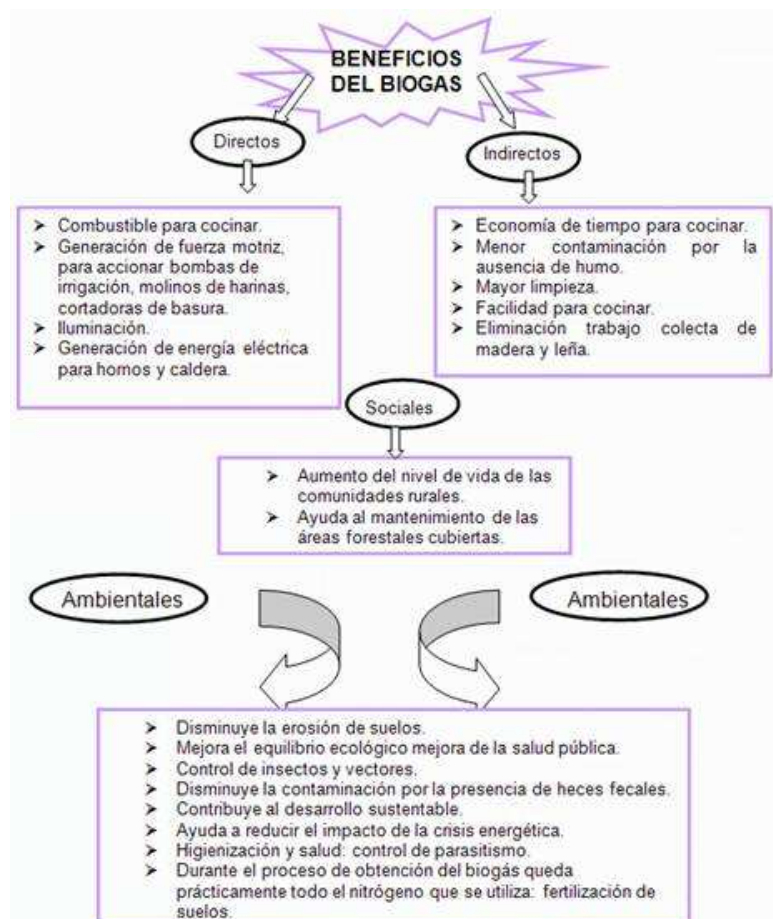
- En una caldera para generación de calor o electricidad.
- En motores o turbinas para generar electricidad.
- En pilas de combustible, previa realización de una limpieza de H<sub>2</sub>S y otros contaminantes de las membranas.
- Purificarlo y añadir los aditivos necesarios para introducirlo en una red de transporte de gas natural.
- Uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como es el metanol o el gas natural licuado.
- Combustible de automoción.

Angelidaki *et al* (1997); Ahring y Angelidaki, (1997), establecen que con la baja de los precios del petróleo, a finales de los años ochenta, el interés por la tecnología de digestión anaerobia volvió a decaer, aunque en algunos países industrializados se han desarrollado importantes programas de desarrollo de plantas anaerobias a escala industrial, teniendo como objetivos principales la gestión de residuos,7 principalmente ganaderos, la estabilización e higienización de los mismos y el fomento de las energías renovables, para disminuir la emisión neta de gases de efecto invernadero. El principal exponente es Dinamarca, donde, en 1985, comenzó un programa demostración, desarrollado conjuntamente por los ministerios de agricultura, energía y medio ambiente, en un esfuerzo por demostrar el potencial de grandes plantas de digestión anaerobia como productores de energía eléctrica. Así, en 1997 se contabilizaban 19 grandes plantas que tratan conjuntamente residuos de origen industrial, residuos urbanos, lodos de depuradora y residuos ganaderos, aunque en el año 2000 los objetivos eran duplicar la producción y continuar con el incremento hasta el año 2030.

## Beneficios de la tecnología del Biogas

Como se menciona en <http://www.oni.escuelas.edu.ar> (2002) Los sistemas de biogás pueden proveer beneficios a sus usuarios, a la sociedad y al medio ambiente en general:

- Producción de energía (calor, luz, electricidad).
- Transformación de desechos orgánicos en fertilizante de alta calidad.
- Mejoramiento de las condiciones higiénicas a través de la reducción de patógenos, huevos de gusanos y moscas.
- Reducción en la cantidad de trabajo relacionado con la recolección de leña para cocinar (principalmente llevado a cabo por mujeres).
- Ventajas ambientales a través de la protección del suelo, del agua, del aire y la vegetación leñosa, reducción de la deforestación.
- Beneficios micro-económicos a través de la sustitución de energía y fertilizantes, del aumento en los ingresos y del aumento en la producción agrícola-ganadera.
- Beneficios macro-económicos a través de la generación descentralizada de energía, reducción en los costos de importación y protección ambiental.



**Figura No.1. Beneficios del Biogás**

Fuente: <http://www.google.com> (2010)

Por lo tanto, la tecnología del biogás puede contribuir sustancialmente a la conservación y el desarrollo. Sin embargo, el monto de dinero requerido para la instalación de las plantas puede ser en muchos casos prohibitivo para la población rural. Por ello, se deben concentrar los esfuerzos en desarrollar sistemas más baratos y en proveer a los interesados de créditos u otras formas de financiación. El financiamiento del gobierno podría verse como una inversión para reducir gastos futuros relacionados con la importación de derivados del petróleo y fertilizantes inorgánicos, con la degradación del medio ambiente, y con la salud y la higiene.

Citado por <http://mecanotecnia.blogspot.com> (2008) Para amortizar la inversión inicial, la planta debe funcionar por 2 años por lo menos. En realidad, el verdadero beneficio será evaluado por cada propietario en particular, ya que dependerá del valor y cantidad de combustible que reemplaza el biogás o el costo de la energía reemplazada.

Estas instalaciones tienen como ventaja su elevada vida útil (pueden llegar como promedio a (20 años), siempre que se realice un mantenimiento sistemático. Estos sistemas poseen como desventaja el alto costo de la inversión inicial; por ejemplo, una instalación de 5 m<sup>3</sup>, que permite la elaboración de alimentos para familias de cuatro personas, tiene una inversión inicial de 700 a 900 USD, lo que ha impedido su generalización en América Latina.

Otro tipo de planta de producción de biogás que ha logrado disminuir los costos hasta 30% con respecto a los prototipos tradicionales es la que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija, y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales, la cual se ilustra en la figura siguiente:



**Figura 2. Ejemplo de digester con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.**



Este tipo de instalación posee a su favor que resulta más económica que los sistemas tradicionales; por ejemplo, una instalación de 4m<sup>3</sup> puede costar aproximadamente 550 USD y la estructura de polietileno flexible puede llegar a alcanzar hasta diez años de vida útil. Las instalaciones industriales de producción de biogás emplean tanques de metal que sirven para almacenar la materia orgánica y el biogás por separado, estas son mucho más costosas y de difícil acceso a los pobladores de los países subdesarrollados.

## **ANÁLISIS DE LAS FUENTES ORGÁNICAS PARA LA PRODUCCION DE BIOGAS.**

Los residuos empleados como materia prima para la obtención del Biogás son los siguientes:

### **a) Residuos Ganaderos.**

La digestión anaerobia en este proceso es una tecnología importante para tratar los residuos producidos en explotaciones ganaderas intensivas con alta concentración de ganado. No obstante y debido a la competencia de otras tecnologías, como el secado térmico de abono empleando gas natural como combustible, esta aplicación tiene en nuestro país un nivel de utilización muy bajo.

### **b) Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos.**

Estos residuos pueden emplearse para producir Biogás de dos maneras principales:

A través de la desgasificación de vertederos o mediante la digestión anaerobia en bioreactores. En el primer caso se trata de una tecnología aplicable a partir de un volumen de capacidad de 200-250 t/ día de capacidad; la digestión anaerobia de los residuos de bioreactores se trata de una tecnología que hoy por hoy resulta menos atractiva por el manejo del compostaje anaerobio.

### **c) Residuos Industriales Biodegradables.**

El empleo de tecnologías de digestión anaerobia para el tratamiento de los residuos biodegradables generado por industrias como las cervecera, azucarera, alcoholera, láctea, oleícola, etc., es bastante común en nuestro país y sus perspectivas de desarrollo son consistentes pero nulas debido a que este tipo de tecnologías no están insertas dentro del propio proceso industrial.

#### **d) Lodos de Depuración de Agua Residuales Urbanas.**

Los lodos de depuración procedentes de los tratamientos primarios y secundarios que se realizan en las estaciones depuradoras de aguas residuales pueden someterse a tecnologías de digestión anaerobia para producir Biogás, lo que resulta interesante, cuando se trata de considerar una aplicación energética del Biogás producido se trata a partir de la cifra de 100.000 habitantes.

En la actualidad la evolución de este sector de tratamiento de residuos en nuestro país es muy lenta, aunque ya se empieza a utilizar el Biogás generado a partir de este residuo, y se le da cada vez mayor importancia, reduciendo así la dependencia de hidrocarburos.

#### **ASPECTOS AMBIENTALES.**

El uso del biogás es la parte final de un proceso de tratamiento de residuos en el que se procura el beneficio del sector ambiental, aspecto de gran importancia a nivel internacional. En primer lugar los sistemas de gestión del residuo biodegradable suponen la implementación de medidas que evitan las diversas contaminaciones y posibles afecciones al medio acuático de estos residuos.

Por otro lado la aplicación energética supone el aprovechamiento de un recurso contaminante y degradante del medio ambiente, en cuya composición el metano es un componente importante. Este gas de efecto invernadero, cuya incidencia en el medio es muy superior a la del CO<sub>2</sub>, es quemado en motores o calderas y parte de instalaciones en las que los sistemas de limpieza y depuración de gases aseguran que las emisiones a la atmosfera se encuentren siempre por debajo de los límites permitidos por la legislación.

La mejora de la eficiencia energética es otro aspecto muy ligado a la defensa del medio ambiente. Desde el punto de vista productivo el tratamiento mediante digestión anaerobia de los residuos resulta una alternativa especialmente interesante para Biogás, ya que a partir de excedentes de explotaciones intensivas se puede producir y reutilizar, en especial, frente a la alternativa de su secado térmico empleando gas natural como combustible.

Existen no obstante afecciones sobre el medio inherente al establecimiento y explotación de una instalación de estas características. Entre ellas se encuentra su impacto paisajístico y la posible existencia de malos olores relacionado con la gestión del residuo. Sin embargo en la actualidad se cuenta con la posibilidad de desarrollar medidas correctivas de estos aspectos que limiten o incluso eliminen su impacto ambiental.

Otro de los puntos importantes a nivel internacional es el de los llamados bonos de Carbono en los cuales los países desarrollados y altamente contaminantes darán una cantidad de dinero a países que se dedique a restaurar el medio ambiente.

**CUADRO No.5. ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES MUNDIALES DE METANO.**

<b>Continente</b>	<b>Residuos (106t/año).</b>	<b>Emisiones de CH4 (109 kg/año).</b>	<b>Emisiones de CH4 (109m3n/año).</b>
<b>África</b>	78	1.7	106
<b>Asia</b>	390	5.2	325
<b>Europa</b>	230	6.2	388
<b>América</b>	390	20	1250
<b>Australia y Oceanía</b>	14	0.5	31
<b>Total</b>	<b>1.102</b>	<b>34.0</b>	<b>2.125</b>

Fuente: Agencia Internacional de Energía, Contribución de renovables para la seguridad energética, 2007

**BARRERAS EN LA FASE DE APLICACIÓN DE BIOGÁS:**

**Elevadas inversiones.**

El interés fundamental de desarrollar proyectos de uso energético de biogás como parte de una motivación ambiental y no energética. Ello es así por la propia naturaleza de los proyectos ligados al tratamiento de un residuo, pero también por las altas inversiones por unidad de potencia instalada. Estas provocan además que los proyectos sean variables solo a partir de determinada escala de tratamiento de residuos.

## **Falta de Información.**

Debido a la gran controversia que se tiene la sobre la idea que el Biogás se produce con alimentos o biocombustibles, en el caso de la legislación mexicana se promueve a través de la ley para la promoción y desarrollo de biocombustibles de segunda generación que consiste en el uso de excedentes que no sean alimentos tales como residuos que no sean alimentos tales como residuos forestales, productos forestales, residuos sólidos orgánicos, bagazo de caña, etc.

## **Tecnología Idónea.**

Energías renovables para el desarrollo sustentable en México, Secretaria de Energía, México, (2006), Capítulo 7 y 8 citan que en el caso de México es muy dado a la compra de tecnologías, cuando se adquiere está viene con las características de fabricante y del país donde se desarrolla, aunque suelen no ser las mas adecuadas, también cabe recalcar que hay instituciones Mexicanas con tal buen nivel ingenieril que son capaces de generar tecnologías que beneficien al país con costos mas bajos y materiales de alta resistencia a las condiciones de uso.

## **Condiciones para la biodigestión.**

Las condiciones para la obtención de metano en el digestor son las siguientes:

1. Temperatura entre los 20°C y 60°C
2. pH (nivel de acidez/ alcalinidad) alrededor de siete.
3. Ausencia de oxígeno.
4. Gran nivel de humedad.
5. Materia orgánica
6. Que la materia prima se encuentra en trozo más pequeños posible.
7. Equilibrio de carbono/ nitrógeno.

## **Temperatura**

Mata-Álvarez (2003), establecen que además de una fuente de carbono orgánico, los microorganismos requieren de nitrógeno, fósforo y otros factores de

crecimiento que tienen efectos complejos. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes. Sin embargo, la deficiencia de nutrientes no debe ser un problema con los alimentos concentrados, pues estos aseguran en más que suficientes las cantidades de nutrientes.

Monnet, (2004) cita que por otra parte, la descomposición de materiales con alto contenido de carbono ocurre más lentamente, pero el período de producción de biogás es más prolongado. Los materiales con diferentes relaciones de C:N difieren grandemente en la producción de biogás. Por ejemplo, la relación de C:N en residuales porcinos es de 9 a 3; en vacunos de 10 a 20; en gallinas de 5 a 8; para humanos es de 8 y para residuos vegetales es de 35. La relación óptima se considera en un rango de 30:1 hasta 10:1, una relación menor de 8:1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio.

Verma, (2002), menciona que existen tres rangos de temperatura para la digestión de residuales, el primero es el mesofílico (de 20 a 45 °C), el segundo es el termofílico (por encima de 45 °C). El óptimo puede ser de 35 °C a 55 °C. La ventaja de la digestión termofílica es que la producción de biogás es aproximadamente el doble que la mesofílica, así que los biodigestores termofílicos pueden ser la mitad en volumen que los mesofílicos, manteniendo su eficiencia general.

Según [www.uasb.edu.ec/](http://www.uasb.edu.ec/) se han realizado numerosos trabajos sobre la digestión termofílica en países templados. Sin embargo, se requieren considerables cantidades de energía para calentar los residuales hasta 55 °C. El tercer rango (psicrofílico) ocurre entre los 10 y 25 °C. Existen algunas restricciones para el uso de esta temperatura en la digestión anaerobia, como son la necesidad de utilización de: reactores anaerobios de cama fija, inóculos mesofílicos, un tiempo de retención alto y mantener una acidificación baja.

## **PH**

German Appropriate Exchange (2005) cita que la producción de gas esta en relación con el pH del efluente, es decir, las bacterias productoras de gas o metanogénicas son mas sensibles a los cambios bruscos en el pH que las bacterias acidificadoras participantes en el proceso, además que, un aumento en el pH es índice de exceso de amoníaco; en tanto que una disminución en el mismo es índice en contenido de ácidos orgánicos. Ambos factores provocan una disminución en la producción de biogas.

## **Nutrientes**

Los compuestos tóxicos incluso en bajas concentraciones, afectan la digestión y disminuyen los niveles de metabolismo. Las bacterias metanogénicas son generalmente las más sensibles, aunque todos los grupos pueden ser afectados.

Un nutriente esencial también puede ser tóxico si su concentración es muy alta. En el caso del nitrógeno, mantener un nivel óptimo para garantizar un buen funcionamiento sin efectos tóxicos es particularmente importante. Por ejemplo, en alimentos de alto contenido de proteína para el ganado, un desbalance por altos contenidos de nitrógeno y bajas disponibilidades energéticas, causa toxicidad por generación de amonio. Usualmente, el nivel de amonio libre debe ser mantenido en 80 ppm. Sin embargo, una concentración más alta, alrededor de 1500-3000 ppm, puede ser tolerada.

Se debe tener precaución para evitar la entrada al biodigestor de ciertos iones metálicos, sales, bactericidas y sustancias químicas sintéticas. Se reportado la reducción de gas cuando son utilizadas excretas de animales tratados con antibióticos.

## **Toxicidad**

Este parámetro es calculado como la materia seca total (MS) o materia orgánica (MO) que es cargada o vertida diariamente por metro cúbico de volumen de biodigestor. La MO o sólidos volátiles (SV) se refiere a la parte de la MS o sólidos totales (TS), que se volatilizan durante la incineración a temperaturas superiores a 500 0C. Los SV contienen componentes orgánicos, los que teóricamente deben ser convertidos a metano. Los residuales de animales pueden tener un contenido de MS mayor del 10 % de la mezcla agua estiércol. Según los requerimientos operacionales para un reactor anaerobio, el contenido de MS no debe exceder el 10 % de la mezcla agua estiércol en la mayoría de los casos. Por eso, los residuales de granjas se deben diluir antes de ser tratados.

La eficiencia de la producción de biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de MS o SV. La fermentación de biogás requiere un cierto rango de concentración de MS que es muy

amplio, usualmente desde 1% al 30%. La concentración óptima depende de la temperatura. En China, la concentración óptima es del 6% en el verano a temperaturas entre 25-27 0C y entre 10 y 12 % en la primavera a temperaturas de 18-23 0C.

### **Acidez**

Este factor indica cómo se desenvuelve la fermentación. Se mide con un valor numérico llamado pH, que en este el valor es 7, o sea es neutro. Por encima de este número significa alcalinidad; por debajo, acidez. Cuando los valores superan el pH 8, indica una acumulación excesiva de compuesto alcalino, la carga corre riesgo de putrefacción. Los valores inferiores a 6 indican una descompensación entre las fases ácidas y metanogénica, pudiendo bloquearse esta última.

### **Relación Carbono- Nitrógeno (C:N)**

Rittman, (2001) menciona que en todos los sistemas de tratamiento biológico, se deben tener los nutrientes necesarios para satisfacer los requerimientos de crecimiento de los microorganismos. Entre los nutrientes inorgánicos requeridos para el crecimiento, los principales son el nitrógeno y el fósforo. El nitrógeno representa alrededor de 12% en peso de la célula, mientras que el fósforo supone el 2%. El nitrógeno debe estar en forma reducida ( $\text{NH}_3$  o nitrógeno orgánico) para el tratamiento anaerobio ya que como nitrato o nitrito es más probable que se pierda por desnitrificación en el entorno anaerobio, se recomienda que la adición de nitrógeno sea con cloruro de amonio.

Ostrem (2004) establece que la relación C:N es una medida de las cantidades relativas de carbón orgánico y de nitrógeno presentes en la materia de base. Esta relación depende del tipo de residuos que se integren al proceso de DA, por ejemplo, los residuos sólidos vegetales (RSV) contribuyen más con carbono y los residuos cárnicos son altos en nitrógeno. Sabiendo que la relación óptima C: N es entre 20 y 30, la mayoría de las fuentes han citando 25 como el nivel ideal.

### **Co-digestión**

Mata-Álvarez (2003) establece que una opción interesante para mejorar producciones de biogás por DA de RSO es la co-digestión. Es decir, el uso de un co-

substrato, que en la mayoría de los casos mejora las producciones de biogás debido a los sinergismos y la fuente de alimentación que falta en el proceso y que es proporcionada al adicionar co-substratos (Weiland, 2003). Además, las ventajas económicas derivadas son absolutamente significativas. El uso de un co-substrato puede también ayudar a establecer el contenido de agua requerida para alimentar el proceso de DA y contribuir con efecto amortiguador en el pH.

Las ventajas de la co-digestión se han citado desde hace algún tiempo, por ejemplo, Mata-Álvarez *et al.*, (1990) reportan trabajos de co-digestión de la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales (FORSM) con lodo de aguas residuales en digestores establecidos. Ambos residuos se producen en cantidades grandes y en varios lugares, la mayoría de las investigaciones sobre la DA se han centrado en este punto. Por otro lado Bohn *et al.*, (2007) menciona que cuando se usan co-sustratos de residuos agrícolas que incluyen estiércol y residuos de cosechas incrementan la producción de biogás; estas mezclas son utilizadas en más del 90% de los digestores. Diferentes tipos de residuos, principalmente de la industria agroalimentaria, se han estudiado como posibles con substratos para la digestión de residuos ganaderos. Ahring y Angelidaki (1997) estudiaron la viabilidad de la codigestión de estiércol con residuos de la elaboración de piensos. Debido al alto contenido en nitrógeno de este producto, inicialmente se produce la inmediata inhibición del proceso de digestión, aunque finalmente los microorganismos son capaces de aclimatarse, disminuyendo la concentración de ácidos grasos volátiles y produciendo una alta y constante producción de biogás. La codigestión aumenta además, el índice de producción de biogás del estiércol (Angelidaki *et al.*, 1997).

La digestión anaerobia de mezclas de diferentes tipos de residuos ha dado buenos resultados a escala laboratorio y en algunos casos a escala industrial, tal como se observa en la literatura, donde se ha reportado buenos resultados para mezclas de varios tipos de residuos de industrias cárnicas y mataderos (ricos en grasas), consiguiendo altas producciones de metano, del orden de 47 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> de residuo introducido (Brinkman, 1999). También ha dado buenos resultados la co-digestión de lodos de depuradora y la fracción orgánica de residuos municipales, (Di Palma *et al.*, 1999; Hamzawi *et al.*, 1998) y la mezcla de residuos sólidos urbanos, principalmente a base de restos de vegetales y aguas residuales urbanas (Edelmann *et al.*, 1999), así como de lodos de depuradora y residuos de frutas y vegetales (Dinsdale *et al.*, 2000). La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla



completa es una metodología exitosa tanto en rango termofílico como en el mesofílico (Brinkman, 1999).

La co-digestión de estiércol con residuos orgánicos industriales ha sido extensa, por ejemplo en Dinamarca existen alrededor de 20 plantas operando desde finales de los 80's, con resultados muy interesantes (Danish Energy Agency, 1995). Los resultados positivos en los estudios realizados por Demirekler y Anderson, 1998; Di Palma *et al.*, 1999; Edelmann *et al.*, 1999; Converti *et al.*, 1997; Poggi-Varaldo *et al.*, 1997; Sundararajan *et al.*, 1997; Grian *et al.*, 1998; Ahring y Angelidaki, 1997, que han aplicado la codigestión, genera gran interés por desarrollar esta tecnología. En cuanto a la operación de un sistema anaerobio piloto se consideran además, otros factores que influyen en proceso de DA, como son el tiempo de retención hidráulico y la carga orgánica (Ostrem, 2004).

### **Tiempo de retención hidráulico**

Monnet (2004) citan que el tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo que se mantiene la MO dentro del digestor, varía con los parámetros del proceso, tales como temperatura y composición de los residuos. Bajo condiciones mesofílicas el rango es de 15 a 30 días y en condiciones termofílicas es de 12-14 días.

### **Carga orgánica**

VanRollegham (2003) menciona que un parámetro final de control es la carga orgánica ya que si se pretende que el proceso sea continuo, es importante determinar la cantidad de materia orgánica a agregar en un determinado TRH, de lo contrario se excede la carga orgánica, ocasionando que el proceso se desestabilice debido a que las bacterias acidogénicas producirían ácidos rápidamente y las metanogénicas no podrían consumir éstos ácidos a la misma velocidad de producción. Si el pH disminuyera se inhiben las bacterias metanogénicas y se detiene el proceso de DA. Un indicador de esto sería la baja producción de biogás en un pH ácido, aunque existen otros parámetros que pueden ser supervisados como la presión parcial de H<sub>2</sub>, presencia bacteriana, contenido de nutrientes, la presencia de intermediarios que puedan resultar tóxicos, contenido de sólidos y formación de metano. Cada uno de

éstos significaría una desviación del equilibrio que daría advertencia de lo que estaría sucediendo en el proceso, permitiendo establecer etapas de restauración antes de que muchas bacterias mueran.

## **CRITERIOS PARA CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE UN BIODIGESTOR**

Los siguientes son los aspectos a tener en cuenta en el diseño, planificación y construcción de un biodigestor:

### **Factores humanos**

- Idiosincrasia
- Necesidad, la cual puede ser sanitaria, energía y de fertilizantes.
- Recursos disponibles de tipo económicos, materiales de construcción, mano de obra, utilización del producto, área disponible.
- Disponibilidad de materia prima, si se cuentan con desechos agrícolas, desechos pecuarios, desechos domésticos, desechos urbanos, desechos industriales.

### **Factores biológicos**

- Enfermedades y plagas tanto humanas como pecuarias y agrícolas

### **Factores físicos**

- Localización, la ubicación si es en zona urbana, rural o semi-urbana y la geografía aspectos como la latitud, longitud y altitud.
- Climáticos dentro de estos aspectos están las temperaturas máximas y mínimas, la precipitación pluvial, la humedad ambiental, la intensidad solar, los vientos su intensidad y dirección.
- Vías de acceso.
- Topografía, teniendo en cuenta el declive del suelo: si es plano, ondulado, o quebrado.
- Suelos con sus características como la textura, estructura, nivel freático y capacidad agrológica.

## **Factores de construcción**

- Técnicas de construcción si es de tierra compactada, cal y canto o ladrillo (barro cocido, suelo-cemento, silicio-calcáreo), planchas prefabricadas, ferrocemento, concreto, módulos prefabricados.

## **Factores utilitarios**

- Función principal, si se construye de manera experimental, demostrativa o productiva.
- Usos, si el uso es de tipo sanitario, energético, fertilizante, integral.
- Organizativo si el biodigestor se va a construir a escala domestica, para grupo familiar, comunitario o empresas.
- Capacidad, si es pequeño de 3 a 12 m<sup>3</sup> / digestor; si es mediano de 12 a 45 m<sup>3</sup> digestor y si es grande de 45 a 100 m<sup>3</sup> / digestor.
- Operación de la instalación contemplando aspectos como el funcionamiento de el pre tratamiento, la mezcla, la carga, y controles de PH, obstrucciones de líquidos, sólidos y gases: las descargas de efluentes tanto liquidas como gaseosas y de lodos; el almacenamiento de los líquidos, sólidos y gases; la aplicación de líquidos por bombeo, por tanques regadores o arrastre por riego; los sólidos que están disueltos en el agua y los sólidos en masa y por ultimo los gases utilizados para la cocción, iluminación e indirectamente en los motores.

Con el objetivo de disminuir el tamaño de los digestores se han utilizado los productos orgánicos que brindan mayor cantidad de biogás por unidad de volumen; algunos de ellos son: la excreta animal, la cachaza de la caña de azúcar, los residuales de mataderos, destilerías y fábricas de levadura, la pulpa y la cáscara del café, así como la materia seca vegetal.

## **Que es fermentación**

De acuerdo con el instituto de las industrias de la fermentación de Berlín. Madrid (1956), rigurosamente ablando, la expresión fermentación pertenece al pasado. Por fermentación se entendía primitivamente la transformación misteriosa de los cuerpos orgánicos y organizados de origen animal y vegetal, durante la cual el cuadro fermentativo se caracteriza por las transformaciones visibles de las sustancias

acompañadas de fenómenos llamativos, como la desintegración de la forma, el cambio de color, el desprendimiento gaseoso y la producción de olores.

### **Fermentación anaerobia**

En sentido estricto hoy en día entendemos al término fermentación como la transformación anaerobia de los hidratos de carbono, la destrucción de las cadenas carbonadas de las sustancias químicas sin intervención del oxígeno del aire (desintegración desmolítica) en oposición.

### **Degradación anaerobia de la materia orgánica.**

Está bien establecido que para el diseño de un sistema de tratamiento biológico resulta esencial la comprensión de las actividades ecológicas, bioquímicas y fisiológicas de los microorganismos que están involucrados en el proceso.

El proceso de digestión anaerobia de residuales es simplemente una intensificación tecnológica de procesos que ocurren normalmente en la naturaleza. En estos sistemas, donde las especies  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{O}_2$ , o  $\text{NO}_3$  no se encuentran disponibles, actúa como aceptor de electrones un compuesto orgánico.

A través de reacciones de oxidación - reducción, los electrones son transferidos de un compuesto reducido (donante de  $e^-$ ) a otro más oxidado (aceptor de  $e^-$ ). La energía liberada por la reacción es almacenada en las células bacterianas en forma de ésteres de fosfato ricos en energía (ATP), los cuales son utilizados por las propias células para todas las reacciones que sustentan el crecimiento microbiano.

Thayer y Col; Bacter (1977) mencionan que la cantidad de energía liberada en un proceso, expresada por los cambios de energía libre de una reacción ( $\Delta G^0$ ), es dependiente del estado de reducción de los compuestos que actúan como oxidantes o como reductores.

La cantidad de ATP ganada por las células es dependiente de la eficiencia del metabolismo. La mayoría de las bacterias anaeróbicas trabajan con una eficiencia que

oscila entre 25 y 50%. El metano es uno de los principales productos finales de la descomposición de la materia orgánica en ambientes anaerobios.

Zeikus (1980) cita que 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 finales formados. Moletta, (1998). El esquema biológico involucra reacciones de multi – organismos con multi - sustratos que se llevan a cabo en serie y en paralelo.

Este proceso biológico, de producción de metano, a partir del material orgánico complejo ha sido descrito según diferentes mecanismos. Entre éstos se encuentran los siguientes:

### **Metanogénesis en una sola fase.**

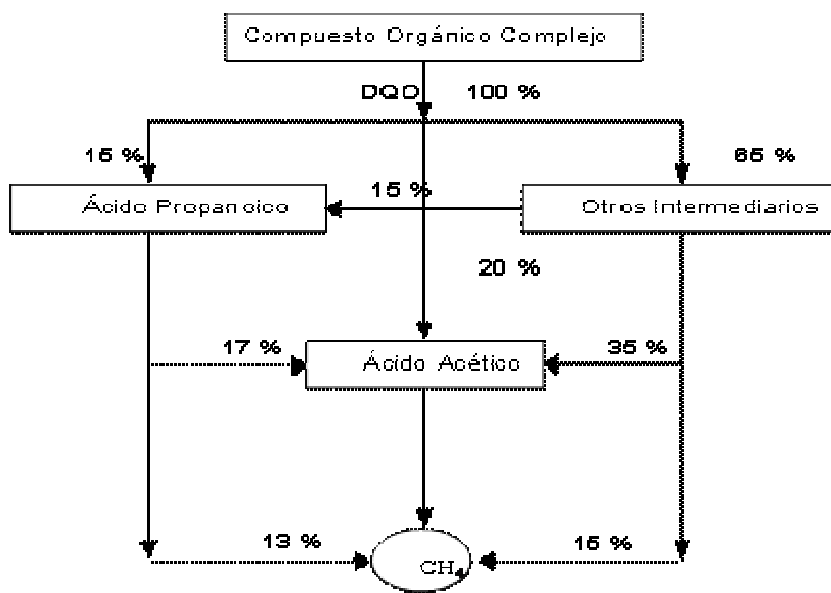
De acuerdo con este mecanismo, el  $\text{CH}_4$  y el  $\text{CO}_2$  se forman directamente, a partir de los compuestos orgánicos complejos. En 1906, Ornelianski reportó el aislamiento de un cultivo puro de una bacteria metanógena que fermentaba la celulosa. A partir de aquí y en adelante, todos los esfuerzos realizados para realizar tal bacteria fueron infructuosos, no pudiéndose obtener ninguna bacteria celolítica que produjera  $\text{CH}_4$ . Barker, en 1956, dudó de la pureza del microorganismo aislado por Omelianski. Esta bacteria denominada inicialmente *Mathanobacillus omelianskii*, más tarde identificada como una asociación simbiótica de dos especies microbianas, explicaba el mecanismo que describiera el proceso.

### **Metanogénesis en dos fases**

Este mecanismo se basa en la división del proceso en dos fases, la primera siendo la producción de ácidos y la segunda la producción de gas. De acuerdo con esta premisa, las bacterias ácido-formadoras podrían descomponer material orgánico complejo hasta ácidos grasos de cadena corta, como fórmico, acético, propiónico, butírico y en menor cantidad el valérico y el isovalérico. Estos ácidos grasos de bajo peso molecular son denominados ácidos grasos volátiles (AGV) debido a que pueden ser destilados a presión atmosférica. El ácido propiónico se produce principalmente a partir de la fermentación de los carbohidratos y las proteínas presentes en los

residuos, los cuales representan alrededor del 30% de los compuestos orgánicos contenidos en estos residuos, convirtiéndose a este ácido antes de que finalmente pase a  $\text{CH}_4$ . El ácido acético es el intermediario más abundante y se forma prácticamente a partir de todos los compuestos orgánicos. En el caso de sustratos complejos el ácido acético es precursor de cerca del 72% del  $\text{CH}_4$  formado durante la anaerobiosis y conjuntamente con los sustratos complejos contribuye al 85% de la producción total de  $\text{CH}_4$ , según puede apreciarse en la (Figura 6).

Una proporción elevada del 15% del  $\text{CH}_4$  restante proviene de la degradación de otros ácidos como fórmico y butírico, entre otros compuestos.



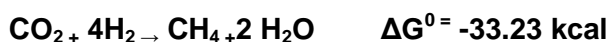
**Figura No.3. Producción de metano en la anaerobiosis de sustratos complejos.**

Las bacterias formadoras de  $\text{CH}_4$ , por su parte, podrían convertir estos ácidos orgánicos simples en  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Esta teoría fue considerada igualmente no satisfactoria, por cuanto el aislamiento de bacterias metanógenas que utilicen ácidos orgánicos de más de dos átomos de carbono ha sido reportado excepcionalmente, además de que la propia descomposición del ácido acético también tiene sus dificultades.

### **Metanogénesis en multi etapas.**

Wolfe (1976) Desde inicio de siglo, se observó que el hidrógeno se producía a partir de la descomposición del material orgánico cuando la producción de  $\text{CH}_4$  era

muy baja y la explicación de estos fue obtenida con *Methabacillus omelianskii*, el cual jugó un importante papel en el estudio de bacterias metanógenas al identificarse como una de las asociaciones simbióticas de dos especies bacterianas. Una de ellas utiliza etanol y produce acetatos e hidrógeno y se le denomina organismo "S" y la otra, nombrada *Methanobacterium*, utiliza hidrógeno para reducir el CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> de acuerdo con la ecuación siguiente:



Bryan, (1967), planteó que la oxidación de etanol a acetato es totalmente inhibida por presiones de hidrógeno de 49.03 kPa, por lo que los requerimientos de este gas por parte de las bacterias metanógenas estimulan el crecimiento del organismo "S" al mantener bajas concentraciones de hidrógeno en el medio. La transferencia de hidrógeno entre estas especies permite la conversión de etanol y CO<sub>2</sub> a acetato y CH<sub>4</sub>, respectivamente. Por otra parte, la pureza de cultivos metanógenos que descompongan propionatos, butiratos y valeratos no ha sido confirmada de acuerdo con lo reportado en la literatura. Es por esto, que se pensó en la existencia de un tercer grupo de bacterias involucradas en este proceso y que fuesen capaces de convertir compuestos aromáticos, ácidos grasos y alcoholes en ácido acético, H<sub>2</sub>, y dependiendo del sustrato, también en CO<sub>2</sub> según Perry.

En la actualidad diferentes autores han considerado que la digestión anaerobia procede en varias etapas sucesivas (Mcinerney, 1980; Yang y col, 1988) tales como hidrólisis o licuefacción. En esta etapa los compuestos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros.

Joubert; Brito, (1987) establecen que la acidogénesis los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente.

Acetogénesis. Se le conoce también como acidogénesis intermediaria en la cual los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.

Metanogénesis. En esta etapa metabólica el CH<sub>4</sub> es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, pudiendo formarse también a partir de otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol.

Las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia pueden ser representadas según la (Figura 7).

En la (Figura 4) se presenta otro esquema de las etapas metabólicas (Cairo; Paris y col, 1988; Lema, Méndez y col, 1988; Fernández-Polanco, 1988). Sin embargo, en la realidad, el número de interacciones llevado a cabo por los microorganismos que intervienen en la digestión anaerobia es mayor.

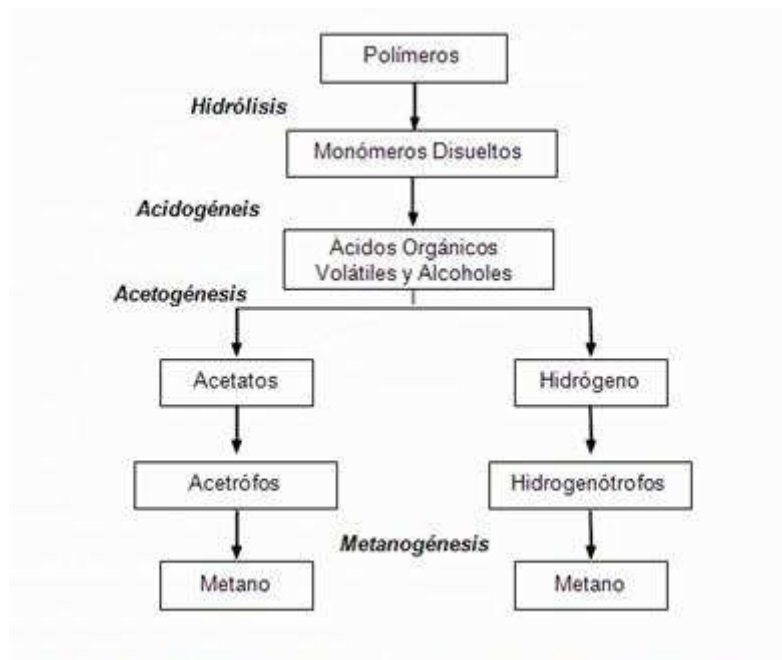
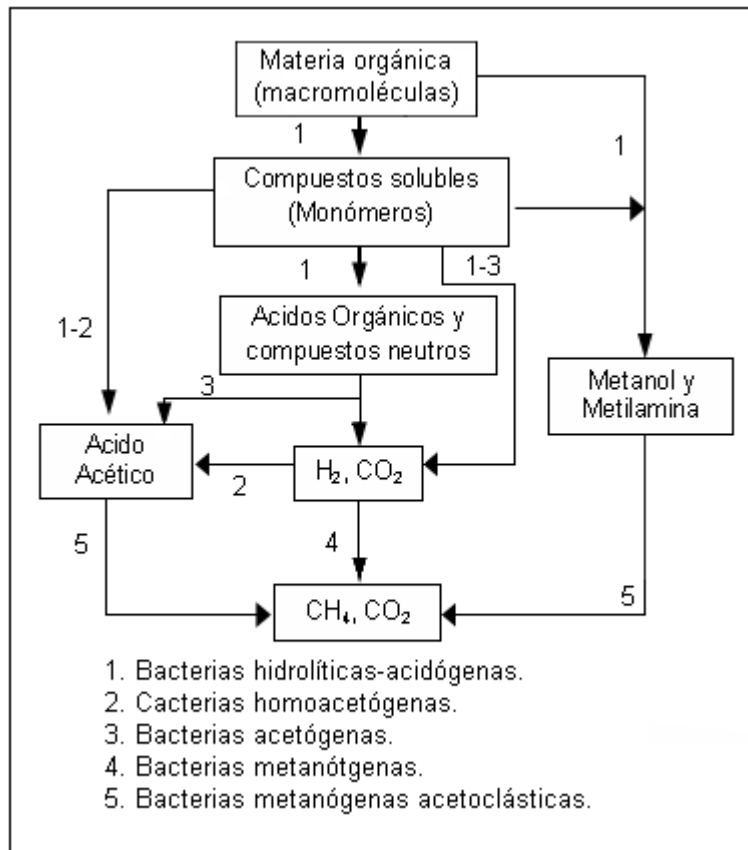


Figura No .4. Esquema simplificado de las etapas metabólicas de la anaerobiosis





**Figura No .5. Etapas metabólicas de la anaerobiosis**

Thiele; Zeikus y Col (1988), En un proceso de digestión anaerobia bien balanceada, los productos de una etapa metabólica son convertidos en la próxima, por lo que al final se obtiene la completa conversión del material orgánico biodegradable presente en el afluente a productos tales como  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{S}_8$ ,  $\text{NH}_3$ , etc.

### **Anaerobiosis de los sustratos más importantes.**

Desde el punto de vista bioquímico resulta conveniente el estudio del proceso dividido en dos grandes etapas: la no metanógena y la metanógena.

En la etapa no metanógena las moléculas orgánicas complejas se convierten en pequeñas unidades por la acción de enzimas exocelulares cuya presencia ha sido bien establecida. Así ocurren toda una serie de reacciones de acuerdo con los compuestos (sustratos) que prevalecen en el residual a ser tratado.

## **Anaerobiosis de los lípidos.**

Los lípidos constituyen un gran grupo, que incluye las grasas y los aceites, las ceras, los fosfolípidos, los glicolípidos y los esteroides, que son insolubles en agua y solubles en solventes como éter y cloroformo.

Los lípidos presentes en los materiales de fermentación para la producción del biogás están representados principalmente por las grasas. Se componen de glicerol y ácidos grasos. En condiciones anaerobias, las grasas se hidrolizan fácilmente para convertirse en dicarboxil-fosfoacetina, y, siguiendo la trayectoria de fermentación, forma ácido pirúvico. Los ácidos grasos sufren una  $\beta$ -oxidación y forman la acetoacilcoenzima A ( $\text{CH}_3\text{CO-SCoA}$ ) y luego ácido acético. El hidrógeno liberado en la  $\beta$ -oxidación puede reducirse para formar metano.

## **Anaerobiosis de las proteínas.**

Por la acción de las proteasas las proteínas se hidrolizan y éstas se convierten en péptidos y aminoácidos. Estos productos pueden ser aprovechados por los microorganismos para sintetizar sustancias celulares o para degradarlos aún más en sustancias de menor peso molecular, como los ácidos grasos,  $\text{H}_2\text{S}$ , las aminas, los fenoles, el amoníaco, etc., según mecanismos de desaminación oxidativa.

Los ácidos grasos volátiles de baja masa molecular pueden transformarse para formar metano; el amoníaco en cambio, puede emplearse ya sea como fuente nitrogenada para sintetizar los componentes celulares o para formar bicarbonato de amonio, con el cual se aumenta el ión  $\text{HCO}_3^-$  y se eleva la alcalinidad del medio favoreciendo la formación del metano.

La posibilidad de utilizar el residuo sólido para la obtención de biogás es factible. La tecnología que puede ser utilizada consiste en la acumulación de los residuos en un tanque que garantice la concentración, hidrólisis y acidogénesis del sustrato, para ello pueden utilizarse agitación con control de pH, de este recipiente se pasa mediante tuberías de PVC, el material con las concentraciones requeridas de

materia orgánica para el biodigestor, el gas obtenido puede ser utilizado directamente para producir calor o pasar por filtros para entrar en el sistema de alimentación de un motor de combustión interna y generar electricidad.

## **Etapas de la digestión anaerobia**

### **Hidrólisis**

Pavlostathis y Giraldo-Gómez (1991) La hidrólisis está en función de varios factores como el pH, temperatura, tipo de materia orgánica particulada, composición y del tamaño de partícula del sustrato (Hills y Nakano, 1984), del sustrato y la alta concentración de productos intermediarios ya que pueden inhibir el proceso (Hans *et al.*, 1994; Veeken y Sergey, 2000).

En esta primera etapa, los materiales orgánicos complejos se descomponen, el resultado son monómeros solubles, las proteínas se desdoblán en aminoácidos; grasas a ácidos grasos, glicerol a triglicéridos; los carbohidratos complejos tales como polisacáridos, celulosa, lignina, almidón y fibra se convierten a azúcares simples, tales como glucosa

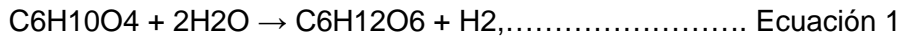
Pavlostathis y Giraldo-Gómez (1991) Uno de los principales componentes de la materia orgánica son los materiales lignocelulósicos, compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa. Los principales productos de la hidrólisis de la celulosa son celobiosa y glucosa, mientras que la hemicelulosa produce pentosas, hexosas y ácidos urónicos.

Los mismos autores citan que las proteínas son hidrolizadas por proteasas en proteosas, peptonas, péptidos y aminoácidos. Hay proteasas extracelulares, conocidas como proteinasas que atacan la proteína entera y las peptidasas intracelulares que cortan aminoácidos del extremo de proteínas y péptidos. Los aminoácidos producidos son degradados a ácidos grasos volátiles, dióxido de carbono, hidrógeno, amonio y sulfuro reducido. Generalmente la tasa de hidrólisis de proteínas es menor que la de los carbohidratos.

Hills y Nakano (1984), demostraron que la tasa de hidrólisis depende del tamaño de las partículas, debido fundamentalmente a la disponibilidad de superficie para la adsorción de las enzimas hidrolíticas. Los pre-tratamientos físico-químicos,

cuyo principal efecto es la reducción del tamaño de las partículas, producen un aumento en la tasa de hidrólisis y si esta fase es la limitante del proceso anaerobio, supone un beneficio para el proceso general, produciendo menores tiempos de retención y tamaños de reactores menores.

La fórmula química aproximada para RSO es C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub> (Verma, 2002). La reacción de la hidrólisis se analiza tomando como base un azúcar simple, en este caso la glucosa se puede representar por la siguiente reacción:

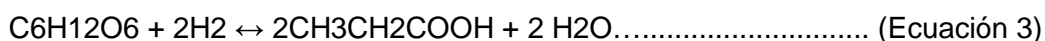


Mata-Álvarez *et al* (2003) establecen que las bacterias hidrolíticas o fermentativas son responsables de la generación de monómeros que estarán disponibles para el siguiente grupo de bacterias. La hidrólisis es catalizada por las enzimas excretadas de las bacterias, tales como celulasa, proteasa y lipasa. Si la materia base es compleja, la fase hidrolítica es relativamente lenta. Los carbohidratos por ejemplo, se utilizan para ser convertidos más rápidamente vía la hidrólisis a los azúcares simples y para ser fermentados posteriormente hasta Ácidos Grasos Volátiles (AGV's).

### Acidogénesis

Ostrem (2004) cita que después de la hidrólisis continua la acidogénesis, fase en la cual se producen gran cantidad de ácidos. En este proceso, las bacterias acidogénicas transforman los productos de la hidrólisis en ácidos grasos volátiles (por ejemplo, propiónico, fórmico, láctico, butírico o succínico), de cadena corta, compuestos orgánicos simples, las cetonas (por ejemplo, etanol, metanol, glicerol, acetona) y los alcoholes. Las concentraciones específicas de los productos formados en esta etapa varían con el tipo de bacterias y las condiciones de cultivo, tales como temperatura y pH.

Rittman (2001) establecen que las reacciones típicas en las etapas generadoras de ácido se muestran abajo. En la ecuación 2, la glucosa se convierte a etanol y en la ecuación 3, la glucosa se transforma en propionato.



## Acetogénesis

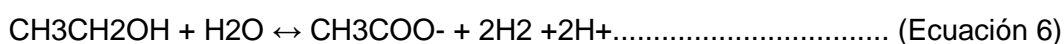
La etapa siguiente de la acidogénesis se considera a menudo como acetogénesis que inicia en formación ácida. La acetogénesis ocurre con la fermentación de carbohidratos, donde el acetato es el producto principal, además de que se generan otros productos metabólicos (Figura 1-1). El resultado es una combinación de acetato, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e hidrógeno (H<sub>2</sub>).

Los ácidos grasos con cadena larga, formados de la hidrólisis de lípidos, se oxidan a acetato o se forma propionato e hidrógeno (Ecuación 4). Otras reacciones en la acetogénesis involucran la conversión de la glucosa (Ecuación 5), etanol (Ecuación 6) y bicarbonato a acetato (Ecuación 7).

Ostrem (2004) menciona que bajo condiciones normales, la presencia del hidrógeno en la solución inhibe la oxidación, por lo tanto el papel del hidrógeno como intermediario es de importancia crítica a las reacciones de DA. La reacción procede solamente si la presión parcial del hidrógeno es bastante baja para permitir la conversión termodinámica.

Mata-Álvarez (2003) hacen referencia a la presencia de las bacterias que consumen el hidrógeno, es necesaria para asegurar viabilidad termodinámica y así la conversión de todos los ácidos.

Consecuentemente, la concentración del hidrógeno, medida por la presión parcial, es un indicador de la salud de un digestor.

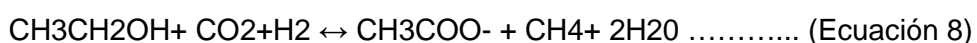


Ostrem (*Ibid*) La transición del substrato del material orgánico a los ácidos orgánicos en etapa ácida causa que el pH disminuya. Esto es benéfico para las bacterias acidogénicas y acetogénicas que prefieren un ambiente levemente ácido, (pH de 4.5 a 5.5) y son menos sensibles a los cambios en la corriente entrante de la alimentación, pero es negativo para las bacterias implicadas en la etapa siguiente de metanogénesis.

## Metanogénesis

Madigan *et al* (1998). Citan que 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 nombre al proceso general de biometanización, fermentación del metano ó metanogénesis. Las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de substratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, formiato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea* y morfológicamente pueden ser bacilos cortos y largos, cocos de varias ordenaciones celulares, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, existiendo tanto gram positivos como gram negativos (Madigan *et al.*, 1998). Todas las bacterias metanogénicas que se han estudiado poseen varias coenzimas especiales, siendo la coenzima M, la que participa en el paso final de la formación de metano.

Dos terceras partes de esta etapa se derivan de la conversión del acetato (Ecuación 8 y 9) o de la fermentación de un alcohol, por ejemplo el metílico (Ecuación 10) y el otro tercio es el resultado de la reducción de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> (Ecuación 11).



Mata-Álvarez y Mace (2004) mencionan que 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 DA 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). Algunas bacterias identificadas como metanogénicas *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, *Methanococcus*, *Methanomicrobium*, *Methanogenium* y *Methanospirillum*.

## **La fermentación anaerobia en seco**

Con el comienzo del siglo 21 se inauguró una nueva rama de la economía para la agricultura y para la eliminación de desechos municipales: la producción de corriente y calor a partir de biomasa con ayuda de la tecnología del biogás.

La tecnología de la „fermentación seca“ permite la obtención de energía a partir de biomasa acumulables y transportables de los sectores municipales y agrícolas.

La biomasa que se produce en las industrias agropecuarias, así como las basuras orgánicas municipales y los restos de poda, pueden ser utilizados para la producción de energía con la ayuda de la tecnología del biogás. De esta manera, se conseguirá en un futuro una fuente de ingresos complementaria para la agricultura, municipios y entidades para la eliminación de los residuos.

Hasta ahora, el punto de mira de la tecnología del biogás se concentraba fundamentalmente en la "fermentación anaerobia húmeda" a partir del estiércol líquido agrícola y de las basuras orgánicas municipales.

Gracias al proceso de la fermentación seca, existe la posibilidad de una metanización de la biomasa, que no se presenta en forma líquida. Esta forma de ganar energía es totalmente ecológica, rentable y crea y asegura puestos de trabajo.

En la biomasa agrícola, municipal y de los terrenos verdes se esconde un contenido energético considerable. Con ayuda de la tecnología de biogás se produce biogás de alta calidad, que puede ser transformado en calor y electricidad en las consiguientes centrales termoeléctricas en bloque.

En la reutilización de la biomasa no se originan productos de desecho, que tienen que ser tratados, sino productos finales muy valiosos y fáciles de aprovechar (biogás, electricidad, calor, compost, abonos). La alta calidad del compost permite utilizarlo como un valioso abono en la agricultura o jardinería de una manera óptima.

## **Descripción del proceso de Fermentación en Seco**

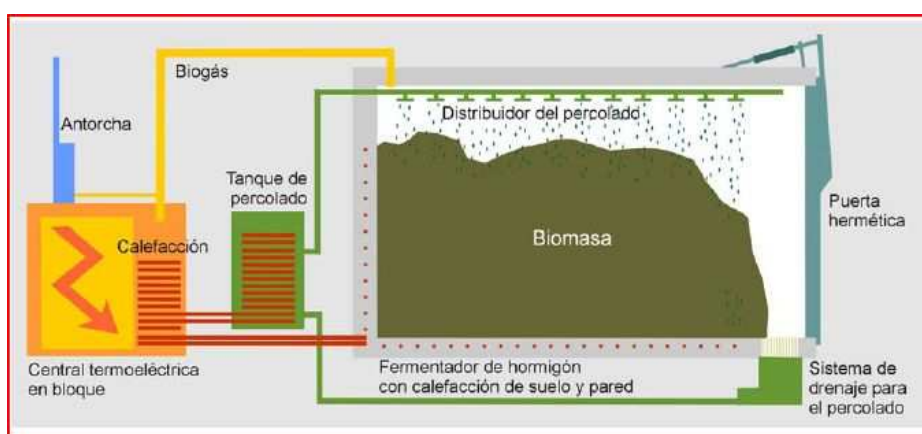
### **Proceso-Batch**

Ensayos a escala media del Dr. Linke en el Instituto Técnico Agrario en Bornim y del Profesor Hoffmann en la Facultad de la Universidad Weihenstephan (Triesdorf)

representan las bases para el desarrollo posterior del proceso y maduración de la tecnología, así como su aplicación en el mercado.

La biomasa es fermentada al vacío tras la adición del material de inoculación. La sucesiva inoculación de la biomasa se consigue a través de la recirculación de los percolados, que son nebulizados sobre la misma.

Una calefacción de suelo radiante en los fermentos y un intercambiador de calor instalado en el contenedor de los percolados permiten el control de la temperatura de los mismos y de la biomasa.



**Figura No. 6. Esquema del proceso de fermentación en seco de la empresa Bekon**

El proceso es de un solo paso, es decir, las diferentes reacciones de descomposición (hidrólisis, formación de ácidos y de metano) tienen lugar en un solo fermentador. De esta forma, se consiguen notables ventajas en comparación con otras técnicas, en las que, por lo general, es necesario el empleo de altas tecnologías y maquinarias. Esto aumenta el consumo de energía y los costes de mantenimiento de la planta en los procesos en estado líquido.

La tecnología se caracteriza a través de un modo sencillo de construcción. Biomasa con alto contenido en material seco puede ser metanizada.

## **MENOR CONSUMO DE ENERGÍA EN EL PROCESO**

En contraposición a las técnicas de BEKON, los procesos de descomposición en las técnicas de varias etapas transcurren en compartimentos separados, lo que



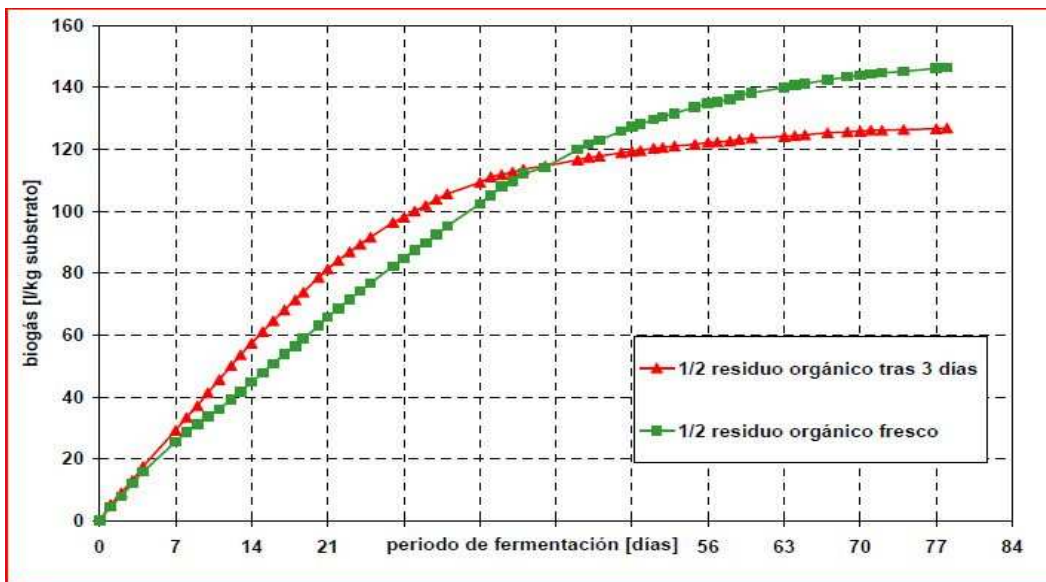
permite una mejor adaptación de las bacterias a las condiciones del medio. Sin embargo, debido a esto, los procesos en varias etapas exigen un mayor gasto en tecnología y maquinaria.

Los procesos convencionales requieren una mayor energía para el funcionamiento de la planta. La tecnología especial desarrollada en la fermentación seca permite un consumo de energía extremadamente bajo de las plantas y representa una ventaja adicional.

El consumo de energía en el proceso de la fermentación seca es muy bajo, en comparación con los procesos usuales.

## GAS DE ALTA CALIDAD Y RENDIMIENTO

Las cantidades de gas que se pueden obtener a partir de los sustratos agrícolas en la fermentación seca, se corresponden esencialmente, con los datos de la Asociación Profesional del biogás en Weckelweiler y varían según el tipo de sustrato desde aproximadamente 100 m<sup>3</sup>/t para la hierba de prados, hasta cerca de 180 m<sup>3</sup>/t para el ensilaje del maíz (fermentación del mismo).



**Gráfica No.1. Producción de biogás con dos sustratos orgánicos en un proceso de fermentación en seco.**

También hay que destacar el bajo contenido en azufre del biogás en la fermentación seca. Esto es de gran importancia, ya que un alto contenido en azufre del biogás puede ocasionar daños en los motores de gas de las centrales electrotérmicas acopladas en bloque. A través del proceso Batch hasta ahora

desarrollado, las concentraciones de azufre del biogás bajan hasta 10 ppm. Por ello, ya no es necesaria una desulfuración.

Una desulfurización del biogás prolonga el tiempo de funcionamiento de los motores en la central termoeléctrica en bloque, la cual ya no es necesaria, reduciéndose los costes de mantenimiento anuales.

## MATERIALES Y METODOS

### Localización geográfica.

La presente investigación fue desarrollada en el campus de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en la sección Agrotecnia, en Buenavista, Saltillo, Coahuila en el año 2010. El campus se encuentra localizado al sur de la ciudad de Saltillo en el Km. 10 de la carretera a Zacatecas, entre los paralelos 25°22' y 25°21' de latitud Norte y los meridianos 101°01' y 101°03' de longitud oeste, con una altitud de 1754 m.s.n.m.

El clima es seco y templado con lluvias en verano principalmente. La temperatura media anual de 17.8 °C con una oscilación media de 10.4 °C y una precipitación media anual de 490 mm, teniendo una humedad relativa media anual de 64.8 %.



**Figura No. 7: Localización de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la república mexicana.**

## **Materiales Utilizados**

### **Material biológico**

- Agua sin tratar con un pH 7.8
- Rastrojo de maíz seco molido de 1mm aproximadamente.
- Estiércol seco de bovino cribado

### **Material de laboratorio**

- Matraz Erlenmeyer de 1lt.
- Tapones de goma para los matraces
- Bolsas para suero de plástico de 1lt para la recolección de gas.
- Mangueras de paso para suero.
- Potenciómetro para la toma de pH marca Orión.
- Balanza analítica de 200 gr. de capacidad marca Ohaus.
- Termómetro para la medición de temperatura.
- Vasos de precipitados (500 ml).
- Baño maría eléctrico con calentadores y termómetro para calibrar la temperatura
- Equipo para medir biogás Top-Trak<sup>a</sup> Mass Flow Meters Sierra 820 Series
- Pipetas de 10 mml.

### **Análisis del material en laboratorio**

Antes del establecimiento del experimento para la producción de biogas se procedió a realizar un análisis del material biológico a experimentar, se realizaron análisis de laboratorio para determinar los siguientes parámetros.

- % Materia seca parcial
- % Humedad parcial
- % materia seca total
- % humedad total

- % Cenizas
- % de Nitrógeno N

Una vez concluida la fase de producción de biogas, el material restante dentro del biodigestor se le realizo nuevamente los análisis calculando los parámetros que se analizaron al inicio del establecimiento el experimento, con la finalidad de analizar el cambio que sufrió el material experimentado durante el proceso.

## **METODOLOGIA**

### **Análisis estadístico**

El análisis de varianza (ANVA) es la herramienta básica para el análisis de los modelos estadísticos de diseño de experimentos, porque permite descomponer la variabilidad de un experimento en componentes independientes que pueden asignarse a diferentes causas. El análisis de varianza se utiliza para determinar una razón de las diferencias observadas para comprobar hipótesis, nos permite verificar la diferencia entre dos o más medias (Montgomery, 2003). El software empleado para realizar el análisis estadístico fue UANL versión 2.5.

### **Diseño estadístico**

El diseño experimental que fue utilizado es el de Bloques al Azar con dos tratamientos y cuatro repeticiones. El modelo estadístico fue:

$$Y_{ij} = \mu + Z_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$  = Efecto del i-esimo tratamiento en la j-esima repetición.

$\mu$  = Efecto de la media general

$Z_i$  = Efecto de tratamiento

$\beta_j$  = Efecto de bloques o repetición

$\epsilon_{ij}$ = Efecto de la media genera en tratamientos y repeticiones

### Descripción de los tratamientos

El trabajo consto de 2 tratamientos con 4 repeticiones cada uno, dichos tratamientos se describen de la siguiente forma.

#### CUADRO NO.6. DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS UTILIZADOS EN EL EXPERIMENTO

TRATAMIENTO	MATERIAL
1	Rastrojo de maíz
2	Estiércol de bovino

Cabe mencionar que el rastrojo fue sometido a u proceso de molienda con un molino maraca **Tomas Wiley modelo 4 laboratory mill** con una molienda de 0.5mm aproximadamente.

### Fabricación de biodigestores.

Se adaptaron matraces de Enlenmeyer de un litro de capacidad biodigestores. Este se acondicionó colocando un tapón de goma para evitar la pérdida de biogás; en el tapón se realizó una perforación para introducir una varilla de vidrio ya que por este se tomaron muestras del material en estudio para evaluar distintos parámetros como es el caso del pH.

Se colocaron los biodigestores realizando la mezcla de rastrojo con el agua en una relación de 30 gr de rastrojo y 100 mml de agua y 30 gr de estiércol cribado mas100 mml de agua.

### Almacenamiento del gas

Se utilizaron bolsas de suero de un litro de capacidad que se conectaron directamente en el biodigestor. Una vez llena la bolsa, se procedió a medir su contenido de biogás haciendo pasar su contenido a través de el medidor de biogas marca Top-Trak<sup>a</sup> Mass Flow Meters Sierra 820 Series.

## Parámetros a evaluar

- **Temperatura del agua en el recipiente:** este factor se midió tomando lecturas diarias del termómetro que tiene el baño maría y mediante este se fue ajustando a la temperatura deseada para el proceso.
- Temperatura de la mezcla en el biodigestor:
- **PH de la mezcla:** la medición se realizó diariamente durante un periodo de 5 días. Se realizó con un potenciómetro marca Orión.

El procedimiento para la medición de esta variable se realizó extrayendo del biodigestor una cantidad de efluente, por la varilla de vidrio que tendrá ajustado en la tapa. Después de tomar las medidas se devolverá el efluente de la misma manera en que fue introducido, para no afectar el volumen del tratamiento.

- **Volumen de biogás.**

Para la medición de este parámetro se usó la utilización del instrumento llamado: **Top-Trak<sup>a</sup> Mass Flow Meters Sierra 820 Series**. El cual mide la cantidad de biogás en mml.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Composición del estiércol

Albin (1971) establece que un bovino alimentado a base de concentrados produce 1.1 kg de estiércol diario y 3.7 kg alimentado con raciones normales.

Es obvio que la composición del estiércol está influida por varios factores, siendo el principal el tipo de ración y su digestibilidad; otros factores que la afectan son: la edad del ganado y el estado general del animal.

También menciona que la composición química del estiércol encontrada por varios autores, se presenta en el cuadro (x) donde se muestra que la máxima cantidad de proteína (N X 6.25) corregida por la humedad es de 19.5% y la mínima de 1.87%.

**CUADRO No. 7. DATOS DE PORCENTAJE DE PROTEÍNA EN ESTIÉRCOL DE BOVINO ALIMENTADO CON DIFERENTES RACIONES DE CONCENTRADOS, REPORTADO POR VARIOS AUTORES.**

Referencia	Peso de los animales %	Humedad %	Nitrógeno %	Fósforo %	Potasio %
Loehr	364	68	1.0	0.18	0.54
Taiganides	454	68	0.9	0.09	0.44
Morris		Líquido	0.24-0.6	0.09-0.25	0.14-0.28
Baines		0	0.3 -1.3	0.15-0.5	0.13-0.92
Benne <i>et al</i>		80	0.7	0.2	0.45
Hart (1960)	432	85	0.5		

Fuente: Albin, R. C. J. *Animal Sci.* 32:803. 1971.



Recientemente Rhodes y Orton, mencionaron algunas características del estiércol como son: que el nitrógeno se encuentra soluble en un 70% del cual, 20% está en forma de proteína y 30% en forma de urea y amoníaco. La proteína está representada principalmente por células vivas, teniendo éstas la capacidad de sintetizar proteína microbiana a partir de nitrógeno inorgánico. El crecimiento microbiano en el estiércol está limitado principalmente por la poca cantidad de carbohidrato que se encuentra disponible.

Utilizando como fundamento las características anteriores se desarrollaron las ideas de la fermentación del estiércol de la que se hablará más adelante.

### **Composición del rastrojo de maíz**

La National. Academic. Of Science, (1976), cita que con un rendimiento en materia seca de 3.000 a 5.000 kg entre parte aérea de la planta, tallo, hojas, además del elote, y las espigas, etc., gran cantidad de elementos minerales de las plantas de maíz están presentes en el material vegetal que queda en el campo, alrededor del 30% de los materiales minerales importantes, N, P, K y Ca. Esto configura alrededor de 30 kg de N, 10 kg de P 20 a 25 kg de K. El tallo y hojas de maíz en el rastrojo están medianamente provistos de Ca, P, N y K siendo bajo el Na. Los elotes son bajos en Ca y Mg

### **Análisis del material biológico antes y después del experimento**

Es de vital importancia mencionar que los análisis fueron realizados al inicio del experimento y al término del mismo, al detenerse la producción de biogás.

Con la finalidad de analizar los cambios que presenta el material biológico residual durante el proceso de fermentación en seco, se realizaron nuevamente los análisis bioquímicos de este material. Los resultados se presentan a continuación:

**CUADRO NUM: 8. ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL BIOLÓGICO AL INICIO Y FINAL DE LA INVESTIGACIÓN, DE PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGÁS. BUENAVISTA. SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPTIEMBRE-OCTUBRE 2010.**

Muestra	Peso Muestra (Gr)	Peso Cenizas (Gr) 1	Peso Cenizas (Gr) 2	% Cenizas 1	% Cenizas 2	% Nitrógeno 1	% Nitrógeno 2	Carbono Orgánico 1	Carbono Orgánico 2
Rastrojo	2.0	0.1093	0.0697	5.465	3.485	1.2814	8.1992	1.0504	1.0724
Rastrojo	2.0	0.6017	0.2347	30.085	11.735	1.2142	10.203	0.7768	0.9807
Rastrojo	2.0	0.1880	0.1535	9.40	7.675	1.2284	9.2814	1.0067	1.0258
Rastrojo	2.0	0.2996	0.1633	14.98	8.165	1.2414	8.0089	0.9447	1.0204
Promedio		0.2996	0.1553	14.98	7.765	2.077	8.9231	0.9446	
Estiércol	2.0	0.9883	0.6090	49.415	30.45	2.0262	3.2242	0.5621	0.7728
Estiércol	2.0	0.8923	0.5922	44.615	29.61	2.3593	2.9914	0.6154	0.7821
Estiércol	2.0	0.8966	0.6160	44.83	30.8	2.0132	3.1118	0.6130	0.7689
Estiércol	2.0	0.9257	0.6545	46.285	32.725	1.9100	2.8884	0.5968	0.7475
Promedio		0.9257	0.6179	46.285	30.895	2.0772	3.0539	0.5968	

1 = valor al inicio de la investigación; 2 = valor del residuo al final

% de cenizas se determinó mediante la fórmula (peso de ceniza/peso de muestra) x 100

abono Orgánico = (Carbono Total/1.8)

% de Carbono Orgánico = (Peso de Carbono Orgánico/Peso de Carbono Total) x 100

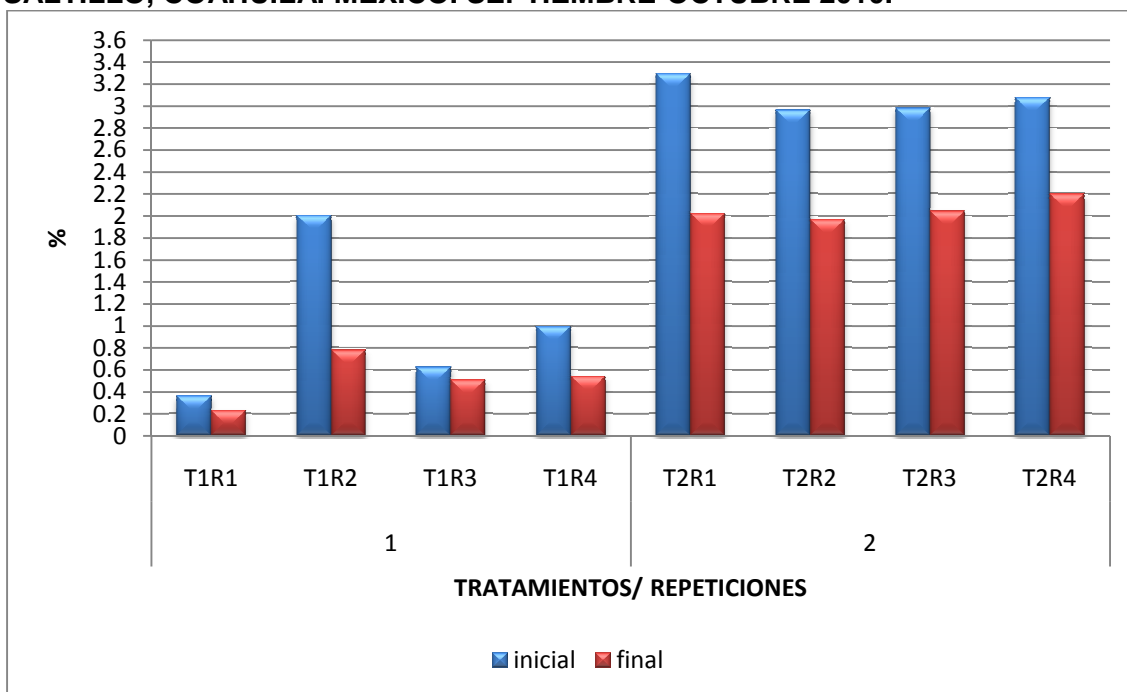
Se denomina ceniza a la fracción inorgánica (sales minerales), que forma parte constituyente del material orgánico. Las cenizas permanecen como residuo luego de la calcinación de la materia orgánica. Los análisis de este factor muestran que los valores promedio iniciales de cenizas para cada tratamiento de materia orgánica fueron de 0.2996 gr para rastrojo y 0.9257 gr para el estiércol. Esto indica que la estructura química del rastrojo está constituido de un 85.02% de carbohidratos y un 14.98 de minerales. Respecto al estiércol, el peso en cenizas fue de 0.9257 gr, lo que representa un 46.28% del total de su estructura: el resto 53.72% lo constituyen los carbohidratos. Por lo anterior demuestra que el estiércol es un material orgánico con mayores ventajas para la generación de biogás, debido a que contiene un mejor valor nutricional en cuanto a minerales para las distintas especies de bacterias involucradas en la fermentación anaerobia. De esto se desprende que para utilizar el rastrojo o

materiales similares para la generación de biogás, se debe tener especial cuidado en enriquecer el substrato con una mezcla balanceada de nutrientes minerales.

Ampliando lo anterior, en el residuo resultante de la fermentación anaerobia del rastrojo, el peso de cenizas final fue de 0.1553 gr; esto representa una reducción de 0.1443gr, equivalente a un 48.16% de la cantidad de cenizas obtenida del rastrojo inicial, previo al proceso de fermentación. Para el estiércol el cambio en el contenido de cenizas fue de 0.9257 gr al inicio del proceso y 0.6179 gr al término del mismo. Esta diferencia representa un 33.25%.

Es importante destacar que el proceso de biodigestión en el estiércol se consumió un 213.3 % (0.1635 gr), más minerales que en el rastrojo, lo que explica la mayor producción de biogás obtenida del estiércol, lo cual será discutido más adelante.

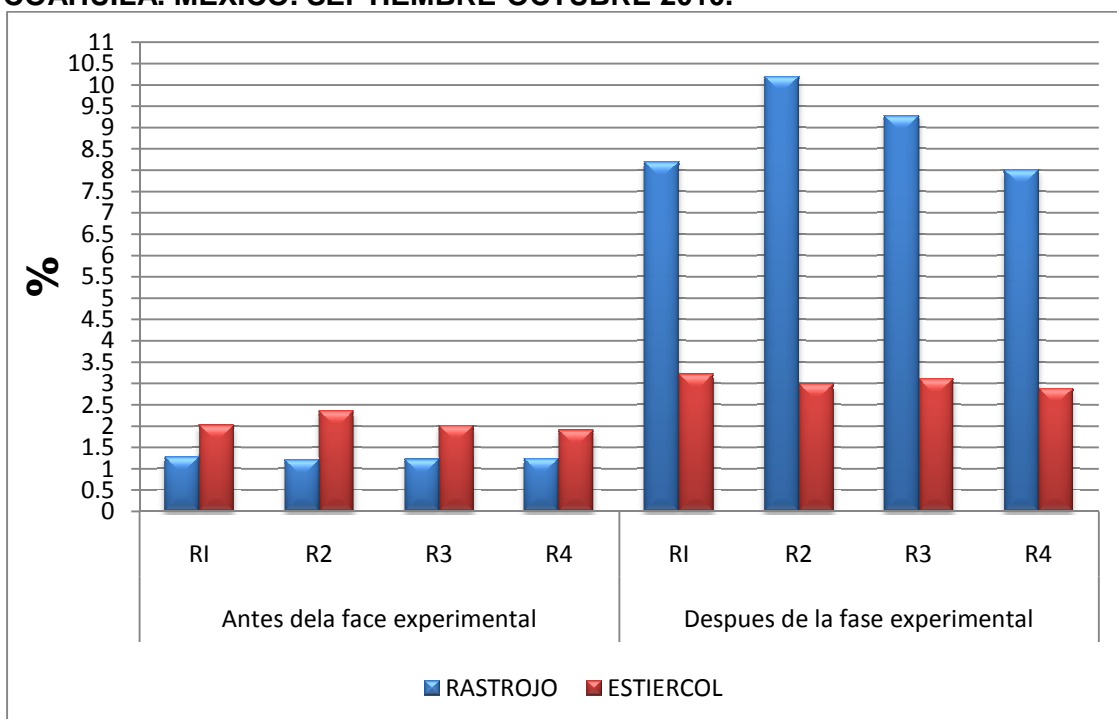
**GRAFICA No. 2. COMPORTAMIENTO DEL PORCENTAJE DE CENIZAS AL INICIO Y FINAL DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN EN SECO DE DOS TIPOS DE MATERIA ORGÁNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. BUENAVISTA. SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPTIEMBRE-OCTUBRE 2010.**



## El Nitrógeno en el proceso de fermentación en seco.

Recientemente Deublein y Steinhauser (2008). Afirieron que este elemento es el constituyente principal de los aminoácidos que a su vez integran las proteínas, por lo que su contenido en la materia orgánica es de gran importancia, en especial en su combinación con el carbono que da origen a la relación Carbono/Nitrógeno (C/N), básica en este tipo de procesos. Una relación C/N de un substrato debería encontrarse ser de 16: 1 – 25. Substratos con una relación C/N muy baja incrementan la concentración de amonía en el biodigestor, inhibiendo la producción de metano. Una relación muy alta significa falta de nitrógeno, con consecuencias negativas para la formación de nitrógeno afectando la energía y el material estructural del metabolismo bacterial.

**GRAFICA NUM 3 PORCENTAJE DE NITROGENO AL INICIO Y FINAL DEL PROCESO DE FERMENTACIÓN EN SECO DE DOS TIPOS DE MATERIA ORGÁNICA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. BUENAVISTA. SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPTIEMBRE-OCTUBRE 2010.**



Los análisis de laboratorio del material orgánico realizado al inicio de esta investigación, mostró que el contenido de nitrógeno en el tratamiento uno fue en promedio de 1.2413% y en el tratamiento dos de 2.0772%, lo que representa una diferencia de 0.836%. Con el propósito de ajustar el porcentaje

de nitrógeno entre ambos tipos de materia orgánica, se añadieron 16 gr de urea (46% N) y lograr así una mejor relación Carbono: Nitrógeno.

Los resultados de los análisis de laboratorio de la materia orgánica presentados en el cuadro dos, muestran un incremento en el nivel de nitrógeno en las muestras entre el inicio y el final de la investigación. El contenido de nitrógeno se incrementó en ambos tratamientos, pasando en promedio de 2.077% a 8.923% en el tratamiento uno y de 2.077% a 3.054% en el tratamiento dos. (Gráfica 3). Aunque el incremento de N en el tratamiento uno es sobresaliente, se debe considerar la adición de urea a este tratamiento, sin embargo en el tratamiento dos también se observa esta incremento, lo que indica un enriquecimiento del efluente en este elemento. Este aspecto es de importancia pues el efluente puede ser aprovechado como abono orgánico en agricultura, lo que representa un beneficio adicional a la obtención de energía.

### **Biogás obtenido de los tratamientos evaluados**

El análisis de varianza de la producción de biogás se presenta en el siguiente cuadro:

**CUADRO No. 9. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGÁS EN DOS TRATAMIENTOS DE MATERIA ORGÁNICA. BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPTIEMBRE - OCTUBRE. 2010.**

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>
TRATAMIENTOS	1	0.048016	0.048016	80.1048**
BLOQUES	3	0.000716	0.000254	0.4234
ERROR	3	0.001798	0.000599	
TOTAL	7	0.050576		
CV= 13.23%				

En este cuadro se observa diferencia altamente significativa para el efecto de tratamientos, lo que indica que las variaciones en la producción de biogás se debieron al efecto de los tratamientos evaluados y no debidos al medio ambiente. En lo que respecta a bloques (repeticiones), no se encontró diferencia significativa. El coeficiente de variación fue de 13.23% lo que indica

que los resultados encontrados para producción de biogás son validos para obtener conclusiones.

Debido a la alta significancia estadística para el factor tratamientos, se procedió a evaluar los valores promedios de producción de biogás con la Prueba de Diferencia Mínima Significativa (DMS), obteniéndose los siguientes resultados:

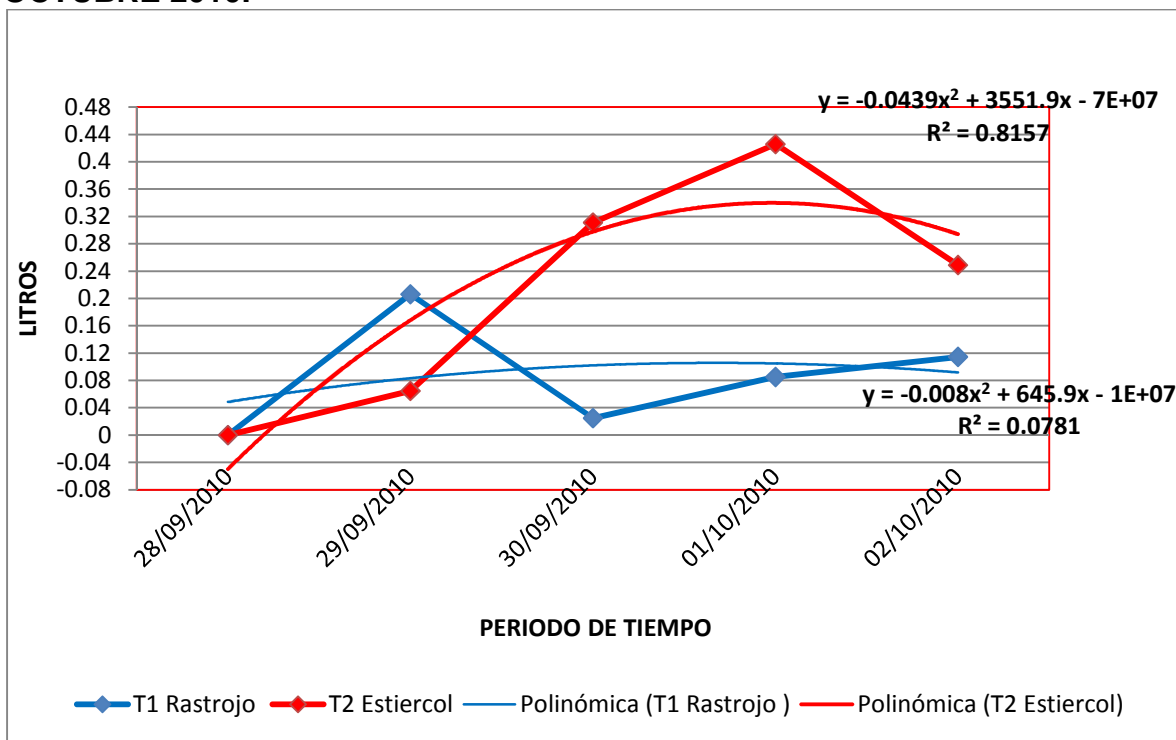
**CUADRO No.10. COMPARACIÓN DE MEDIAS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.**

Nivel de significancia = 0.05		Nivel de significancia = 0.01	
Tratamiento	Media	Tratamiento	Media
2	0.2625 <b>a</b>	2	0.2625 <b>a</b>
1	0.1076 <b>b</b>	1	0.1076 <b>b</b>
DMS = <b>0.0542</b>		DMS = <b>0.1011</b>	

La producción de biogás fue diferente en los dos tratamientos evaluados como lo muestra la grafica uno. El mejor tratamiento fue el dos (estiércol de bovino) con una producción total de 0.2625 litros en un periodo de 5 días, (una producción por día de 0.066 lts de biogás). La cantidad de biogás producido por gramo de materia orgánica en este tratamiento fue de 8.75 mml/gr de estiércol y este inició a producir a los dos días de haber iniciado el experimento.

El tratamiento uno (rastroyo de maíz), inicio la producción de biogás también al segundo día de iniciado el experimento y, alcanzó una producción total promedio de 0.1076 litros de gas en un periodo de cinco días (una producción por día de 0.022 lts). La cantidad de gas producido por gramo de materia orgánica para este tratamiento fue de 3.45 mml/gr de rastroyo de maíz. El comportamiento de este factor se presenta en la gráfica No 4.

**GRAFICA No. 4. EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGÁS EN LITROS EN DOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIA ORGÁNICA. UAAAN, BUENAVISTA. SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPTIEMBRE - OCTUBRE 2010.**



**CUADRO No. 11. RESUMEN DE LOS RESULTADOS PARA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.**

Tratamiento	Biogás Total (Litros)	Biogás /Día (Litros)	Biogás/Gr de materia orgánica (mml)
Rastrojo Maíz	0.1076	0.022	3.45
Estiércol de Bovino	0.2625	0.053	8.75
Diferencia	0.1549	0.031	5.3
Diferencia (%)	59.0	41.5	39.4

El resumen de los resultados para producción de biogás presentado en el cuadro No11 muestra que en la fermentación en seco, el estiércol es el

material orgánico que mostró el mejor comportamiento para producción de biogás en comparación con el rastrojo de maíz, ya que lo superó en producción de biogás en un 59%.

A este respecto se debe considerar que la materia orgánica del rastrojo de maíz (tratamiento uno), a diferencia del estiércol, no ha recibido ningún pretratamiento que facilite la descomposición en el biodigestor de la celulosa, lignina y otros carbohidratos contenidos en la estructura de la planta de maíz. El resultado es que se retarda la síntesis de ácidos orgánicos en el proceso de digestión anaeróbica y, por consecuencia, el número y actividad de las bacterias acidogénicas y metanogénicas, lo que resulta en una menor generación de biogás. Cabe señalar que aunque ambos tratamientos iniciaron la generación de biogás al segundo día, esto se debió a que se les añadieron 10 ml de medio de infección para facilitar el inicio del proceso de fermentación.

Esta explicación es apoyada con lo mostrado en la gráfica 1, ya que es notable la diferencia en velocidad de generación de biogás entre ambos tratamientos, pues ésta es muy superior en el tratamiento dos con respecto al uno (41.5%), muy probablemente debido a la mayor velocidad de síntesis de ácidos orgánicos en el estiércol que en el rastrojo. Se destaca también que el estiércol contiene una cantidad mayor de bacterias anaerobias que el rastrojo de maíz, lo que permite un proceso metanogénico más rápido y eficiente en el biodigestor.

No obstante las diferencias en producción de biogás y en la velocidad de generación, es importante destacar que en ambos materiales es posible obtener esta importante bioenergía con el proceso de fermentación en seco, lo que demuestra que es posible su producir biogás en el agro nacional, pues ambos materiales son abundantes. El resultado del tratamiento uno (rastrojo de maíz), es posible extenderlo, con las reservas técnicas propias, hacia la materia orgánica de malezas y hojarascas en general, pues sus contenidos y



tipos de carbohidratos son muy similares. Se deberán conducir investigaciones específicas al respecto para confirmar esto.

### **Efecto del Potencial Hidrógeno (pH) en la producción de biogás**

La importancia del pH radica en que los organismos vivos, en este caso las bacterias, requieren un ambiente adecuado de pH para su desarrollo y actividad bioquímica. De este modo, muchas reacciones químicas solo se realizan en ciertos rangos de pH. Por lo anterior, su evaluación en los procesos de fermentación anaerobia es de gran importancia para determinar su efecto en el comportamiento de las bacterias inmersas en el proceso.

**CUADRO No. 12. ANÁLISIS DE VARIANZA (ANVA) PARA LA EVOLUCIÓN DEL PH EN DOS TRATAMIENTOS EN LA PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGÁS. BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. SEPT-OCT.2010.**

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>F Calculada</b>
TRATAMIENTOS	1	4.651306	4.651306	219.0906**
BLOQUES	3	0.133759	0.044586	2.1001
ERROR	3	0.06369	0.021238	
TOTAL	7	4.848755		

**CV: 1.87%**

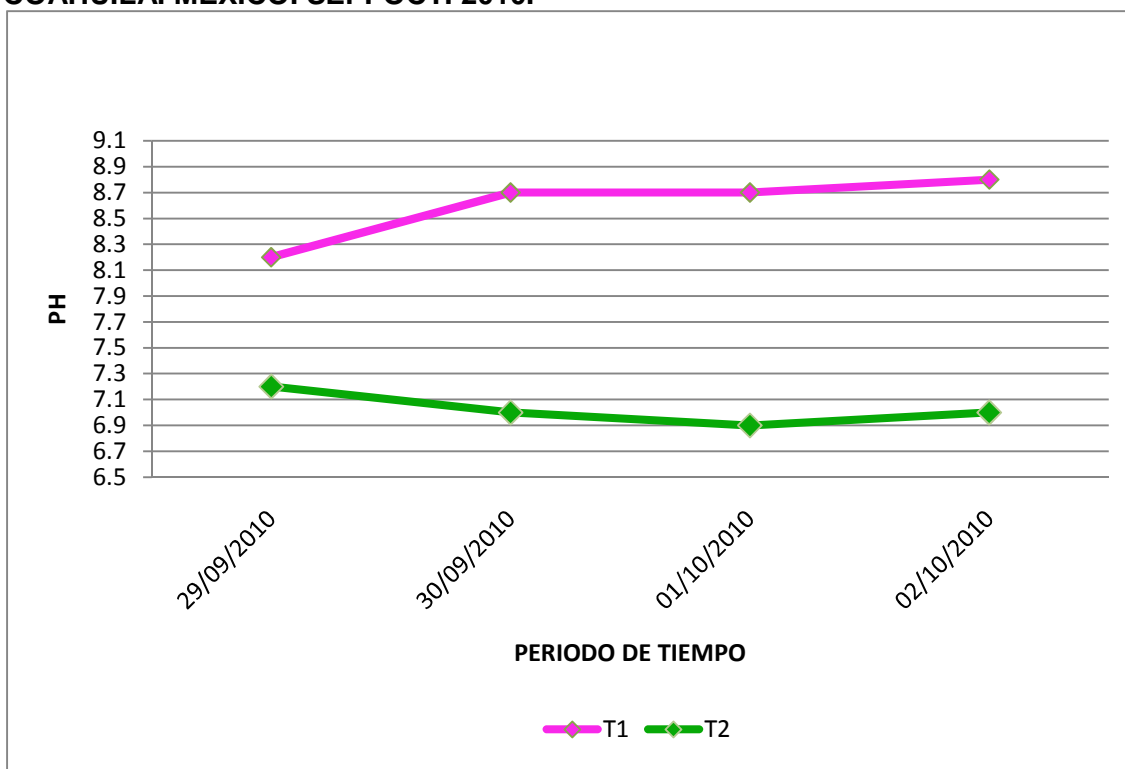
El análisis de varianza (ANVA) para la variable pH muestra diferencia estadística altamente significativa para tratamientos y no significancia para el efecto repeticiones, lo que indica que este factor influyo en el comportamiento bioquímico del proceso de fermentación anaerobia de la materia orgánica para la generación de biogás. La prueba DMS (Cuadro 13; gráfica 5) muestra que el pH se mantuvo consistentemente más alto (8.56) en el tratamiento uno (con rastrojo de maíz) que en el tratamiento dos con estiércol (7.05).

**CUADRO No. 13. COMPARACIÓN DE MEDIAS DE LA EVOLUCIÓN DE PH EN LA PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGAS. UAAAN, BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEP.-OCT. 2010.**

Nivel de significancia = 0.05		Nivel de significancia = 0.01	
Tratamiento	Media	Tratamiento	Media
1	8.5750 <b>a</b>	1	8.5750 <b>a</b>
2	7.0500 <b>b</b>	2	7.0500 <b>b</b>
DMS = 0.3223		DMS = 0.6018	

Este resultado confirma la explicación emitida anteriormente respecto al diferente contenido de ácidos orgánicos en ambos tratamientos, lo que se refleja claramente en el valor de pH, siendo más alcalino en el rastrojo (sin proceso previo de digestión) y más ácido en el estiércol. (Gráfica 5).

**GRAFICA No. 5. EVOLUCIÓN DEL PH EN DOS TRATAMIENTOS EN LA PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGAS. UAAAN, BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEP.-OCT. 2010.**

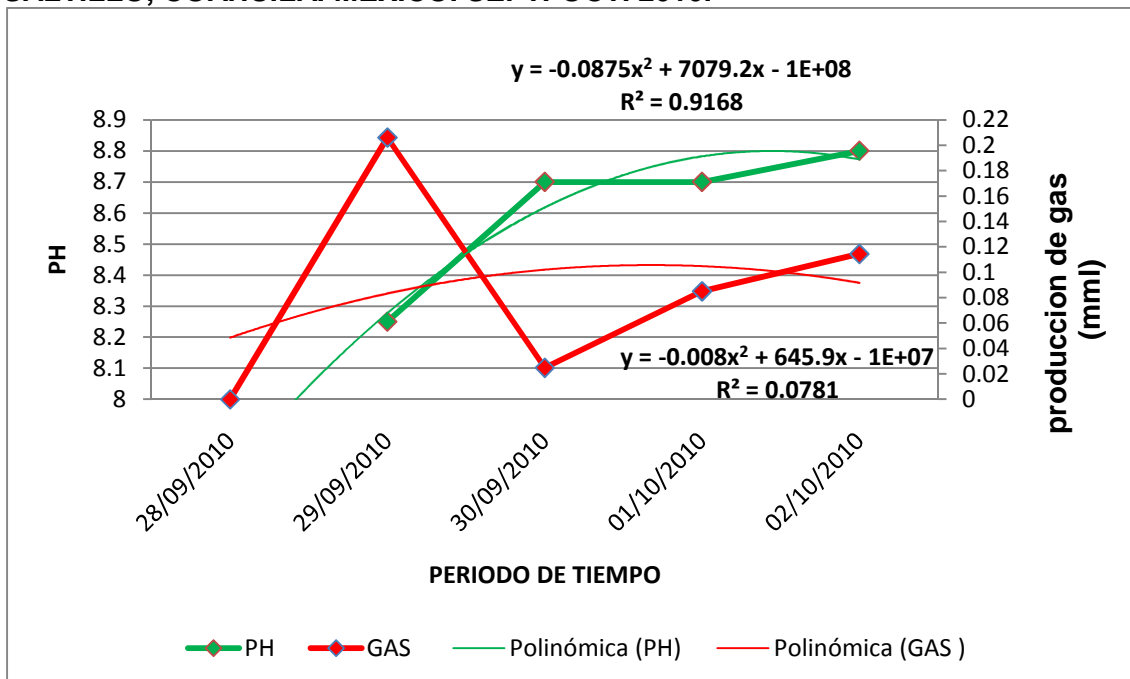


Una explicación para este resultado es que el estiércol es un material orgánico que ha pasado por un proceso de digestión previo en el sistema digestivo del rumiante, en donde estuvo en contacto con los jugos gástricos del

estómago, que contienen ácido clorhídrico, que facilita el desdoblamiento de los carbohidratos complejos de cadena larga, constituyentes de la materia orgánica entre los que se incluye a la celulosa. Parte de ésta es convertida a cadenas más simples de carbohidratos, que son altamente solubles en agua. Los azúcares así obtenidos constituyen el alimento base de las bacterias acidificantes las que en la fermentación anaerobia los incorporan en su metabolismo para, a partir de ellos, sintetizar ácidos orgánicos como el acético, láctico, butírico, propiónico, succínico, los cuales a su vez constituyen la materia base de la nutrición de las metano bacterias. (Ostren, 2004; Madigan et al, 1998; Cornwell y Davis, 1998).

Se tiene en cuenta que la producción de biogás esta en estrecha relación con el pH del efluente Es decir, las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios bruscos en el pH que las bacterias acidificantes participantes en el proceso. Además un aumento en el pH, es índice de exceso de amoniaco en el efluente, en tanto que una disminución en el mismo es índice en contenido de ácidos orgánicos. Ambos factores provocan una disminución en la producción de biogás (German Apropiate Exchange. 2005)

**GRAFICA No. 6. EFECTO DEL PH EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGÁS POR DÍA PARA EL TRATAMIENTO 1. UAAAN, BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPT.-OCT. 2010.**

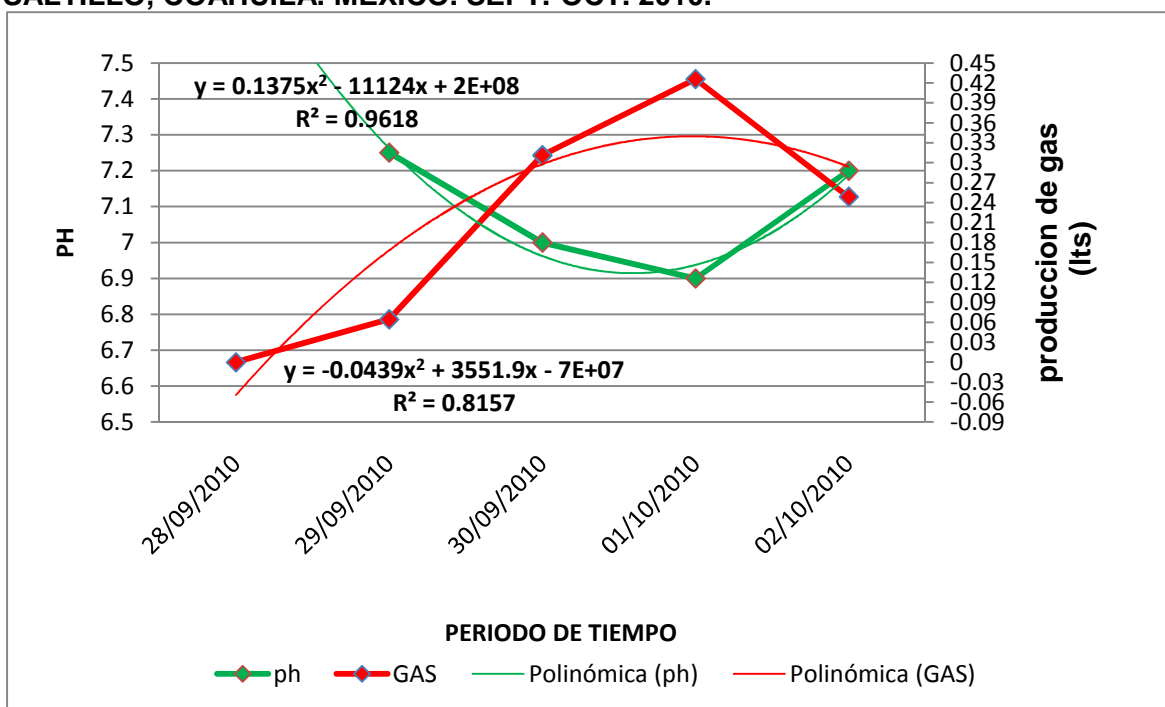


El rastrojo de maíz registró un pH alcalino durante todo el período de tiempo de la investigación. Este inició con un valor de 8.25 y evolucionó hasta alcanzar un máximo de 8.8 al quinto día. El resultado parece indicar que el pH alcalino en el rastrojo será una característica en la fermentación en seco. La producción de biogás se registra muy variable y con bajos niveles de producción. Se debe continuar estudiando esta fuente de materia orgánica, en especial lo relacionado con la acidificación inducida del material como un componente más del proceso de pre tratamiento.

En la fermentación del estiércol el pH (gráfica 6) siguió el comportamiento típico reportado en otros estudios Zúñiga (2007), donde al iniciar la fermentación, el pH es alcalino y al avanzar el proceso, el medio se va acidificando. En este estudio, el pH en el tratamiento dos inició en 7.25 y al cuarto día descendió hasta 6.9. Por su parte, la producción de biogás se fue incrementando, siguiendo una relación inversa al pH.

En general para este tratamiento, un medio con pH ligeramente ácido favorece la actividad de la bacteria metanogénicas, deducida esta a partir de la producción de biogás.

**GRAFICA No. 7. EFECTO DEL PH EN RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN EN SECO DE BIOGÁS POR DÍA PARA EL TRATAMIENTO 2. UAAAN, BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPT.-OCT. 2010.**



Pavlostathis y Giraldo-Gómez (1991), citan que este fenómeno ocurre mediante 3 pasos, la hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis. La primera es el proceso mediante el cual los materiales orgánicos complejos se descomponen, el resultado son monómeros solubles, las proteínas se desdoblán en aminoácidos; grasas a ácidos grasos, glicerol a triglicéridos; los carbohidratos complejos tales como polisacáridos, celulosa, lignina, almidón y fibra se convierten a azúcares simples, tales como glucosa.

Ostrem (2004) menciona que después de la hidrólisis continua la acidogénesis, fase en la cual se producen gran cantidad de ácidos. En este proceso, las bacterias acidogénicas transforman los productos de la hidrólisis en ácidos grasos volátiles (por ejemplo, propiónico, fórmico, láctico, butírico o succínico), de cadena corta, compuestos orgánicos simples, las cetonas (por ejemplo, etanol, metanol, glicerol, acetona) y los alcoholes. Las concentraciones específicas de los productos formados en esta etapa varían con el tipo de bacterias y las condiciones de cultivo, tales como temperatura y pH.

Madigan *et al.*, (1998) en sus investigaciones encontraron que las bacterias metanogénicas son las responsables de la formación de metano a partir de substratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, formiato, metanol y algunas metilaminas. Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio *Archaea* y morfológicamente pueden ser bacilos cortos y largos, cocos de varias ordenaciones celulares, células en forma de placas y metanógenos filamentosos, existiendo tanto gram positivos como gram negativos.

Cornwell y Davis (1998) citan que las bacterias metanogénicas son muy sensibles 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 digestión anaerobia porque las bacterias

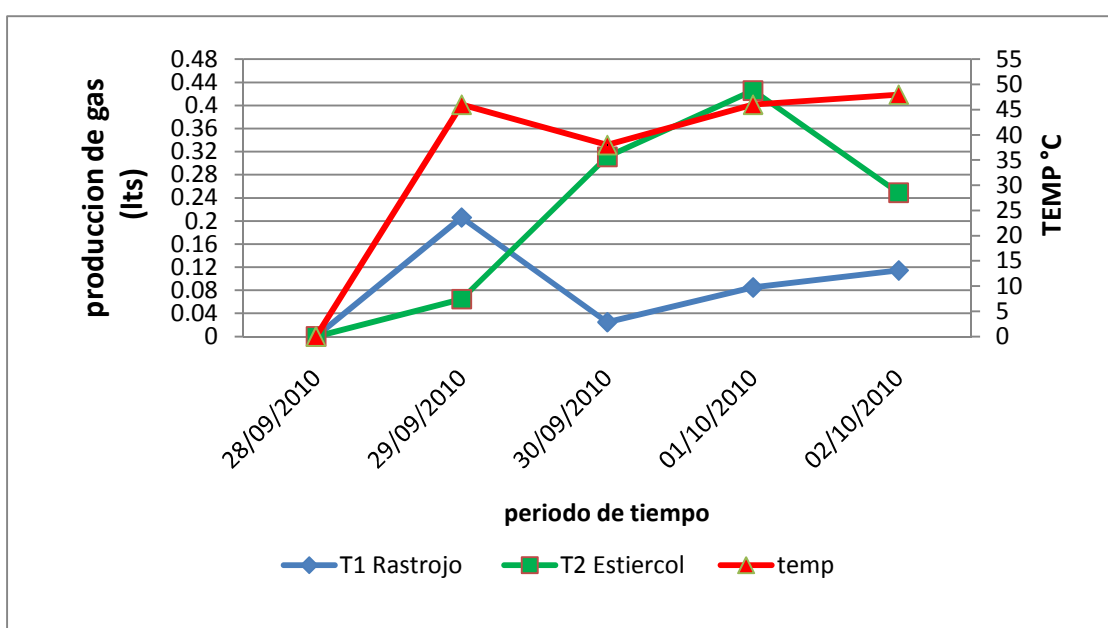
metanogénicas tienen una tasa de crecimiento mucho más lenta que las bacterias en la acidogénesis. Por lo tanto, la cinética del proceso entero se puede describir por la cinética de metanogénesis.

### Efecto de la temperatura en la producción de biogás.

Mata-Álvarez, (2003) establecen que los niveles de reacción química y biológica normalmente aumentan con el incremento de la temperatura. Para los biodigestores de biogás esto es cierto dentro de un rango de temperatura tolerable para diferentes microorganismos. Las altas temperaturas causan una declinación del metabolismo, debido a la degradación de las enzimas; y esto es crítico para la vida de las células. Los microorganismos tienen un nivel óptimo de crecimiento y metabolismo dentro de un rango de temperatura bien definido, particularmente en los niveles superiores, los cuales dependen de la termoestabilidad de la síntesis de proteínas para cada tipo particular de microorganismo.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otros organismos en el biodigestor. Esto se debe a que los demás grupos crecen más rápido, como las acetogénicas, las cuales pueden alcanzar un catabolismo sustancial, incluso a bajas temperaturas.

**GRAFICA No. 8. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR DÍA EN FERMENTACIÓN EN SECO DE RASTROJO DE MAÍZ Y ESTIÉRCOL DE BOVINO. UAAAN, BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPT-OCT. 2010.**



Para el caso del tratamiento 1, el periodo de mayor producción de gas fue del 29 de septiembre, en donde la temperatura fue de 46 °C. En este rango fue donde se encontraron los mejores resultados en cuanto a mayor producción de gas. El de menor producción fue el día 30 de septiembre con una temperatura de 38 °C.

Esto indica que el mejor rango de temperatura para el tratamiento 1 (rastreo de maíz) es de 46°C para obtener una buena producción de biogas.

Para el caso del tratamiento 2. Podemos observar que no existe mucha relación entre temperatura y producción de biogas como lo fue en el tratamiento 1 en este tratamiento se puede observar que hubo una disminución de temperatura para el día 30 de septiembre y la producción de biogas no se vio afectada.

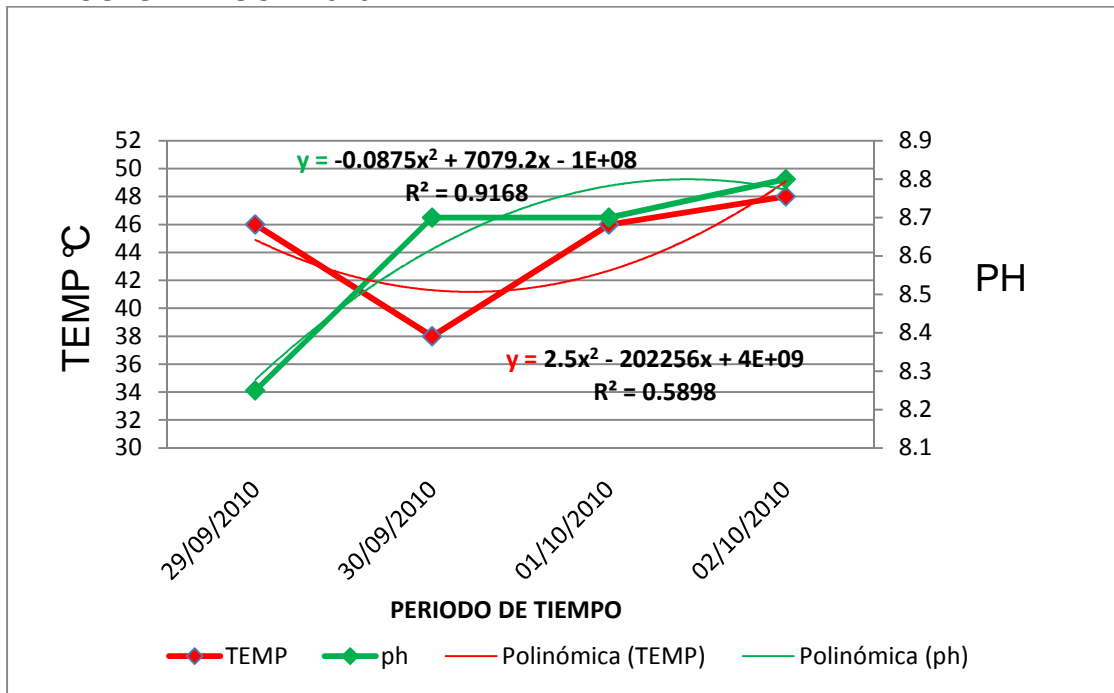
También se puede observar que para el día 02 de octubre que fue el día en que se registro la temperatura más alta 48°C con respecto a la producción de biogas tendió a disminuir lo cual concuerda con lo citado por Mata-Álvarez (2003) al indicar que los cambios elevados de temperatura disminuyen el metabolismo de las bacterias metanogénicas.

Todo parece indicar que el rango óptimo de temperatura para la obtención de una buena producción de biogas para los dos tratamientos evaluados es de 46°C.

### **Efecto de la temperatura en relación al pH.**

La temperatura puede modificar el pH, ya que a temperaturas altas, las bacterias presentan una aceleración de su metabolismo para la degradación de la materia orgánica, incrementando la alcalinidad de este, lo que deriva en un incremento en la producción de amoníaco, lo cual es toxico para las mismas bacterias. Esto genera un colapso en su actividad. También al tener una temperatura muy alta, las bacterias realizan una rápida hidrólisis de carbohidratos convirtiéndolos en ácidos orgánicos, lo cual trae como consecuencia pH ácidos. (German Appropriate Technology Exchange. 2005).

**GRAFICA NO. 9. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN RELACIÓN CON EL PH PARA EL TRATAMIENTO 1. UAAAN, BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPT.-OCT. 2010.**

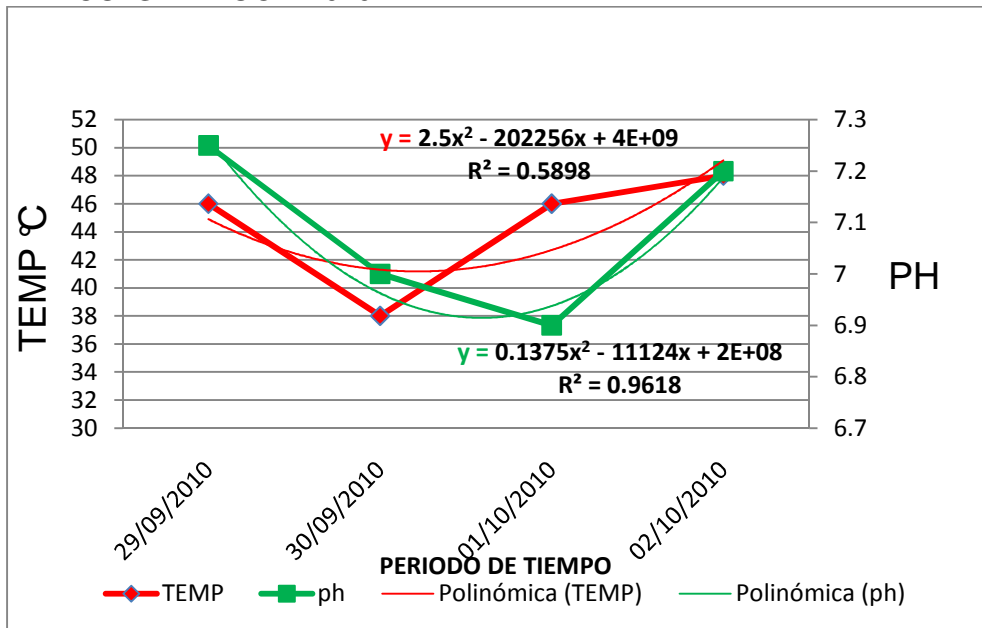


En la grafica No 7 se observa el comportamiento de la temperatura en relación con el pH para el tratamiento 2, en donde se observa que al tener variación repentina en la temperatura el pH no varía considerablemente, esto debido a la estrecha relación que tienen estos dos factores, lo cual hace que la producción de biogás sea mayor.

Para esta variable el mejor rango fue de 46 a 48° C en el que se obtuvo un pH de 8.7 a 8.8, el cual en el que se obtuvo la producción más alta de biogás.



**GRAFICA NO. 10. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN RELACIÓN CON EL PH PARA EL TRATAMIENTO 2. UAAAN, BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. MÉXICO. SEPT.-OCT. 2010.**



En la grafica No 8 se observa el efecto que tiene la temperatura en relación al pH para el tratamiento 2, en donde la temperatura tiene un efecto para el cambio del pH.

Se puede observar que del día 29 de septiembre al 01 de octubre el pH tendió a bajar y al día siguiente inicio a ascender pero la producción de biogas no se vio afectada de manera drástica.

Para el caso de la temperatura solo el día 30 de septiembre fue el día en que mas disminuyo la temperatura llegando a tener 38°C. Pero el rango de pH para la se

## CONCLUSIONES

- La fermentación en seco es efectiva en la producción de biogás con estiércol de bovino y rastrojo de maíz como material orgánico base.
- La producción de biogás en cada uno de los tratamientos mostró diferencias estadísticas significativas.
- Los resultados muestran que el mejor tratamiento en la producción de biogás, fue el tratamiento dos a base de estiércol de bovino con una producción total de 0.2625 litros en un periodo de 5 días. La producción por día fue de 0.066 lts. El tratamiento uno (rastrojo de maíz) produjo 0.1076 litros de biogás, con una producción por día de 0.022 lts. El pH fue más alto en el tratamiento uno con un valor promedio de 8.56, a diferencia del tratamiento dos que promedió 7.05.
- En relación al nitrógeno se registró un incremento en los tratamientos entre el inicio y el final de la investigación. El contenido de nitrógeno se incrementó en ambos tratamientos, pasando de 2.077% al inicio de la investigación a 8.923% al final de esta en el tratamiento uno y de 2.077% a 3.054% en el tratamiento dos.
- Para producción de biogás con el sistema de fermentación en seco, el estiércol es el material orgánico que mostró el mejor comportamiento en comparación con el rastrojo de maíz, ya que lo superó en producción de biogás en un 59%.
- Durante el proceso de biodigestión en seco, el estiércol consumió un 213.3 % (0.1635 gr), más minerales que en el rastrojo, lo que indica una mayor actividad metabólica de las poblaciones bacterianas.
- El pH fue más alto se registró en el tratamiento uno con un valor promedio de 8.56, a diferencia del tratamiento dos que promedió 7.05.
- La temperatura de la mezcla del biodigestor es esencial para la buena producción de biogás.
- La temperatura afecta directamente al pH, ya que tiene un efecto adverso en la producción de biogás

## RECOMENDACIONES

- I. Tomar en cuenta al mejor tratamiento de este trabajo como base para posteriores investigaciones.
- II. Utilizar mezclas de diferentes materiales orgánicos similares a los evaluados en esta investigación.
- III. Realizar investigación con otros materiales orgánicos para evaluar su comportamiento.
- IV. Evitar que la temperatura tenga cambios bruscos, ya que tiene un efecto negativo en los diferentes microorganismos de la fermentación.

## LITERATURA CITADA

- Baines, S.: *Some aspects of the disposal and utilization of farm wastes*. J. Proc. Just. Sewage Publication. p. 578, 1964.
- Benne, E. J., Hogland, C. R., Longnecker, E. D. y Cook, R. L.: *Animal manures - what are they worth today?* *Mich. Agr. Exp. Sta. Res. Bull.* Núm. 231, 1961.
- Biodigestores – Biogas en la actividad Rural  
<http://www.prosaponline.gov.ar/Prosapwebsite/Docs/Biodigestores.pdf>
- BIODIGESTORES, DESARROLLO DE BIOGAS DEL INTA Y EL INTI  
<http://www.webdelcampo.com/bioenergia/280-biodigestores-desarrollo-de-biogas-del-inta-y-el-inti.html>
- Castillo, G. ITCR Hashimoto A.G. Y.R Chen. Methane and Protein from animal feedlot wastes, *Jornal of Soil and Water Conservation* 1979. Experiencias de los autores (Chavez, Chi, Gutierrez)  
<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/biogas.htm>
- Cepeda Dovala, A.R., J. G. Medina T., J.M. Cepeda D, y L.M. Lasso m. (2006) Estudio ambiental, desertificación en el estado de Coahuila. Sistema de producción en zonas áridas y semiáridas. Investigación aplicada. Departamento de ciencias del suelo. UAAAN, saltillo Coahuila. México.
- Chaves Jorge, Miraflores, lima Perú, soluciones prácticas, 2004.  
[www.solucionespracticas.org.pe](http://www.solucionespracticas.org.pe).
- Cepeda Dovala, A.R., J.G. Medina T., J.M. Cepeda D, y L.M. Lasso m. (2006) Estudio ambiental, desertificación en el estado de Coahuila. Sistema de producción en zonas áridas y semiáridas. Investigación aplicada. Departamento de ciencias del suelo. UAAAN, saltillo Coahuila. México.
- CIPAV 1995. Biodigestores plásticos de flujo continuo, generador de gas y bioabono a partir de aguas servidas. Edición Rubén Espinel. Fundación CIPAV: 18 pp.

<http://www.efdemexico.com/servicios/biodigestores.html>

- Deublein D. and A. Steinhauser. 2008. Biogas from waste and renewable resources. An introduction. Wiley-VCH, page 116.
- EL BIOGAS: FUENTE DE ENERGIA ALTERNATIVA  
<http://www.abcpedia.com/cienciaytecnologia/energia/biogas.html>
- Fermentación anaeróbica  
<http://www.textoscientificos.com/energia/fermentacion>
- Fundación Hábitat. 2005. "Biodigestores" una alternativa a la autosuficiencia energética y de biofertilizantes. Quimbaya, Quindío, Colombia. Página Web:  
<http://imagenes.tupatrocinio.com/imgbddd/documentos/biodigestores.doc>
- Hart, S. A.: The management of livestock manure. *Trans. Amer. Soc. Agr. Engr.* 3: 78, 1960.
- HERNÁNDEZ, C. 1990. Segundo Fórum Nacional de Energía: Biogas. La Habana. 132 p.
- Loer, R. C.: *Pollution implications of animal wates - a forward oriented review*. V. S. Dept. Jut. Fed. Water Pollution Control Admin. Ada. Ikylahoma, 1969.
- Morris, W. H. M.: Economies of liquid manure disposal from confined livestock. *Proc. Nat. Symp. Anim. Waste Manage Amer. Soc. Agr. Engr.* Pub. No. SP-0366, p. 126, 1966.
- Taiganides, E. P. and T. E. Hazen: Properties of form animal excreta. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 9: 374, 1966.
- VÁZQUEZ DURAÑONA, O. (2000). Planta de biogas de pequeñas dimensiones para fincas lecheras. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 9 (1): 53-55.