



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

COORDINACIÓN DE POSGRADO

**“PRODUCCIÓN DE METANO Y TRATAMIENTO DE AGUA
RESIDUAL CON DIFERENTES FUENTES DE MATERIA
ORGÁNICA FECAL”**

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

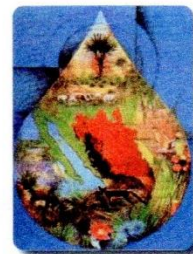
PRESENTA:

OLIVIA GARCÍA GALINDO



Mayo de 2013

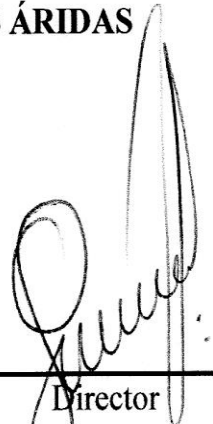
Bermejillo, Durango.



La presente tesis de maestría en ciencias titulada **“Producción de Metano y Tratamiento de Agua Residual con Diferentes Fuentes de Materia Orgánica Fecal”** fue realizada por la C. Olivia García Galindo, bajo la dirección del Dr. Aurelio Pedroza Sandoval, la codirección del Dr. Ricardo Trejo Calzada y la asesoría del Dr. Ignacio Sánchez Cohen y el M.C José Antonio Chávez Rivero, ha sido evaluada por el Comité Revisor y aprobada como requisito parcial para obtener el título de:

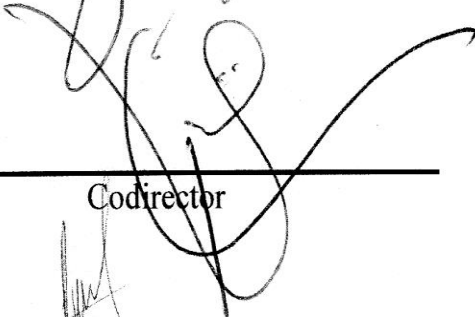
**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS
COMITÉ REVISOR**

Dr. Aurelio Pedroza Sandoval



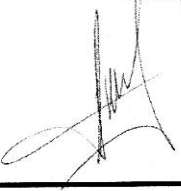
Director

Dr. Ricardo Trejo Calzada



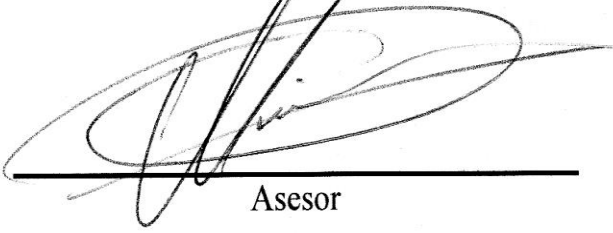
Codirector

Dr. Ignacio Sánchez Cohen



Asesor

M.C. José Antonio Chávez Rivero



Asesor

DATOS BIOGRÁFICOS

El presente trabajo fue realizado por Olivia García Galindo, Químico Farmacéutico Biólogo, egresado de la Facultad de Ciencias Químicas perteneciente a la Universidad Juárez del Estado de Durango (FCQ-UJED), generación 2006-2010.

Los estudios de maestría los realizó en el Programa en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA-UACH), generación 2011-2012. A sí mismo, durante el periodo enero-julio de 2012, desarrolló una estancia de investigación en el Olds College Center for Innovation (OCCI) en Olds, Alberta, Canadá. Donde participó en diferentes proyectos de investigación: producción de biodiesel a partir de diferentes fuentes aceite vegetal y grasa animal, obtención de bioetanol a partir de residuos lignocelulósicos, fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados.

Ha participado en congresos internacionales como:

- **Evaluación de fuentes de materia orgánica fecal a diferentes temperaturas en la producción de gas metano en condiciones *in vitro*.** Presentado en el VIII Congreso Nacional Sobre Recursos Bióticos de Zonas Áridas (REBIZA). Octubre de 2012. URUZA-UACH. Bermejillo, Dgo. Modalidad: Ponencia cartel.
- **Evaluación de la eficacia de la producción de biogás bajo condiciones *in vitro*.** Presentado en el VII Congreso Nacional REBIZA. Octubre de 2011. URUZA-UACH. Modalidad: Ponencia oral.
- **Adición de un agente quelante (EDTA) para fitoextracción de plomo (Pb) empleando palma (*Washingtonia robusta*).** Presentado en la V reunión Nacional REBIZA. Octubre de 2009. URUZA-UACH. Modalidad: Ponencia cartel.
- **Adición de un agente quelante (EDTA) para fitoextracción de plomo (Pb) empleando palma (*Washingtonia robusta*).** Presentado en el Congreso Internacional Sobre Desarrollo Sustentable y Manejo de Recursos Naturales. Octubre de 2008. URUZA-UACH. Modalidad: Ponencia cartel.

DEDICATORIAS

A Dios...*Por darme la valiosa oportunidad de disfrutar la vida al lado de las personas que más quiero y permitirme este gran logro.*

A mi familia...*Mi papá Apolinar García Oropeza, mis hermanos Irasema, Beatríz, José Apolinar y Eduardo García Galindo; por confiar en mí siempre, apoyándome con lo necesario para continuar con mis estudios; permitiéndome llegar hasta donde hoy me encuentro, y especialmente a mi mami Elvira Galindo Palacios quien realizó grandes sacrificios por ayudarme a concluir este sueño.*

A mis amigas...*Mónica Cossío López, Cinthia Guadalupe Aba Guevara, Jazmin Anai Ávila Treviño, Diana Alicia Quezada Rivera y Alejandra Macias Borrego por estar siempre conmigo en todo momento apoyándome incondicionalmente.*

A mis profesores...*Que a lo largo de mi formación académica fueron guiándome por el mejor camino, compartiéndome sus conocimientos y experiencias, principalmente a mi director de tesis el Dr. Aurelio Pedroza Sandoval quien confió en mí y me apoyo a lo largo de estos dos años para obtener este logro.*

A una personita muy especial...*Jorge Alberto Ortiz Salazar, quien llego a mi vida justo en el momento adecuado y quien me ha apoyado de forma incondicional en el cierre de este proyecto mediante sus experiencias, paciencia y amor.*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la oportunidad y el apoyo para realizar mi maestría durante estos dos años. Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango (COCyTED), al Programa Universitario de Investigación y Servicios en Recursos Bióticos de Zonas Áridas (REBIZA) de la Universidad Autónoma Chapingo.

A la Universidad Autónoma Chapingo Unidad Regional Universitaria (URUZA-UACH) por el apoyo brindado para concluir este proyecto. Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) Unidad Irapuato.

Al Dr. Aurelio Pedroza Sandoval, profesor investigador y subdirector de investigación de la URUZA-UACH, por aceptarme en este proyecto y la confianza brindada; así como por todo el apoyo a lo largo de este tiempo, facilitándome un área y material de trabajo necesario. Al Dr. Ricardo Trejo Calzada, profesor investigador y director de investigación por facilitarme el uso de las instalaciones y equipo necesario.

A la M.C. Nidya Fabiola Curiel Maciel, encargada de laboratorio agua-suelo-planta de la URUZA-UACH y al M. C. José Antonio Chávez Rivero Coordinador de enlace técnico del Centro de Aprendizaje e Intercambio de Saberes Zonas Áridas (CAISZA) por su apoyo incondicional y paciencia a lo largo del proyecto, así como a la IBIO Bertha Alicia Rodríguez Rodallegas, auxiliar técnico del laboratorio agua-suelo-planta de URUZA-UACH.

Al Dr. Juan José Peña Cabriales, profesor investigador y responsable del laboratorio de microbiología ambiental del CINVESTAV-IPN, por facilitarme el uso de las instalaciones y soporte técnico, así como a los M.C. José Antonio Vera y Yolanda por el apoyo técnico brindado.

A la planta tratadora de agua residual de Cd. Lerdo Dgo, por el apoyo de los lodos proporcionados empleados en el desarrollo de esta investigación.

CONTENIDO

DATOS BIOGRÁFICOS.....	iii
DEDICATORIAS	iv
AGRADECIMIENTOS	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT.....	x
I. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL.....	3
Objetivos específicos	3
HIPÓTESIS.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Problemática del agua en el mundo	4
2.2 Problemática del agua en México	5
2.3 Problemática del agua en la Comarca Lagunera.....	6
2.4 Aguas residuales	6
2.5 Tratamiento de agua residual	6
2.6 Sistemas de tratamiento de agua residual	9
2.6.1 Demanda Química de Oxígeno como parámetro para calidad de agua tratada.....	11
2.7 Sistemas de tratamiento anaerobios	11
2.7.1 Factores que intervienen el tratamiento anaerobio.....	14
2.7.2 Ventajas del tratamiento anaerobio	15
2.8 Combustibles fósiles	16
2.8.1 Clasificación de los biocombustibles	17
2.9 Combustibles fósiles en el mundo	20
2.10 Combustibles fósiles en México	22
2.11 Producción de gas metano.....	24
2.11.1 Producción de gas metano en rumiantes y su impacto ambiental	26

III. MATERIALES Y MÉTODOS	31
3.1 Ubicación geográfica	31
3.2 Diseño del Estudio	31
3.3 Fase I: <i>In vitro</i>	32
3.3.1 Colecta de muestras	32
3.3.2 Establecimiento y operación del Reactor Batch.....	32
3.3.3 Diseño Experimental.....	34
3.3.4 Variables evaluadas.....	34
3.4 Fase II: Escalamiento y Validación	35
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1 Fase I: <i>In vitro</i>	37
4.1.1 Potencial de Hidrógeno (pH)	37
4.1.2 Demanda Química de Oxígeno	39
4.1.3 Producción de Gas Metano	44
4.1.4 Correlación entre pH, DQO y CH ₄	47
4.2 Fase II: Escalamiento y Validación	48
4.2.1 Potencial de Hidrógeno, Temperatura y Demanda Química de Oxígeno	48
4.2.2 Potencial de Hidrógeno (pH)	49
4.2.3 Temperatura (T)	50
4.2.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	51
4.2.5 Estimación de producción de gas metano	53
4.2.6 Correlación entre pH, T, DQO y CH ₄	55
V. CONCLUSIONES	57
VI. RECOMENDACIONES.....	58
VII. LITERATURA CITADA.....	59
VIII. APENDICE	63
8.1 Cuantificación de gas metano	63
8.2 Curva de calibración	64
8.3 Inyección de muestras problemas	65

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ventajas y desventajas del tratamiento de aguas residuales.....	7
Cuadro 2. Clasificación de los diferentes tipos de biocombustibles existentes.	16
Cuadro 3. Estimativos de las principales fuentes naturales y antropogénicas de metano a nivel global (millones de Ton. año ⁻¹).	27
Cuadro 4. Principales rutas de producción de gas metano.	29
Cuadro 5. Efecto de la fuente de materia orgánica fecal (FMOF) en el potencial de hidrógeno inicial y final de los diferentes tratamientos. Bermejillo, Dgo. 2012.	38
Cuadro 6. Disminución de la DQO al término del experimento de las diferentes fuentes de materia orgánica fecal (FMOF). Bermejillo, Dgo. 2012.	41
Cuadro 7. Efecto de la temperatura (T) en la demanda química de oxígeno de aguas bajo tratamiento. Bermejillo, Dgo. 2012.	42
Cuadro 8. Comparación de medias de disminución y eficiencia en la reducción de DQO. Bermejillo , Dgo. 2012.	43
Cuadro 9. Efecto de la fuente de materia orgánica fecal (FMOF) en la producción de gas metano. Bermejillo, Dgo. 2012.	45
Cuadro 10. Efecto de la temperatura final en la producción de gas metano a partir de diferentes fuentes de material orgánica fecal. Bermejillo , Dgo. 2012.	46
Cuadro 11. Análisis de correlación de Pearson entre las variables de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y producción de gas metano (CH ₄).	48
Cuadro 12. Efecto del tiempo en el potencial de hidrógeno, temperatura y demanda química de oxígeno.	49
Cuadro 13. Efecto del tiempo en la estimación de la producción de gas metano en base a la demanda química de oxígeno.	54
Cuadro 14. Análisis de correlación de Pearson entre las variables de Potencial de Hidrógeno (pH), Temperatura (T), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Estimación de la Producción de Gas Metano (EPCH ₄).	56
Cuadro 15. Condiciones empleadas en el CG para cuantificación de metano.	63
Cuadro 16. Mezclas de gas natural con aire inyectadas en el CG para realizar curva de calibración.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de la ruta de degradación anaerobia: Distribución detallada en porcentaje de la degradación de la materia orgánica..	13
Figura 2. Colecta de la muestra en el sitio de muestreo y su transporte al laboratorio....	32
Figura 3. Preparación y montaje de los reactores Batch en el laboratorio.....	33
Figura 4. Toma de muestra de gas metano para su posterior cuantificación.	34
Figura 5. Montaje y operación del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)....	36
Figura 6. Comportamiento del pH al inicio y final de la fase in vitro.	39
Figura 7. Concentraciones de la DQO al inicio y final de la fase in vitro.	41
Figura 8. Disminución y de eficiencia de remoción de DQO por tratamiento.	44
Figura 9. Producción de gas metano ($\mu\text{mol ml}^{-1}$) días después de iniciado el experimento (DDIE) en aguas que contienen materia orgánica fecal de humano (H), vaca (V), cabra (Ca), cerdo (Ce) y sus combinaciones simples, comparado con un testigo (SIN MOF).	45
Figura 10. Disminución y eficiencia de la DQO días después de iniciado el experimento (DDIE).....	52
Figura 11. Estimación de la producción de gas metano (EPCH_4) en m^3 días después de iniciado el experimento (DDIE) en base a la demanda química de oxígeno obtenida (DQO).	55
Figura 12. Jeringa empleada para inyectar las diferentes muestras en el CG.	64
Figura 13. Curva de calibración obtenido de la regresión lineal realizada con las seis lecturas de las muestras estándar inyectadas en el CG.	64
Figura 14. Muestras tomadas de los biorreactores para su posterior lectura en el CG. ...	65
Figura 15. Toma de muestra de 250 μL , de los tubos vacutainer, con ayuda de la jeringa cromatográfica.....	66
Figura 16. Inyección de las distintas muestras a analizar en el inyector del CG.	66
Figura 17. Resultados obtenidos durante el proceso de lectura de las muestras inyectadas en el CG.....	67
Figura 18. Termoreactor y espectocolorímetro utilizados para el análisis de muestras...	68
Figura 19. Kit utilizado para el análisis de DQOT de la Maraca HACH para concentraciones de 0 a 1500 mg L^{-1}	68

PRODUCCIÓN DE METANO Y TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL CON DIFERENTES FUENTES DE MATERIA ORGÁNICA FECAL

METHANE PRODUCTION AND WATER TREATMENT OF RESIDUAL WATER WITH DIFFERENT SOURCES OF FECAL MATTER

García Galindo Olivia¹, Pedroza Sandoval Aurelio²

RESUMEN

La producción de energía es uno de los problemas de mayor actualidad en el mundo, debido a la crisis de precios a que está sujeta y el impacto ambiental que producen, principalmente los de origen fósil. Las energías alternativas están tomando auge, como una forma de abaratar costos y disminuir el impacto ambiental. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes fuentes de materia orgánica fecal a diferentes temperaturas en la producción de gas metano. En una primera fase (*In vitro*), se montaron reactores Batch de 1000 ml en condiciones de laboratorio, a los cuales se les adicionó soporte inerte y consorcio bacteriano. Se usó un diseño en bloques al azar con tres repeticiones. Los factores de variación fueron cuatro fuentes de materia orgánica: humano (H), vaca (V), cerdo (Ce), cabra (Ca), más las combinaciones dobles posibles y tres temperaturas (3, 37 y 50°C). La materia orgánica fecal (MOF) de H fue significativamente ($P < 0.05$) el de menor demanda química de oxígeno (DQO) inicial y final, con valores de 564 y 183 mg L⁻¹. Mientras que la MOF de Ce y ésta en combinación con la de Ca, fueron las de mejor producción de gas metano (CH₄), la última con un valor de 142.9 µm ml⁻¹ ($P < 0.05$). Respecto al efecto de la temperatura, se identificó que la DQO inicial y la producción de CH₄ fueron estadísticamente mayores a los 37 °C con valores de 1077.6 mg L⁻¹ y 100.2 µm ml⁻¹ respectivamente. En una segunda fase (*ex vitro*), se montó un reactor anaerobio de 1000 L adicionando 4 Kg de materia orgánica de Ce y Ca, y se monitoreó por 33 días. La DQO disminuyó conforme avanzó el tiempo de 1650 a 170 mg L⁻¹ y la producción de CH₄ aumentó de 0 a 0.520 m³.

ABSTRACT

Currently, the energy production is one of the most important problems in the world, due to the price crisis and the environment impact, that this kind of activity produces, mainly when the energy is from fossil sources. Nowadays the alternative energy is taking advantage as a way to decrease costs and to stop the environment impact. In order to evaluate different sources of fecal organic matter to different temperatures for methane gas production, an experiment was established in two phases. Phase I: *In vitro*, Batch reactors of 1000 ml were mounted with inert support and bacterial consortium. Four sources of organic matter (SOM): human (H), cow (V), pig (Ce) and goat (Ca), and the simples combinations among them and three different temperatures (3, 37, and 50°C), they were the variation factors included. The organic matter of H was significantly ($P < 0.05$) the minor treatment regarding to initial and final chemical oxygen demand (COD), with values of 564 and 183 mg L⁻¹, respectively. The best production of methane (CH₄) was obtained with the combination of Ce-Ca. This treatment produced significantly greater amount of CH₄ with an average of 142.9 µm ml⁻¹. Regarding to the effect of temperature, it was identified that the initial COD and CH₄ production were significantly higher at 37°C with values of 1077.6 mg L⁻¹ y 100.2 µm ml⁻¹, respectively. During the Phase II: Scaling; an anaerobic reactor of 1000 L was mounted and monitored for 33 days. The COD decreased over time of 1650 to 170 mg L⁻¹ and CH₄ production increased from 0 to 0.520m³.

Palabras clave: Energía alternativa, gas metano, biorreactor.

Key words: Alternative energy, methane gas, biorreactor.

¹Tesista

²Director

I. INTRODUCCIÓN

El agua es tanto un derecho y tiene un precio como insumo y un valor como recurso. La población en general, debe tomar conciencia de que el agua dulce de calidad es un recurso natural, cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo y a la vez, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino imprescindible como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza. La industria es factor de crecimiento económico y, por lo tanto, clave del progreso social, Sin embargo, demasiado a menudo la necesidad de maximizar el proceso productivo excluye de la planificación el progreso y la protección del medio ambiente (Rodríguez, *et al* 2006). México presenta un marcado contraste territorial de escasez y abundancia de agua, ya que más de dos terceras partes de su territorio son áridas o semiáridas, principalmente en el norte y el centro del país (CNA, 2001). Social, económica e hidrológicamente, el país se divide en dos grandes regiones: la zona norte, centro y noreste, donde se concentra el 77% de la población, se genera el 80% del PIB, pero únicamente ocurre el 31% del agua renovable; y la zona sur y sureste, donde habita el 23% de la población, se genera el 20% del PIB y ocurre el 69% del agua renovable (CNA, 2010).

Adicionalmente a la escasez del recurso agua, hay que agregar el problema de la contaminación de la misma y la falta de cultura para su tratamiento, del cual pueden obtenerse subproductos susceptibles de reutilizar, tales como: agua tratada para riego agrícola, producción de biocomposta, biofertilizantes y biocombustibles a partir de residuos orgánicos, entre otros. Al respecto, el sector productivo no sólo es el que más gasta agua, también es el que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos

del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas se vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles (Rodríguez, *et al* 2006).

El sistema anaerobio, es un sistema microbiológico confiable que ofrece varias ventajas, como la obtención de biogás, el cual es un combustible gaseoso que puede usarse con facilidad para distintos usos, sobre todo domésticos (Bermúdez *et al*, 2003).

Los métodos biológicos aplicados a la depuración de efluentes contaminados están siendo una opción en la remoción de materia orgánica de las aguas residuales (Castelló *et al.*, 2002). Lo anterior, aún más con la reciente crisis petrolera, el aumento de los costos, la indisponibilidad de los combustibles fósiles y la contaminación atmosférica urbana, es una preocupación creciente (Benavides *et al.*, 2007). La dependencia en los hidrocarburos (gas y petróleo) hacen que un país sea particularmente vulnerable ante las variaciones de sus precios (Sierra, 2006). Ante esta situación los biocombustibles constituyen una alternativa importante para la demanda actual energética a nivel nacional y mundial; ya que pueden ser utilizados como combustibles para el transporte con pocos cambios en las tecnologías actuales y tienen importante potencial para mejorar la sostenibilidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Carere *et al.*, 2008).

De esta manera, la producción de biogás es una alternativa viable y cada vez de mayor pertinencia. En las zonas rurales de los países en desarrollo, diversas biomásas de celulosa están disponibles en abundancia y además tienen un buen potencial para satisfacer la demanda de energía, especialmente en el sector doméstico (Shanta *et al.*, 2010).

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del trabajo fue evaluar el efecto de diferentes fuentes de materia orgánica fecal a diferentes temperaturas en la producción de gas metano y evaluar la efectividad de un tratamiento anaerobio en el agua residual.

Objetivos específicos

- Identificar la mejor fuente de materia orgánica o una combinación para producción de gas metano.
- Identificar la temperatura óptima para la producción de gas metano.
- Contribuir al diseño y operación de un sistema anaerobio para el tratamiento de agua residual y la obtención de biogás como energía alternativa.

HIPÓTESIS

La efectividad de la producción de gas metano y el tratamiento de agua residual, depende de la fuente de materia orgánica fecal utilizada.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Problemática del agua en el mundo

El agua, es uno de los recursos naturales más valiosos y también uno de los más sobrexplotados, lo cual genera una escasez cada vez mayor del vital líquido. La insuficiencia de agua dulce en el planeta, es un problema de prioridad internacional, de acuerdo a las últimas cumbres realizadas sobre tierra, agua y medio ambiente (Barkin, 2001). Aunado a la falta de agua, se tiene la falta de toda una cultura en el mejor uso y aprovechamiento de la poca que se dispone.

El 59% del consumo total de agua en los países desarrollados se destina a uso industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gasto doméstico, según se constata en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, *Agua para todos, agua para la vida* (marzo 2003). En 2025, el consumo de agua destinada a uso industrial alcanzará los $1.170 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$, cifra que en 1995 se situaba en $752 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$. El sector productor no sólo es el que más gasta, también es el que más contamina. Más de un 80% de los desechos peligrosos del mundo se producen en los países industrializados, mientras que en las naciones en vías de desarrollo un 70% de los residuos que se generan en las fábricas que vierten al agua sin ningún tipo de tratamiento previo, contaminando así los recursos hídricos disponibles (Rodríguez *et al.*, 2006).

Estos datos aportan una idea de la importancia que tiene el tratamiento y la reutilización de aguas residuales en el sector industrial en el mundo, y más aún en países

que saldan su balance de recursos hídricos con números rojos. Es el caso de España, la nación europea con mayor déficit hídrico (Rodríguez *et al.*, 2006).

2.2 Problemática del agua en México

México tiene una población de 112 millones 336 mil 538 habitantes, de los cuales 15 millones 175 mil 862 se concentran en la zona metropolitana de la Ciudad de México (INEGI, 2010). Los grandes demandantes del agua se encuentran ubicados en el norte y centro del país, lo cual se vuelve un problema para nuestro país, puesto que México presenta un marcado contraste territorial de escasez y abundancia de agua, ya que más de dos terceras partes de su territorio son áridas o semiáridas, principalmente en el norte y el centro (CNA, 2001).

A nivel nacional, la Comisión Nacional del Agua (CNA) indica que se generan 13,640 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ de agua contaminada, en donde las aguas de origen municipal contribuyen con 7,660 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ($207 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$) y las industrias generan 5,980 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ ($1,877.7 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$). Lo anterior, es un indicador de la degradación en la calidad del agua, impactos ecológicos diversos por la contaminación de este recurso y, la propia falta de abastecimiento del mismo por carecer de una cultura de tratamiento de aguas residuales (CNA, 2008).

Anualmente se consumen 58,721 millones de m^3 para riego agrícola (77%), 10,703 millones de m^3 para uso público (14%), y el 9% restante que equivalen a 7,083 millones de m^3 es destinado para el sector industrial. En México se genera un caudal de aguas residuales de $255 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, de las cuales solamente $205 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ es captado, de esta

cantidad solamente se logra tratar un 36.4% que equivalen a $74.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, esto se lleva a cabo en 1,500 plantas de tratamiento municipales existentes (CNA, 2007).

2.3 Problemática del agua en la Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera, se encuentra ubicada entre los Estados de Coahuila y Durango, México. Esta región presenta escasez de agua tanto para su uso productivo como doméstico, debido a la aleatoriedad climática y a las recurrentes sequías por cambio climático. En la región, el promedio de precipitación es de apenas 240 mm anuales; lo que indica la necesidad de aprovechar al máximo todas las posibles fuentes de agua como las residuales (Calderón, s/f).

La demanda de agua para uso urbano proviene del crecimiento de la zona metropolitana integrada por Torreón, Gómez Palacio y Lerdo, donde se concentra poco más del 70% de la población humana de la región (Guzmán *et al.*, 2006).

2.4 Aguas residuales

La reutilización de agua es muy frecuente en los estados áridos y semiáridos de nuestro país, en donde uno de los principales problemas es la escasez de agua, en muchas de estas regiones, estas aguas son utilizadas en el riego de campos agrícolas sin importar el alto grado de contaminantes que éstas contienen, pudiendo llegar a contaminar los cultivos y generar problemas a la población (CNA, 2008).

2.5 Tratamiento de agua residual

El adecuado tratamiento de aguas residuales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración

ambiental del dominio público hidráulico, marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria (Rodríguez *et al.*, 2006). El tratamiento de aguas residuales, reúne una serie de ventajas y desventajas, como las que se aprecian en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas del tratamiento de aguas residuales.

Ventajas	Desventajas
1. Recuperación de agua.	1. Visión de mal aspecto al público, así como desprendimiento de malos olores.
2. Remplazo de fertilizantes químicos: Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).	2. Superficie con contaminación. 3. Sólidos, contaminación tóxica, metales pesados y compuestos orgánicos peligrosos para el ser humano y animales.

Fuente: (Gauri, 2005).

En los tratamientos de aguas residuales, además de existir algunas desventajas, se presentan otros efectos ambientales como: (1) Emisión de gases de efecto invernadero, (2) Energía primaria de consumo asociada con tratamientos, almacenamiento y transporte.

En la actualidad, la mayor parte de la investigación en biotecnología ambiental o más específicamente en microbiológica ambiental, se encuentra enfocada a la búsqueda de nuevos métodos que permitan la generación y diseño de microorganismos, mediante técnicas genéticas que sean capaces de degradar todo tipo de compuestos. Muchos de los

procesos industriales que se encuentran en desarrollo se fundamentan en recursos biotecnológicos, eficientes, limpios y sustentables como son el tratamiento de las aguas residuales.

En base a que las descargas de aguas residuales en las redes colectoras, ríos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en los terrenos, provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal, provocan efectos adversos en los ecosistemas, por lo que el gobierno mexicano estableció los límites máximos permisibles de contaminantes que deberán satisfacer dichas descargas. Esto llevo al establecimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-067-ECOL-1994, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal, la cual fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 10 de junio de 1994, la cual marca los parámetros señalados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal establecidos en la NOM-067-ECOL-1994.

Parámetro	Límites máximos permisibles	
	Promedio diario	Instantáneo
pH (unidades de pH)	6-9	6-9
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	100	150
Grasas y aceites (mg/L)	20	30
Sólidos sedimentables (ml/L)	1.0	2.0
Demandad Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	100	150
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)	200	250
Substancias Activas al Azul de Metileno (mg/L)	5	8

Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2010).

2.6 Sistemas de tratamiento de agua residual

Los métodos biológicos aplicados a la depuración de efluentes contaminados han tenido una vasta aplicación para la remoción de materia orgánica de las aguas residuales, este es un tema sobre el cual se ha venido tomando conciencia de su importancia en los últimos años. Tradicionalmente, el tratamiento biológico de aguas residuales se ha efectuado empleando procesos y sistemas aerobios, tales como lodos activados, lagunas aireadas y filtros percoladores, sistemas que se caracterizan por la acción de bacterias y otros organismos que requieren de aire para su existencia, razón por la cual uno de los factores más importantes en este caso es la energía para

suministrar las cantidades necesarias de aire y de áreas grandes para instalar las lagunas de tratamiento (Castelló *et al.*, 2002).

Además, constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento de aguas residuales, que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes: nitrógeno (N) y fósforo (P). Es uno de los tratamientos más habituales, no solo en el caso de aguas residuales urbanas, sino en buena parte de las aguas industriales (Rodríguez *et al.*, 2006).

Existen tres diferentes tipos de tratamientos de aguas residuales: (1) tratamiento primario, consiste en la separación de sólidos (2) tratamiento secundario, remoción de materia orgánica, usando el sistema de lodos, aireación, oxidación y empleo de reactores batch y (3) tratamiento terciario, remoción de N y P o suspensión de sólidos (Massé *et al.*, 2000).

Los procesos aerobios convierten parte de la materia orgánica a dióxido de carbono (CO_2) (gas invernadero), mientras los anaerobios la convierten a dióxido de carbono y metano (CH_4) (ambos son gases de efecto invernadero). Mientras algunos procesos anaerobios permiten la recuperación energética del CH_4 , otros lo emiten directamente a la atmósfera, donde actúa como un gas invernadero más potente que el

CO₂. La combustión del biogás, ya sea para recuperación energética o para la conversión del CH₄ a CO₂, puede generar emisiones contaminantes.

2.6.1 Demanda Química de Oxígeno como parámetro para calidad de agua tratada

En México el estudio más reciente en cuanto a tratamiento de agua residual y remoción de demanda química de oxígeno, es el realizado por Valdivia *et al.*, (2005), en donde se montó una planta piloto para la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas con un filtro combinado con lecho de tezontle, en donde la mayor remoción de materia orgánica se logró con las cargas orgánicas de 5 y 8 g de Demanda Química de Oxígeno m² d⁻¹ alcanzado una remoción de 80 y 69 %, respectivamente.

2.7 Sistemas de tratamiento anaerobios

Para las aguas residuales ya sea industriales o municipales biodegradables de media y alta concentración de materia orgánica, el sistema anaerobio, es un sistema microbiológico confiable que ofrece varias ventajas, como la obtención de gas combustible (biogás), el cual es un combustible gaseoso que puede usarse con facilidad para distintos usos: cocinar, dar calor, alumbrar, entre otros (Bermúdez *et al.*, 2003).

Los procesos anaerobios, tratan la materia orgánica, transformándola en CH₄ y CO₂, mediante la ayuda de bacterias que no requieren la utilización de oxígeno (anaerobias). El metano puede ser recolectado y empleado como una fuente de energía. El biogás producido en estudios realizados por Massé *et al* (2000) contenía hasta un 75% de gas metano.

La digestión anaerobia (DA) es una tecnología estable para la bioconversión de desechos animales (estiércol) de granja (Uludag *et al.*, 2006). Desechos residuales provenientes de la industria del Ganado, pueden ser mejor identificados como una fuente de contaminación. Tradicionalmente estos residuos, pueden ser dispuestos después para compostaje, enmiendas solidas en la industria de la agricultura. Desde su uso de esta forma, han contribuido fuertemente a la degradación de recursos naturales como aire, suelo y agua, por ello, se han programado nuevas regulaciones para proteger el ambiente, estas fueron promulgadas por la EPA (1995) para proteger las áreas de aplicación de desechos animales (Miyant *et al.*, 2006).

Como tal, los desechos industriales provenientes del ganado y las agencias reguladoras han buscado tecnologías alternativas para administrar los desechos residuales de una forma amigable con el ambiente (Gauri, 2005).

La Biotecnología tiene el potencial de tratar este problema, con un costo efectivo y de forma sustentable. Aunque los desechos provenientes del ganado son complejos y poliméricos naturales, la digestión anaerobia, tiene la ventaja de estabilizar compuestos complejos y al mismo tiempo permite la regeneración química útil, generando energía y reduciendo el volumen de disposición (Myint *et al.*, 2006).

La conversión anaerobia de sustratos a biogás ha sido considerada que tiene lugar en dos fases: una fase de producción de distintos ácidos y una fase de consumo ácida. El proceso de conversión implica al menos seis reacciones independientes, en paralelo y secuencial, medidas por los diferentes grupos de la biomasa en diferentes

ambientes. Estas reacciones incluyen: (1) hidrólisis anaerobia, donde las partículas orgánicas hidrolizables complejas, tales como la celulosa y la hemicelulosa, se convierten en monómeros tales como aminoácidos, azúcares de cadena larga y ácidos grasos; (2) de fermentación, donde aminoácidos y azúcares se convierten en ácidos grasos volátiles; (3) acetogénesis, donde los ácidos grasos son convertidos en acetato e hidrógeno; (4) oxidación anaerobia, donde los productos intermedios, tales como los ácidos grasos volátiles se convierten en acetato e hidrógeno; (5) metanogénesis, el acetato es convertido en metano por ácido utilizando metanógenos y (6) metanogénesis hidrogenotrófica, donde el hidrógeno se convierte en metano por metanógenos utilizando hidrógeno (Miyant *et al.*, 2006).

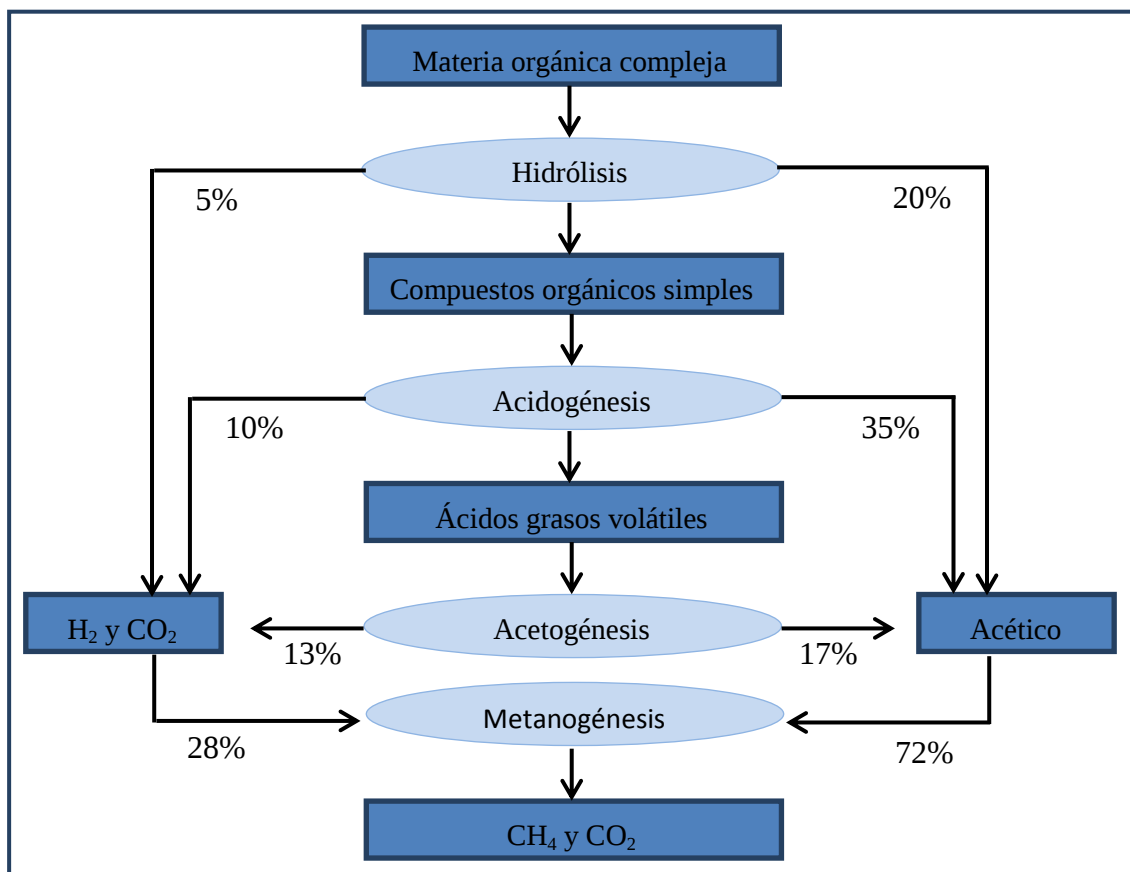


Figura 1. Esquema de la ruta de degradación anaerobia: Distribución detallada en porcentaje de la degradación de la materia orgánica. Fuente: Rodríguez *et al* (2006).

El sistema de tratamiento anaerobio para aguas residuales, puede reducir la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) mediante el uso de microorganismos y la reducción de compuestos orgánicos produciendo CH_4 y CO_2 . Este proceso es muy susceptible a los cambios de temperatura y rangos de carga. El tratamiento anaerobio, reduce compuestos orgánicos, obteniendo como resultado la producción de CH_4 y CO_2 , producidos por bacterias que trabajan en ausencia de oxígeno.

El proceso en un reactor anaerobio se caracteriza por una serie de etapas consecutivas en el tiempo, por ejemplo: llenado, reacción, sedimentación y descarga. Este tipo de reactores han probado ser una alternativa eficiente a los sistemas continuos convencionales para el tratamiento biológico de efluentes domésticos e industriales (Ketchum, 1997).

Entre las principales ventajas se encuentran: altos rendimientos de eliminación de materia orgánica biodegradable y nutrientes, flexibilidad de operación (adaptabilidad a variaciones de caudal y de carga), menores costos de inversión y operación que los sistemas aireados tradicionales, así como la producción de gas el cual puede ser empleado como energía y de esta forma reducir costos (Torrijos y Moletta, 1997).

2.7.1 Factores que intervienen el tratamiento anaerobio

2.7.1.1 Temperatura

Como otros procesos biológicos la digestión anaerobia depende fuertemente de la temperatura. De manera general, se puede decir que la tasa óptima de crecimiento de las

bacterias, ocurre dentro de rangos de temperatura y potencial de hidrógeno (pH) relativamente limitados, a pesar de que su sobrevivencia puede ocurrir dentro de rangos más amplios. Temperaturas entre los 30 a 40 °C presentan tasas máximas de digestión anaerobia, sin embargo esta es posible a temperaturas bajas (10 °C), pero la eficiencia y tasa de digestión disminuyen significativamente con la disminución de la temperatura. De esta forma, el proceso es más atractivo para su aplicación en regiones de clima tropical y subtropical, donde normalmente la temperatura del agua residual no está por debajo de los 18 °C (Van Horn *et al.*, 1994).

2.7.1.2 Potencial de Hidrógeno (pH)

El valor y estabilidad del pH en el reactor anaerobio es muy importante, porque la actividad metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH comparada con las demás poblaciones presentes: si el pH está por debajo de 6.3 o por encima de 7.8 la metanogénesis disminuye significativamente. A bajos valores de pH la fermentación ácida prevalece sobre la fermentación metanogénica, resultando en la acidificación del contenido del reactor (Van Horn *et al.*, 1994).

2.7.2 Ventajas del tratamiento anaerobio

Entre las principales ventajas del tratamiento anaerobio de aguas residuales, se encuentran: altos rendimientos de eliminación de materia orgánica biodegradable y nutrientes, flexibilidad de operación (adaptabilidad a variaciones de caudal y de carga), menores costos de inversión y operación que los sistemas aireados tradicionales, así como la producción de gas el cual puede ser empleado como energía y de esta forma reducir costos (Torrijos y Moletta, 1997).

2.8 Combustibles fósiles

La reciente crisis petrolera, el aumento de los costos, la indisponibilidad de los combustibles fósiles y la contaminación atmosférica urbana, es una preocupación creciente (Benavides *et al.*, 2007). Nuestras altas dependencias en los hidrocarburos (gas y petróleo) nos hacen particularmente vulnerables ante las variaciones de sus precios (Sierra, 2006).

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas recientemente por seres vivos, a las cuales se les denomina “biomasa”. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad última es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión. Existen varios tipos de biocombustibles, a los cuales se les clasifica de acuerdo al insumo o materia prima y a la tecnología empleada para producirlos. Debido a los avances en la tecnología, esta clasificación se realiza por generaciones (Álvarez, 2009).

Cuadro 3. Clasificación de los diferentes tipos de biocombustibles existentes.

Generación	Descripción
Primera	Insumos de procedencia agrícola, conformados por partes alimenticias de plantas, con alto contenido de almidón, azúcares y aceites.
Segunda	Residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa.
Tercera	Insumos vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos.
Cuarta	Producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas.

Fuente: Álvarez, 2009.

La producción de biocombustibles forma parte de una estrategia competitiva, con un gran potencial para impulsar una nueva estructura de mercado dentro del área agrícola. La competencia por la hegemonía mundial se gestiona a partir de la capacidad para determinar las normas generales de funcionamiento de la producción y reproducción mundial. Como elementos clave de la hegemonía internacional se pueden identificar el desarrollo de tecnologías de punta; los energéticos y materias primas, fundamentales para el mantenimiento y revolución de la propia estructura tecnológica; la fuerza de trabajo, porque es el componente vivo que garantiza la reproducción de la economía mundial capitalista.

2.8.1 Clasificación de los biocombustibles

2.8.1.1 Biocombustibles de primera generación

Algunos de los insumos son de procedencia agrícola y están conformados por las partes alimenticias de las plantas, las cuales tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites. Ejemplos de estas materias son el jugo de la caña de azúcar, granos de maíz, jugo de la remolacha o betabel, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maní o cacahuete, entre otros. También se emplean como insumos a las grasas animales, grasas y aceites de desecho provenientes de la cocción y elaboración de alimentos, y desperdicios sólidos orgánicos (Álvarez, 2009).

Los biocombustibles son producidos empleando tecnología convencional como la fermentación (para azúcares y carbohidratos), transesterificación (para los aceites y grasas), y la digestión anaerobia (para los desperdicios orgánicos). De estos procesos se

obtiene etanol, metanol y n-butanol (a partir de azúcares), biodiesel (a partir de los aceites), y biogás (mezcla de metano y anhídrido carbónico, también conocidos como gas natural y dióxido de carbono respectivamente, obtenida a partir de los desperdicios orgánicos). Las ventajas de estos biocombustibles son su facilidad de procesamiento, sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (excepto en el caso del maíz, donde el balance de estas emisiones es casi nulo) y un balance positivo en dichas emisiones, pero tiene como desventaja el desvío de recursos alimenticios hacia la producción de energéticos (Álvarez, 2009).

2.8.1.2 Biocombustibles de segunda generación

Los insumos son residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa. Ejemplos de ellos son el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallos, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, etcétera. Los procesos de producción tienen un nivel de complejidad más alto que los de primera generación, y como ejemplos destacan la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch. Este último proceso también recibe los nombres de proceso GTL y proceso BTL, cuyas siglas en inglés provienen de “Gas-To-Liquids” y “Biomass-To-Liquids” respectivamente, los cuales consisten en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol (Álvarez, 2009).

Mediante los procesos de segunda generación se fabrica etanol, metanol, gas de síntesis (mezcla de anhídrido carbonoso, mejor conocido como monóxido de carbono, e hidrógeno), biodiesel, 2,5-dimetilfurano (DMF), entre otros. La ventaja principal en la

producción de estos biocombustibles es la inexistencia de desviaciones de alimentos provenientes de la agricultura hacia el sector energético, pero su desventaja es la poca ganancia en disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el procesamiento de los insumos, respecto a los biocombustibles de primera generación (Álvarez, 2009).

2.8.1.3. Biocombustibles de tercera generación

Los insumos son vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les denomina “cultivos energéticos”. Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido, y las algas verdes y verdeazules (Álvarez, 2009).

Los procesos de obtención de biocombustibles se encuentran en fase de desarrollo, sin embargo, se ha logrado producir biodiesel y etanol a nivel de planta piloto. Las ventajas de estos biocombustibles son el secuestro de anhídrido carbónico para la producción de los insumos y un balance positivo en la emisión de gases de efecto invernadero, pero su desventaja es la utilización de tierras de cultivo de alimentos para sembrar los insumos, con excepción de las algas verdes (Álvarez, 2009).

2.8.1.4 Biocombustibles de cuarta generación

Los biocombustibles son producidos a partir de bacterias genéticamente modificadas, las cuales emplean anhídrido carbónico o alguna otra fuente de carbono para la obtención de los biocombustibles. A diferencia de las generaciones anteriores, en las que también se pueden emplear bacterias y organismos genéticamente modificados

como insumo o para realizar alguna parte de los procesos, en la cuarta generación, la bacteria es la que efectúa la totalidad del proceso de producción de los biocombustibles. Actualmente esta generación de biocombustibles se encuentra en fase teórica, sólo se conoce la posible ruta de síntesis del etanol a partir de anhídrido carbónico, sin embargo, depende totalmente de la información genética de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas importantes (Álvarez, 2009).

Como es sabido, la humanidad ha hecho uso de la biomasa por varios miles de años. El uso directo de la misma sin procesamiento alguno podría constituir una generación cero de los biocombustibles, entre los cuales se pueden mencionar a la leña, la paja de trigo, el rastrojo de otras plantas de cultivo, el estiércol del ganado, y el carbón vegetal. No es sino hasta fines del siglo XIX que se comenzó a procesar la biomasa para producir combustibles derivados de la misma. A finales del siglo XX aparecieron los primeros mercados de estos recursos energéticos y se vislumbra un mayor crecimiento, desarrollo y expansión de los mismos tendiente a su globalización (Álvarez, 2009).

2.9 Combustibles fósiles en el mundo

El daño al ambiente que está dejando el uso de combustibles fósiles como el petróleo, es uno de los criterios que lleva a plantear en foros internacionales la premura de desarrollar tecnologías alternativas. El llamado que hace el Protocolo de Kioto a comprometerse en la disminución de emisión de gases de efecto invernadero, justificaría en primera instancia, la producción de biocombustibles que, para algunos expertos en la materia, prometen condiciones de sustentabilidad que no cumplen los combustibles fósiles. La estrategia de competitividad de países como Estados Unidos, al producir de

manera intensiva biocombustibles, se ha desarrollado a la par de una serie de compromisos internacionales como es el Protocolo de Kioto, a fin de encontrar energías alternativas (González y Castañeda, 2008).

El Protocolo de Kioto en su artículo tercero establece el compromiso de los países miembros a investigar, promover, desarrollar y aumentar el uso de formas nuevas y renovables de energía, “de tecnologías de secuestro del CO₂ y tecnologías avanzadas y novedosas ecológicamente renovables”. Así, el Protocolo de Kioto fomenta en verdad una gestión sustentable de energías alternativas que reduzcan la emisión de gases tóxicos, estas energías podrían ser la biomasa, la energía eólica, solar, entre otras (González y Castañeda, 2008).

La comunidad internacional, preocupada por los problemas del cambio climático, desempeña un papel central en la difusión para el desarrollo de políticas que llevan al control y reducción significativos de las emisiones de CO₂. La gestión de estrategias de producción de energía renovable que contribuyan a la conservación de la naturaleza y la salud humana se presenta como un aspecto central que justifica el desarrollo de bioenergéticos, como son el caso del bioetanol y biodiesel (González y Castañeda, 2008). Otro biocombustible producido en Estados Unidos es el biogás. A 2009, existen 485 plantas de aprovechamiento del energético, y están en proyecto unas 520 plantas más. En California se han efectuado pruebas en vehículos para suplir al gas natural por biogás. (Álvarez, 2009).

Desde una perspectiva meramente económica y de rentabilidad, el desarrollo de bioenergéticos se presenta como una alternativa que permitirá desarrollar una economía menos dependiente de las importaciones del petróleo y del comportamiento de los precios internacionales de éste (González y Castañeda, 2008).

La producción de biocombustibles forma parte de una estrategia competitiva dentro del mercado agrícola internacional. Estados Unidos busca terminar con su dependencia de las importaciones petroleras desarrollando energías alternativas. La expansión de la producción de etanol derivado del maíz en Estados Unidos, principalmente ha incrementado la demanda de este cereal llevando a un aumento en sus precios. Por décadas, el mercado global agrícola se ha caracterizado por el aumento creciente en los niveles de producción y productividad, una débil demanda y una baja significativa en los precios agrícolas y de alimentos. El aumento en el precio de los alimentos que se experimentó desde el año 2006, en especial del maíz, tiene que ver con la demanda de productos agrícolas para la producción de bioetanol (González y Castañeda, 2008).

2.10 Combustibles fósiles en México

El Senado de la República aprobó el 26 de abril de 2007, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. De acuerdo con la Secretaría de Energía (Sener) la creación de la ley obedece a la urgente necesidad de producción de combustibles menos agresivos a la atmósfera, además del cumplimiento internacional del Protocolo de Kioto, firmado por México.

En México, la iniciativa de contar con una Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, aprobada en 2006 y corregida en 2007 se plantea, ante la inminente escasez de los hidrocarburos fósiles en el mundo. Se busca, con esta ley, “nuevas alternativas energéticas a partir de la gran diversidad geográfica, y que por sus condiciones produce diversas variedades de productos agropecuarios, forestales, biotecnológicos, que permiten producir bioenergéticos que sustituirán a los energéticos tradicionales” (González y Castañeda, 2008).

Los biocombustibles constituyen una alternativa importante para la demanda actual energética a nivel nacional y mundial ya que pueden ser utilizados como combustibles para el transporte con pocos cambios en las tecnologías actuales y tienen importante potencial para mejorar la sostenibilidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Carere *et al.*, 2008).

El aumento de la industrialización, el crecimiento de la población y el sistema vehicular está ejerciendo una enorme presión sobre el combustible fósil. Esta presión sobre la energía trae la atención al “biogás” como una fuente de energía alternativa, es decir económicamente viable y sostenible con un número ilimitado de potencial. En las zonas rurales de los países en desarrollo, diversas biomásas de celulosa (estiércol, residuos agrícolas, etc.) están disponibles en abundancia y además tienen un buen potencial para satisfacer las demandas de energía, especialmente en el sector doméstico (Shanta *et al.*, 2010).

2.11 Producción de gas metano

Desechos residuales provenientes de la industria del Ganado, pueden ser mejor identificados como una fuente de contaminación. Tradicionalmente estos residuos, pueden ser dispuestos después para compostaje, enmiendas solidas en la industria de la agricultura. Desde su uso de esta forma, han contribuido fuertemente a la degradación de recursos naturales como aire, suelo y agua, se han programado nuevas regulaciones para proteger el ambiente, estas fueron promulgadas por la EPA (1995) para proteger las áreas de aplicación de desechos animales. Como tal, los desechos industriales provenientes del ganado y las agencias reguladoras han buscado tecnologías alternativas para administrar los desechos residuales de una forma amigable con el ambiente (Gauri, 2005).

La Biotecnología tiene el potencial de tratar este problema, con un costo efectivo y de forma sustentable. Aunque los desechos provenientes del ganado son complejos y poliméricos naturales, la digestión anaerobia, tiene la ventaja de estabilizar compuestos complejos y al mismo tiempo permite la regeneración química útil, generando energía y reduciendo el volumen de disposición.

La digestión anaerobia de desechos complejos en forma líquida (<5% solidos totales) es una forma madura de la tecnología que puede ser estudiada para implementar de forma exitosa la escala. Algunos estudios tienen adaptada esta tecnología para digerir partículas de residuos en forma suspendida (5-15% de los sólidos totales). Más recientemente, las facilidades de digerir los desechos de forma anaerobia de alta

substratos solidos (>20% de solidos contenidos), se conoce como “digestión de secado” (Miyant *et al.*, 2006).

La conversión anaerobia de partículas de sustrato a biogás puede ser regulada por dos distintas fases. El proceso de conversión involucra al menos seis pasos independientes, paralelos y reacciones secuenciadas mediante diferentes grupos de biomasa de diferentes ambientes, estas reacciones incluyen: (Uludag *et al.*, 2007).

1. Hidrólisis anaerobia, en donde las partículas orgánicas complejas hidrosolubles e insolubles en celulosa y hemicelulosa, son convertidas en monómeros como aminoácidos, azúcares y grasas de cadena larga.
2. Fermentación, en donde los aminoácidos y azúcares son convertidos a grasas ácidas volátiles.
3. Acetogénesis, en donde grasas de cadena larga son convertidas en acetato e hidrógeno.
4. Oxidación anaerobia, en donde productos intermediarios, tales como grasas ácidas volátiles son convertidas en acetato e hidrógeno.
5. Metanogénesis acetoclástica, en donde el acetato es convertido a metano empleando ácido metanógeno (ácido en la metanogénesis).
6. Metanogénesis hidrogenotrófica, en donde el hidrogeno es convertido en metano por hidrógeno empleado en la metanogénesis.

2.11.1 Producción de gas metano en rumiantes y su impacto ambiental

La agricultura y la producción pecuaria contribuyen ampliamente a las emisiones antropogénicas de CH₄, CO₂ y N₂O a la atmósfera. El aumento de las concentraciones de estos gases provoca un calentamiento de la superficie terrestre y la destrucción de la capa de ozono en la estratosfera (Primavesi *et al*, 2004). Dentro de la gama de gases a los que se les atribuye efecto invernadero, se considera el CO₂ el más abundante y el que actualmente tiene un mayor aporte al incremento del calentamiento global. Hoy día las concentraciones de CH₄ son inferiores a las de CO₂, sin embargo el primero, se está incrementando rápidamente y además posee un efecto 21-30 veces más contaminante con respecto al CO₂, considerándose que en el tiempo el CH₄ pueda ser predominante (McCaughey *et al.*, 1999).

La producción de CH₄ en los últimos años ha tomado gran importancia en la producción animal debido a sus efectos negativos en el medio ambiente. El ganado posee un sistema digestivo que tiene la capacidad de aprovechar y convertir material fibroso con altos contenidos de carbohidratos estructurales, en alimentos de alta calidad nutritiva, la carne y la leche. Sin embargo por sus características, este mismo sistema digestivo también produce CH₄, un potente gas con efecto invernadero que contribuye con aproximadamente el 18% del calentamiento global ocasionado por actividades productivas con animales domésticos, superado sólo por el dióxido de carbono.

Cuadro 4. Estimativos de las principales fuentes naturales y antropogénicas de metano a nivel global (millones de Ton. año⁻¹).

Natural		Energía/Desechos		Agricultura	
Pantanos	115	Gas y petróleo	50	Cultivos de arroz	60
Océanos	15	Carbón mineral	40	Animales domésticos	80
Termitas	20	Carbón vegetal	10	Abonos orgánicos	10
Combustión	10	Rellenos sanitarios	30	Combustión	5
		Aguas residuales	25		
Total	160		155		155

Fuente: Johnson y Johnson, 1995.

La actividad ganadera produce entre 15-20% de la emisión mundial de gas metano. El ganado bovino emite gas metano porque en su proceso digestivo, que ocurre bajo condiciones anaeróbicas, participan diferentes tipos de bacterias. Éstas, degradan la celulosa ingerida a glucosa, que fermentan luego a ácido acético y reducen el dióxido de carbono, formando metano en el proceso. La emisión de metano representa energía alimenticia que se transforma en forma de gas y no es aprovechada por el animal (Montenegro y Abarca, 2000).

McCaughey *et al* (1999), reportan que el 87% de la producción de metano se da en el rumen, y 13% en el tracto digestivo posterior. De este último, aproximadamente el 89% es absorbido hacia la sangre y expirado a través de los pulmones. Esto indica que cerca del 98% del total de metano producido por los rumiantes puede ser expirado a través de la boca y los orificios nasales.

Johnson y Johnson (1995) indican que los dos principales factores responsables de las variaciones en la producción de metano son: la cantidad de carbohidratos

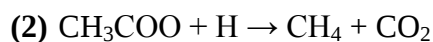
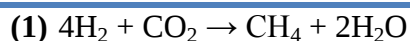
fermentados en el retículo-rumen, lo cual implica diversas interacciones dieta-animal, que afectan el balance entre las tasas de fermentación de estos carbohidratos y la tasa de pasaje. El otro mecanismo es la relación de ácidos grasos volátiles (AGV) producidos, la cual regula la producción de hidrógeno y la subsecuente producción de metano.

Van Kessel y Russell, citado por Carmona *et al* (2005), señalan tres aspectos fundamentales para la producción de metano: (1) las bacterias metanógenas son sensibles a pH bajos, (2) la disminución en la relación acetato:propionato dependiente del pH es posiblemente causada por una inhibición de la metanogénesis, y (3) la inhibición de la metanogénesis es causada por la toxicidad de los ácidos de la fermentación que se produce a un pH bajo.

El metano es producido por microorganismos del rumen durante la fermentación anaeróbica de carbohidratos solubles y estructurales principalmente, siendo estos últimos preponderantes en dietas basadas en forrajes. El metano es producido por las bacterias metanógenas *archaea*, un grupo microbial filogenéticamente distinto de las eubacterias (verdaderas bacterias) (Weimer, 1998.). Moss *et al* (2000), citado por Carmona *et al* (2005) señalan que unas y otras divergen en algunos aspectos, entre los que resaltan que las *Archaea* no tienen polímeros de peptidoglicanos en su pared celular y los lípidos intracelulares son diferentes en composición.

La producción de metano en la naturaleza se da principalmente por dos vías (Cuadro 4).

Cuadro 5. Principales rutas de producción de gas metano.



H=hidrógeno, CO_2 =dióxido de carbono, CH_4 =metano, H_2O =agua, CH_3COO =acetato.

En el rumen la producción de metano se da principalmente por la primera vía, debido a que esta requiere menos tiempo para la generación de las poblaciones (4-12 h). La segunda vía, denominada acetoclástica, no tiene tanto efecto debido a que los tiempos de generación para las poblaciones metanógenas deben ser mayores (Weimer, 1998).

Las bacterias metanógenas incluyen: *Methanobrevibacter ruminantium*, *Methanobacterium formicicum*, *Methanomicrobium mobile*. Otra especie, *Methanosarcinas*, es frecuente sólo en ovejas con dietas basadas en melaza (Yocoyama y Jhonsson, 1993).

Las bacterias metanógenas constituyen una clase especial en la población ruminal por su papel en la regulación de la fermentación total al eliminar H_2 . La reducción de CO_2 con H_2 es el método primario por el que se produce CH_4 en el rumen, sin embargo algunas bacterias metanógenas como *Methanosarcina barkerii*, utilizan metanol, metilamina y acetato para producir CH_4 . Al mantener baja la concentración de H_2 , mediante la formación de CH_4 , las bacterias metanógenas promueven el crecimiento de otras especies bacterianas y permiten una fermentación más eficaz (Yokoyama y Johnson, 1993).

En la región lagunera, existen diversos sistemas de tratamiento de aguas residuales, los cuales están principalmente vinculados a las grandes empresas, pero en la actualidad no hay sistemas que puedan ser adaptados a las pequeñas viviendas que se encuentran en el medio rural, principalmente debido a que en la Comarca Lagunera existe competencia por el agua entre los diferentes consumidores. Dicha competencia es determinada por la baja disponibilidad del recurso y la existencia de diferentes usuarios como la agricultura de riego por bombeo y gravedad, el sector residencial, la ganadería y la industria (Guzmán *et al.*, 2006).

El crecimiento de la población, industria y ganadería redujo el agua para uso agrícola. La Comarca Lagunera comprende 220 mil ha, parte de ésta es el distrito de riego 017 con un área máxima irrigable de 105 mil ha. La máxima área normalmente irrigada es 96 mil ha, pero varía cada año, dependiendo de la disponibilidad de agua. En la región predominan los forrajes necesarios para la producción pecuaria, aunque también se cultivan hortalizas y algunos frutales. El problema de escasez se ha agudizado en años recientes debido a la baja eficiencia en el uso del recurso, pues el volumen de agua aplicado por cultivo excede a los requerimientos (SAGARPA-CEIEGDRS, 2003).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación geográfica

El presente estudio, se realizó en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA-UACH) de la Universidad Autónoma Chapingo en Bermejillo, Mapimí, Dgo. La región de Bermejillo está ubicada en las coordenadas 104°36'36" y 103°33'36" longitud Oeste y los 26°5'24" y 25°28'48" de latitud Norte al extremo norte del estado de Durango. Adicionalmente, se contó con el apoyo del Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV-IPN) del Instituto Politécnico Nacional, ubicado en el kilómetro 9.6 Libramiento Norte Carretera Irapuato-León 36821 Irapuato Gto. México, localizado en las coordenadas 20°43'8"Norte, 101°19'43"Oeste.

Las muestras fueron procesadas en la URUZA-UACH, aquí mismo se realizó la parte de escalamiento y validación del estudio realizado *in vitro*; mientras que el análisis correspondiente a la cuantificación de gas metano, se realizó en el CINVESTAV-IPN, mediante el apoyo técnico y de equipo en esta institución.

3.2 Diseño del Estudio

El presente estudio se llevó a cabo en dos fases: Fase I o fase *in vitro* y Fase II o fase de escalamiento y validación esto con la finalidad de encontrar la mejor fuente de materia orgánica y la temperatura óptima para producción de gas metano (CH₄), para de esta forma conocer la viabilidad de la aplicación de esta biotecnología.

3.3 Fase I: *In vitro*

3.3.1 Colecta de muestras

Las fuentes de materia orgánica empleadas se obtuvieron de distintos sitios: la materia orgánica de humano, se obtuvo de los vertederos de agua residual de la URUZA; la de cerdo y cabra se tomó de los corrales del ganado porcino y caprino; la de vaca se colectó del rancho 18 de julio, anexo a la URUZA. Dichas muestras fueron colectadas y transportadas a los laboratorios de la URUZA en contenedores plásticos (Figura 2) cerrados, en donde se midió potencial de hidrógeno (pH) y demanda química de oxígeno (DQO), para conocer qué tan contaminada se encontraba el agua residual a tratar; posteriormente al final del experimento se cuantificaron nuevamente estos parámetros para conocer qué tan eficiente fue el proceso al que las muestras fueron sometidas.



Figura 2. Colecta de la muestra en el sitio de muestreo y su transporte al laboratorio.

3.3.2 Establecimiento y operación del Reactor Batch

El ensayo experimental fue establecido en reactores Batch de 1000 ml de capacidad, los cuales contenían 10 g de soporte inerte a base de plástico de botellas y 50 ml de consorcio bacteriano (Figura 3). Se emplearon 4 g de materia orgánica fecal y

fueron aforados a 700 ml con agua común, esto con el fin de encontrar la mejor combinación de materia orgánica fecal para la producción de gas metano.



Figura 3. Preparación y montaje de los reactores Batch en el laboratorio.

Se empleó plástico como medio de soporte para establecer la asociación bacteriana debido a su fácil manejo y disponibilidad en la zona de estudio. El plástico fue lijado para crear una mayor porosidad y permitir una mejor fijación del consorcio bacteriano, posteriormente fue cortado en secciones de 5 cm aproximadamente y colocados dentro de los digestores. El agua residual a tratar se introdujo por la parte superior (influyente), llegando así al soporte plástico.

Una vez que se introdujo el material a tratar en los reactores, se cerraron y se extrajo el aire hasta llevarlos a condiciones de anaerobiosis. Posteriormente se tomó una muestra de gas, con ayuda de una aguja y tubo vacutainer (Figura 4), la muestra se almacenó para su posterior cuantificación. El mismo procedimiento se repitió semanalmente hasta finalizar el experimento.



Figura 4. Toma de muestra de gas metano para su posterior cuantificación.

3.3.3 Diseño Experimental

Se usó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Los factores de variación fueron las fuentes de materia orgánica fecal (FMOF): vaca (V), humano (H), cabra (Ca), cerdo (Ce) y las diferentes combinaciones simples (V-H, V-Ca, V-Ce, H-Ca, H-Ce, Ca-Ce), más el testigo, dando un total de 11 tratamientos sometidos a 3 diferentes temperaturas (3°C, 37°C y 50°C), haciendo un total de 99 unidades experimentales.

3.3.4 Variables evaluadas

- Potencial de Hidrógeno (pH), medido con el potenciómetro Conductronic PC45
- Demanda Química de Oxígeno (DQO), mediante el colorímetro HACH DR/890

- Cuantificación de gas metano (CH_4), mediante Cromatografía de gases (CG) con uso de equipo Agilent Technologies modelo 7890

Las variables de pH y DQO fueron medidas al inicio y al final del experimento, correspondiente a las fechas 24 de noviembre y 15 de diciembre de 2011, respectivamente. Lo anterior de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-30-SCFI-2001 “Análisis de agua-determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas para determinar demanda química de oxígeno total y potencial de hidrógeno” (SEMARNAT, 2011). Durante el transcurso del proyecto, se realizaron cuatro mediciones de metano de forma semanal para posteriormente cuantificarlo mediante CG.

3.4 Fase II: Escalamiento y Validación

En base a los resultados obtenidos en la fase I, se procedió a montar un Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA) de 1000 L de capacidad (Figura 5), para lo cual se procedió a coleccionar muestra de materia orgánica fecal de cerdo y cabra de los mismos sitios que se coleccionó para la fase I. Para ello se emplearon 4 Kg de materia orgánica (2 Kg de cerdo y 2 Kg de cabra), 10 Kg de soporte inerte a base plástico de botellas y 50 L de consorcio bacteriano. Una vez montado el reactor y obtenida la formación de la película, se adicionó la materia orgánica a tratar y se monitorearon cada tercer día por un período de 33 días: las variables de temperatura, potencial de hidrógeno y demanda química de oxígeno. Con base en estas determinaciones se estimó la producción de gas metano.



Figura 5. Montaje y operación del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Fase I: In vitro

A medida que pasó el tiempo, el consorcio bacteriano logró adaptarse al sustrato, lo cual se hizo evidente con la formación de la biopelícula en el soporte. De acuerdo al análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$), se identificaron efectos de tratamiento para las variables de pH, DQO y la producción de CH_4 , tanto por las fuentes de materia orgánica fecal, como por las temperaturas a las que éstas fueron expuestas.

4.1.1 Potencial de Hidrógeno (pH)

De acuerdo al análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$), hubo una gran variación del pH al inicio del experimento, dependiendo de la fuente de materia orgánica, correspondiente a los valores más altos a las fuentes H, H-Ce, H-Ca y Ce-Ca; en tanto que el resto registraron pH menores de 7. En general se identificó una tendencia hacia una ligera acidificación al final del periodo de evaluación (Cuadro 5).

El pH es un parámetro crítico en el crecimiento de microorganismos, ya que cada tipo de microorganismo solo puede crecer en un rango estrecho de pH, fuera del cual mueren rápidamente. Durante el crecimiento los microorganismos modifican el pH del medio que los contiene, normalmente haciéndolo disminuir, lo cual se puede deber a diversos factores, uno de los cuales es la liberación de productos de reacciones metabólicas.

Cuadro 6. Efecto de la fuente de materia orgánica fecal (FMOF) en el potencial de hidrógeno inicial y final de los diferentes tratamientos. Bermejillo, Dgo. 2012.

FMOF	pHI	pHF
Sin MOF	7.000 k	7.127 ab
V	7.572 i	7.238 ab
H	8.580 a	7.212 ab
Ca	7.456 j	6.986 b
Ce	8.066 e	7.333 a
H-V	7.970 f	7.268 ab
H-Ca	8.340 c	7.211 ab
H-Ce	8.436 b	7.421 a
V-Ca	7.726 h	7.328 a
V-Ce	7.920 g	7.323 a
Ce-Ca	8.20 d	7.224 ab

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. pHI=Potencial de Hidrógeno Inicial pHF= Potencial de Hidrógeno Final.

Los resultados obtenidos para este parámetro, fueron similares a los reportados por Maldonado (2008), quien trabajó con aguas complejas en donde observó que los valores de pH variaron entre 6 y 9 en los sistemas de tratamiento con biopelículas, lo cual indica que la actividad microbiana se comporta de forma eficiente. En este estudio el pH tuvo una tendencia hacia la acidificación conforme avanzó el tiempo, lo cual es fácil de observar en la Figura 6. Van Kessel y Russell (1995), señalan que: (1) las bacterias metanógenas son sensibles a pH bajos, (2) la inhibición de la metanogénesis es causada por la toxicidad de los ácidos de la fermentación que se produce a un pH bajo.

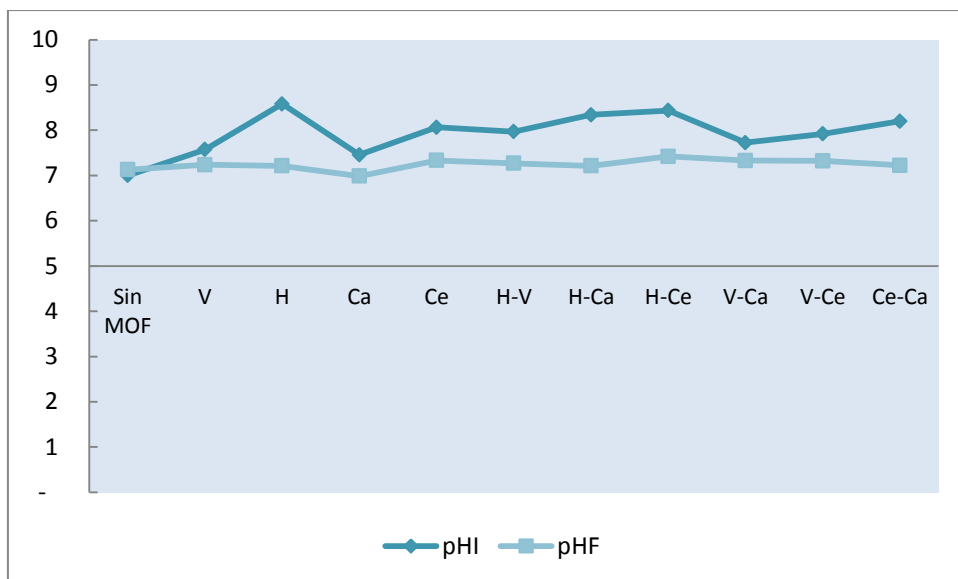


Figura 6. Comportamiento del pH al inicio (pHI) y final (pHF) de la fase in vitro.

4.1.2 Demanda Química de Oxígeno

De acuerdo al análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$), se identificaron efectos de tratamiento para la variable de DQO, tanto por las fuentes de materia orgánica fecal, como por las temperaturas a las que éstas fueron expuestas (Cuadro 6).

La fuente de materia orgánica fecal de humano fue significativamente ($P < 0.05$) el mejor tratamiento con un 96% de remoción de DQO final, con valores de 564 a 183 mg L^{-1} (sin considerar el testigo), respectivamente: en comparación a la materia orgánica de cerdo, cuyos valores variaron de 1516 y 660.500 mg L^{-1} , siendo el tratamiento sin combinación con otra fuente de materia orgánica más bajo de remoción de DQO con un 56%, pero debido a esto fue uno de los tratamientos con mayor producción de gas metano. El resto de los tratamientos está en valores intermedios entre los anteriormente citados. Lo anterior significa que la materia orgánica procedente de cerdo, tienen un

proceso más lento de degradación, expresándose en mayor cantidad de demanda química de oxígeno y por tanto ello pudiera estar relacionado a una mayor producción de gas metano, lo cual efectivamente se corrobora en la mayoría de las fechas de muestreo de esta variable, donde la fuente orgánica de cerdo sin combinación con otra fuente de materia orgánica fecal fue el tratamiento con mayor producción de gas metano, en tanto que la combinación de materia orgánica fecal de cerdo con cabra se identificó como el tratamiento significativamente mejor en la producción de biogás. El tratamiento significativamente más bajo en la producción de biogás fue cuando se usó materia orgánica humana, la cual se considera de efecto nulo al ser estadísticamente igual al testigo.

De esta manera, se destaca que la materia orgánica de cerdo sin combinación con otra fuente de materia orgánica, es la mejor opción para producción de biogás y que ello se identifica con la menor demanda de DQO con valores de 1516 a 660.50 mg L⁻¹; sin embargo en términos de interacciones existe una tendencia a destacar la interacción de materia orgánica fecal de cerdo cuando se mezcla con la de cabra con valores de 1500 a 561.67 mg L⁻¹. El resto de los tratamientos, tienen una producción media entre los tratamientos extremos, anteriormente citados (Cuadro 6).

Cuadro 7. Disminución de la DQO al término del experimento (DQOF) de las diferentes fuentes de materia orgánica fecal (FMOF). Bermejillo, Dgo. 2012.

FMOF	DQOI	DQOF
Sin MOF	0.000h	6.17f
V	916.500e	232.33cde
H	564.000g	183.00def
Ca	1500.000b	364.00bcd
Ce	1516.667a	660.50a
H-V	744.000f	86.33ef
H-Ca	1500.000b	241.17cde
H-Ce	1005.833d	416.83bc
V-Ca	1500.000b	269.83cde
V-Ce	1074.000c	545.33ab
Ce-Ca	1500.000b	561.67ab

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. DQOI=Demanda Química de Oxígeno Inicial DQOF= Demanda Química de Oxígeno Final.

Gráficamente, se logra apreciar el comportamiento de la DQO en los diferentes tratamientos empleados (Figura 7).

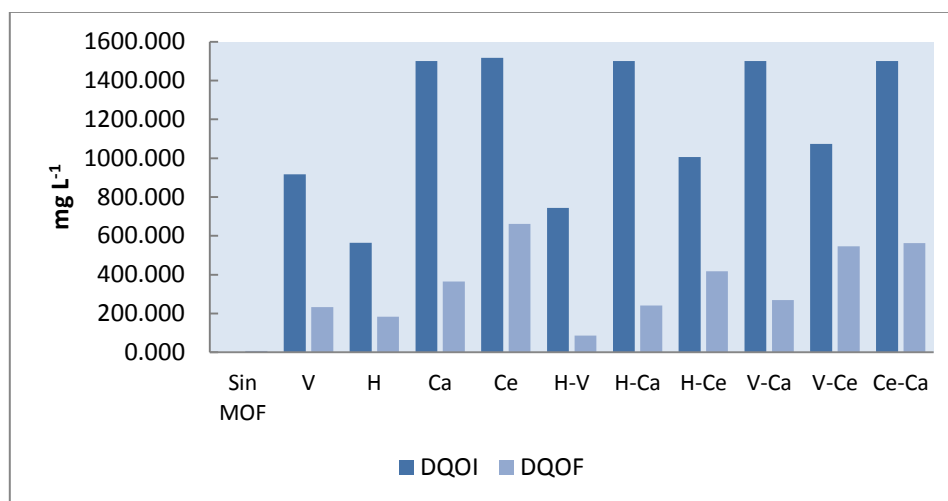


Figura 7. Concentraciones de la DQO al inicio y final de la fase in vitro.

Adicionalmente, la DQO inicial fue estadísticamente mayor a los 37 °C con un valor de 1,077.6 mg L⁻¹, respecto a los 1,073.1 demandados en las temperaturas extremas (3 y 50 °C), entre las cuales no hay diferencia ni numérica, ni estadística. De

igual forma para la DQO final, la temperatura menor (3°C) fue la que tuvo valores significativamente mayores de DQO, siguiéndole en importancia la de 50 y finalmente la más baja fue la de 37 °C (Cuadro 7). Lo anterior es congruente ya que se espera que la menor temperatura debiera tener la mayor DQO, es decir un menor porcentaje de eficiencia en comparación a temperaturas elevadas. Esto, puede indicarnos que la mayor parte de los microorganismos que conforman el consorcio bacteriano pueden ser del tipo mesófilo, es decir, adaptados a rangos de temperatura óptimos entre los 20 y 40°C.

Cuadro 8. Efecto de la temperatura (T) en la demanda química de oxígeno de aguas bajo tratamiento. Bermejillo, Dgo. 2012.

T (°C)	DQOI (mg L ⁻¹)	DQOF (mg L ⁻¹)
3	1073.1364b	349.045a
37	1077.6818a	296.818c
50	1073.1061b	327.136b

Prueba de Tukey (P< 0.05). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. DQOI=Demanda Química de Oxígeno Inicial DQOF= Demanda Química de Oxígeno Final.

4.1.2.1 Disminución y Porcentaje de Remoción de DQO

A partir del 24 de noviembre de 2011 que comenzó el periodo de monitoreo del influente (agua sin tratamiento), sobre el efluente (agua tratada a través del biorreactor) se observó que a medida que el tiempo pasó, el consorcio bacteriano que conformó la biopelícula fue adaptándose al nuevo sustrato, con lo cual disminuyó la DQO, expresándose mediante el incremento de la eficiencia de remoción de la DQOT (Cuadro 8).

Cuadro 9. Comparación de medias de disminución y eficiencia en la reducción de DQO. Bermejillo , Dgo. 2012.

FMOF	Eficiencia de la remoción DQO (%)	Disminución de DQO (mg L ⁻¹)
Sin MOF	0.000d	0.000c
V	74.650abc	25.350abc
H	96.217a	3.783c
Ca	75.733abc	24.267abc
Ce	56.461bc	43.535ab
H-V	88.922ab	11.604bc
H-Ca	83.922ab	16.078bc
H-Ce	58.565bc	41.435ab
V-Ca	82.011abc	17.989abc
V-Ce	49.084c	50.916a
Ce-Ca	62.556bc	37.444ab

Prueba de Tukey (P< 0.05). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Como puede observarse en el Cuadro 8 la fuente de materia orgánica de humano (H), fue el tratamiento que presentó el mayor porcentaje de remoción de DQO, con un 96.217% de eficiencia, mientras que la combinación V-Ce, fue el tratamiento con menor porcentaje de disminución con tan solo un 49.084%, el resto de los tratamientos, presentaron valores dentro de estos rangos, a excepción del testigo que obtuvo valores de cero; gráficamente podemos observar el comportamiento obtenido tanto en la disminución como en la remoción de DQO en los diferentes tratamientos (Figura 8).

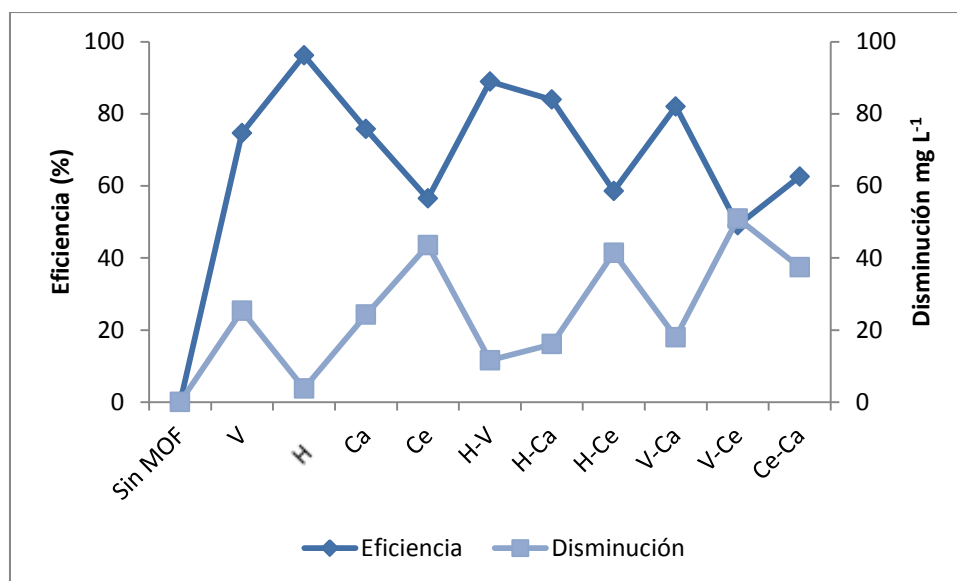


Figura 8. Disminución y de eficiencia de remoción de DQO por tratamiento.

4.1.3 Producción de Gas Metano

En el Cuadro 9 se muestra que la producción de gas metano, se incrementó a los 14 días después de iniciado el experimento, cuando el consorcio bacteriano tiene un proceso de crecimiento exponencial, en donde se dan altos consumos de sustrato (materia orgánica) y por consiguiente existe una mayor producción de subproductos (gas metano), disminuyendo después de los 14 días, lo cual posiblemente se deba a que en ese momento los microorganismos se encuentran en una etapa de estabilización de crecimiento, es decir, existe un cambio dentro de la actividad enzimática en donde el consumo de sustrato será solo para mantenerse. En la mayoría de los tratamientos la producción de metano se ve afectada en el día 28, debido principalmente a que ha comenzado la etapa de muerte de los microorganismos, debido a la falta de alimento y la acumulación de subproductos generados de sus procesos metabólicos (Figura 9). Este comportamiento es similar al descrito por Sanz (2011). Al respecto, Behling *et al* (2005), reportaron una baja producción de gas metano en la etapa de adaptación, esto en

los 5 primeros días y una producción exponencial dentro del rango de 5 a 15 días, para después entrar en una etapa de estabilización del día 15 al 20. Finalmente se observó una disminución (etapa de muerte) los días 20 a 25.

Cuadro 10. Efecto de la fuente de materia orgánica fecal (FMOF) en la producción de gas metano. Bermejillo, Dgo. 2012.

FMOF	P. CH ₄ ($\mu\text{M ml}^{-1}$) 7 DDIE	P. CH ₄ ($\mu\text{M ml}^{-1}$) 14 DDIE	P. CH ₄ ($\mu\text{M ml}^{-1}$) 21 DDIE	P. CH ₄ ($\mu\text{M ml}^{-1}$) 28 DDIE
Sin MOF	0.24d	0.20d	0.21d	0.23b
V	18.0cd	48.46cd	38.7bcd	33.18ab
H	0.74d	0.31d	0.48d	0.42b
Ca	54.26abc	72.79bcd	103.28abc	37.7ab
Ce	76.65ab	133.27abc	120.0ab	50.88ab
H-V	4.32cd	6.44d	3.58d	4.17b
H – Ca	14.55cd	22.11d	8.0cd	20.97ab
H – Ce	46.24bcd	83.29bcd	40.72bcd	92.75ab
V – Ca	31.38dcd	42.07cd	16.75cd	47.05ab
V – Ce	80.06ab	154.95ab	85.87abcd	127.15 ^a
Ce – Ca	97.08a	197.44a	154.01a	123.28 ^a

Prueba de Tukey ($P < 0.05$). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. DQOI=Demanda Química de Oxígeno Inicial DQOF= Demanda Química de Oxígeno Final P.CH₄ = Producción de gas metano DDIE=Días después de iniciado el experimento.

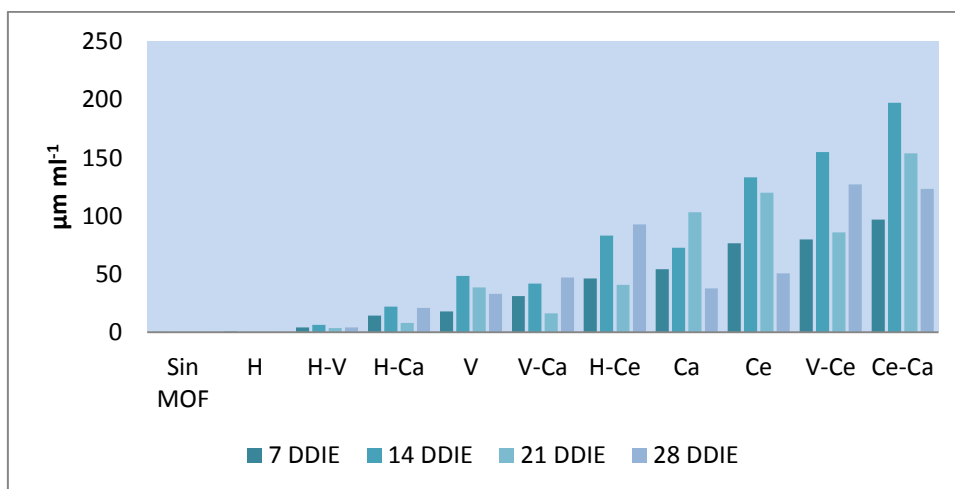


Figura 9. Producción de gas metano ($\mu\text{mol ml}^{-1}$) días después de iniciado el experimento (DDIE) en aguas que contienen materia orgánica fecal de humano (H), vaca (V), cabra (Ca), cerdo (Ce) y sus combinaciones simples, comparado con un testigo (SIN MOF).

La producción de biogás, fue mayor en los tratamientos sometidos a 37 y 50 °C, excepto ésta última en la primera y tercera evaluación. Lo anterior es congruente dado que se espera que a mayor temperatura, se acelera el proceso de degradación de la materia orgánica y por ende hay una mayor producción de biogás, siendo la de 37 °C la más consistente a lo largo del período del experimento; en tanto que la temperatura extrema tiende a inhibir dicho proceso (Cuadro 10).

Cuadro 11. Efecto de la temperatura final en la producción de gas metano a partir de diferentes fuentes de material orgánica fecal. Bermejillo , Dgo. 2012.

TEMP. (°C)	P. CH ₄ (μM ml ⁻¹) 7 DDIE	P.CH ₄ (μM ml ⁻¹) 14 DDIE	P.CH ₄ (μM ml ⁻¹) 21 DDIE	P.CH ₄ (μM ml ⁻¹) 28 DDIE
3	2.9c	4.2c	4.0c	1.17b
37	64.8a	100.2a	95.7a	73.1a
50	47.6b	103.2a	56.0b	72.3a

Prueba de Tukey (P< 0.05). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. P.CH₄ = Producción de metano DDIE=Días después de iniciado el experimento.

Lo anterior es relevante, dado que la temperatura de 37°C es la más frecuente durante el período de primavera-verano, y ello permitiría tener una buen producción de gas metano usando materia orgánica de cerdo o la combinación de ésta con la de cabra; ambos insumos orgánicos de alta frecuencia en la Comarca Lagunera que se destaca por la explotación intensiva de este tipo de especies ganaderas.

Los resultados anteriores coinciden con los reportados por Maldonado (2008), quien indica que las condiciones de temperatura óptima para el tratamiento de agua residual se encuentra entre 30 y 40°C, puesto que en rangos inferiores a 15°C o

superiores a 45°C, el crecimiento de bacterias es inhibido, provocando una disminución en la eficiencia de remoción de DQO.

4.1.4 Correlación entre pH, DQO y CH₄

En el Cuadro 11, se observa que existe una correlación significativa ($P=0.0014$) positiva entre el pH inicial y la demanda química de oxígeno inicial, es decir con un pH alcalino el proceso de remoción de la DQO tiende a ser menos eficiente. De igual forma se presentó una correlación significativa ($P=0.0030$) para el pH inicial y demanda química de oxígeno final, es decir a medida que el pH acidifica ligeramente el proceso de la remoción de DQO se vuelve más eficiente. En cuanto a la producción inicial de gas metano y la demanda química de oxígeno final, existe una correlación altamente significativa ($P=0.0002$) positiva, lo cual indica que mientras los valores de DQO sean más elevados, que significa un trabajo con materia orgánica de difícil degradación la producción de gas metano aumenta. De igual forma existe un efecto de sinergismo para el potencial de hidrógeno final y producción de gas metano final ($P=0.0008$), es decir a pH ligeramente ácidos, la producción de gas metano se vuelve más eficiente. Lo mismo pasó ($P=0.0034$) con la demanda química de oxígeno final y producción de gas metano final, lo que indica una existencia de un efecto sinérgico, es decir conforme aumenta la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno aumenta la producción de gas metano. Esto explica que la fuente de materia orgánica fecal compleja tarde más tiempo en degradarse y produzca una mayor cantidad de gas metano.

Cuadro 12. Análisis de correlación de Pearson entre las variables de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y producción de gas metano (CH₄).

	PHI	DQOI	PICH ₄	PHF	DQOF	PFCH ₄
PHI	1.00000	0.31625 0.0014	0.10176 0.3162	0.22235 0.0270	0.29541 0.0030	0.12638 0.2126
DQOI		1.00000	0.41026 <0.0001	0.04887 0.06310	0.58003 <0.0001	0.24470 0.0146
PICH ₄			1.00000	0.27543 0.0058	0.36984 0.0002	0.69855 <0.001
PHF				1.00000	0.05959 0.5579	0.33051 0.0008
DQOF					1.00000	0.29200 0.0034
PICH ₄						1.00000

PHI=Potencial de hidrógeno inicial PHF=Potencial de hidrógeno final DQOI=Demanda Química de Oxígeno Inicial DQOF= Demanda Química de Oxígeno Final PICH₄ = Producción Inicial de gas metano PFCH₄= Producción final de gas metano.

4.2 Fase II: Escalamiento y Validación

4.2.1 Potencial de Hidrógeno, Temperatura y Demanda Química de Oxígeno

De acuerdo al análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey (P<0.05), se identificaron efectos entre los días de muestreo para las variables de potencial de hidrógeno, temperatura y demanda química de oxígeno (Cuadro 12).

Cuadro 13. Efecto del tiempo en el potencial de hidrógeno, temperatura y demanda química de oxígeno.

DDIE	pH	T (°C)	DQO (mg L ⁻¹)
1	8.00a	22a	1650a
3	7.00b	22a	1067b
5	7.00b	21b	846c
7	7.00b	21b	836c
9	7.00b	20c	785d
11	7.00b	19d	792d
13	7.00b	19d	668e
15	7.00b	19d	644f
17	7.00b	18e	582g
19	6.66bc	18e	500i
21	7.00b	19d	565h
23	7.00b	19d	419j
25	7.00b	18e	413j
27	7.00b	18e	395j
29	7.00b	18e	384k
31	7.00b	18e	380k
33	6.33cd	18e	170l

Prueba de Tukey (P< 0.05). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. DDIE=Días después de iniciado el experimento pH=Potencial de Hidrógeno T=Temperatura DQO=Demanda Química de Oxígeno.

4.2.2 Potencial de Hidrógeno (pH)

De acuerdo al análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey (P<0.05), se identificaron efectos entre los días de muestreo para la variable de pH (Cuadro 12). Al inicio del experimento, se identificó un pH significativamente más alcalino de 8: en tanto que el resto del período se mantuvo más alcalino de 7, hasta finalizar en 6.33 un valor ligeramente ácido, esto debido a la liberación de productos de reacciones secundarias de las bacterias que conformaron el consorcio bacteriano.

De acuerdo a Van Haandel y Britz (1994), el valor y estabilidad del pH en un reactor anaerobio es muy importante, debido a que la actividad metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH comparado con las demás poblaciones

presentes; si el pH está por debajo de 6.3 o por encima de 7.8, la metanogenesis disminuye significativamente. A valores bajos de pH la fermentación ácida prevalece sobre la fermentación metanogénica, resultando en la acidificación del contenido del reactor. Los resultados obtenidos en el presente estudio oscilaron entre 8.0 y 6.33 como pH inicial y pH final respectivamente, es decir no hubo gran diferencia entre los valores propuestos por Van Handel y Britz lo cual se vio reflejado en la producción de gas metano a lo largo del experimento, donde los valores de pH fueron de 7.0.

4.2.3 Temperatura (T)

De acuerdo al análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$), se identificaron efectos entre los días de muestreo para la variable de T (Cuadro 12), siendo el día 9 estadísticamente diferente al resto del período de evaluación, registrando una temperatura de 20°C, mientras que el resto de los días de muestreo se obtuvo como temperatura inicial 22°C hasta finalizar con 18°C como temperatura más baja registrada durante el experimento.

Los procesos biológicos de digestión anaerobia dependen fuertemente de la temperatura. Lo cual de manera general se puede decir que la tasa óptima de crecimiento de las bacterias, ocurre dentro de rangos de temperatura limitados, a pesar de que su sobrevivencia puede ocurrir dentro de rangos amplios (30 a 40°C), sin embargo esta es posible a temperaturas bajas (10°C), pero la eficiencia del sistema de tratamiento anaerobio decrece significativamente con la disminución de la temperatura, lo cual no se observó de forma evidente en el presente estudio puesto que los rangos de temperaturas que se registraron en la temporada de muestreo oscilaron en un rango de 18 a 22°C.

4.2.4 Demanda Química de Oxígeno (DQO)

De acuerdo al análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P < 0.05$), se identificaron efectos entre los días de muestreo para la variable de DQO (Cuadro 12). La mayoría de los días de muestreo presentaron diferencias estadísticas, excepto los días 5 y 7; 9 y 11; 23, 25 y 27; 29 y 31 que fueron estadísticamente iguales respectivamente.

A partir que comenzó el periodo de monitoreo del influente (agua sin tratamiento), sobre el efluente (agua tratada a través del biorreactor) se observó que a medida que el tiempo pasó, el consorcio bacteriano que conformó la biopelícula fue adaptándose al nuevo sustrato, con lo cual disminuyó la DQO, expresándose mediante el incremento de la eficiencia de remoción de la DQOT.

En este estudio y debido a que en el momento en que comenzó a formarse la biopelícula fue sometida a cambios drásticos en el tipo de sustrato, el sistema se adaptó rápidamente a los cambios, iniciando con una DQO de 1650 mg L^{-1} , llegando a su máxima eficiencia de un 90% el día 33, registrando una DQO de 170 mg L^{-1} , es decir conforme transcurrió el tiempo la eficiencia de la remoción de DQO se vio favorecida aún con las temperaturas registradas en el periodo de muestreo, lo cual indica otras de las ventajas y eficiencias del sistema de tratamiento anaerobio (Figura 10).

Lo anterior puede atribuirse a lo que menciona Ruiz *et al.*, (1997) quien dice que la biopelícula sufre cargas de shock, que es básicamente el cambio de sustrato, esto tomando en cuenta que las bacterias metanogénicas son extraordinariamente sensibles a

la presencia de compuestos tóxicos en el agua residual a la que fueron sometidas durante el tratamiento anaerobio, sin embargo, conforme avanza el periodo del proceso y este es suficientemente largo, los microorganismos tienen la capacidad de adaptarse a ciertas concentraciones de las diversas sustancias tóxicas. Este periodo es denominado tiempo de retención de sólidos (TRS) en el reactor, el cual puede estar referido a un tiempo de días o hasta meses, lo que hace que en este último caso se requiera una mayor período para que los microorganismos se adapten a las concentraciones de las sustancias tóxicas.

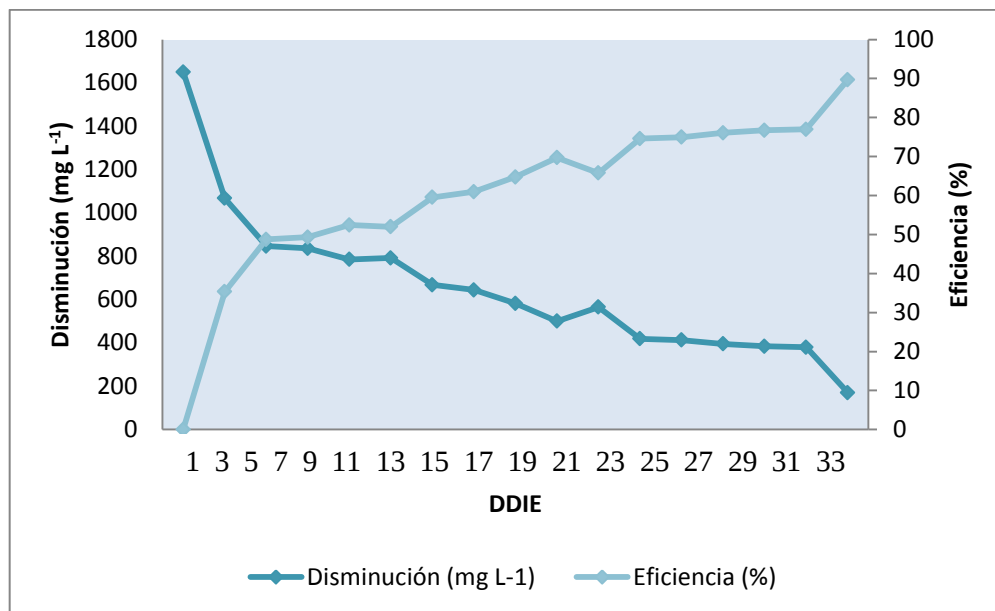


Figura 10. Disminución y eficiencia de la DQO días después de iniciado el experimento (DDIE).

Los valores obtenidos de remoción de DQO de 1650 a 170 mg L⁻¹, entran dentro de los parámetros establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-067-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de los sistemas de alcantarillado o

drenaje municipal, puesto que estable un parámetro de 200 mg de DQOT L⁻¹ y este sistema obtuvo 170 mg L⁻¹, con lo que cumple con los parámetros establecidos en la norma y en base a esto, el agua del efluente puede ser reutilizada para el riego de parques y jardines.

4.2.5 Estimación de producción de gas metano

Puesto que no fue posible hacer una medición directa de la producción de gas metano, se hizo una estimación de producción del mismo, de acuerdo a la ecuación identificada por Cámara y colaboradores (s/f), mediante la ecuación (1):

$$VCH4 = (0.3516) [(So - S)(1/1000) - 1.42Px] \quad (1)$$

Dónde:

VCH4= volumen de metano (m³)

So= DQO última del afluente (mg L⁻¹)

S= DQO ultima de efluente (mg L⁻¹)

Px= Masa neta de tejido celular producida diariamente (Kg día⁻¹)

De acuerdo a la ecuación mencionada anteriormente, se obtuvo una estimación de la producción de gas metano por día durante el período que permaneció la materia orgánica en el reactor. Lo anterior mediante la DQO obtenida durante los muestreos realizados a través del tiempo (Cuadro 13).

De acuerdo al Cuadro 13, la estimación de producción de gas metano, se incrementó a los 13 días después de iniciado el experimento, cuando de acuerdo a Sanz (2011), el consorcio bacteriano tiene un proceso de crecimiento exponencial, en donde se dan altos consumos de sustrato y por consiguiente se presenta una mayor producción de gas metano. De igual forma en el Cuadro 13 también logra observarse un decremento constante en la DQO, lo cual de acuerdo a Massé *et al* (2000) nos indican que los procesos anaerobios, tratan la materia orgánica, transformándola en metano y dióxido de carbono, es decir conforme la materia orgánica se degrada, existe una mayor producción y liberación de subproductos (gas metano y dióxido de carbono) del consorcio bacteriano empleado manifestándose mediante el incremento de la estimación de gas metano.

Cuadro 14. Efecto del tiempo en la estimación de la producción de gas metano en base a la demanda química de oxígeno.

DDIE	DQO (mg L ⁻¹)	EPCH ₄ (m ³)
1	1650a	0m
3	1067b	0.205l
5	846c	0.283k
7	836c	0.286k
9	785d	0.304j
11	792d	0.302j
13	668e	0.345i
15	644f	0.354h
17	582g	0.376g
19	500i	0.404e
21	565h	0.381f
23	419j	0.433d
25	413j	0.435d
27	395j	0.441c
29	384k	0.445cb
31	380k	0.447b
33	170l	0.520a

Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. DDIE=Días después de iniciado el experimento DQO=Demanda Química de Oxígeno EPCH₄=Estimación de la Producción de Gas Metano.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se logra observar que hubo un incremento significativo constante en la estimación de la producción de gas metano, con mayor énfasis a partir del día 13 con una estimación de producción de 0.345 m³, llegando a su máximo nivel el día 33 con 0.520 m³ (Figura 11).

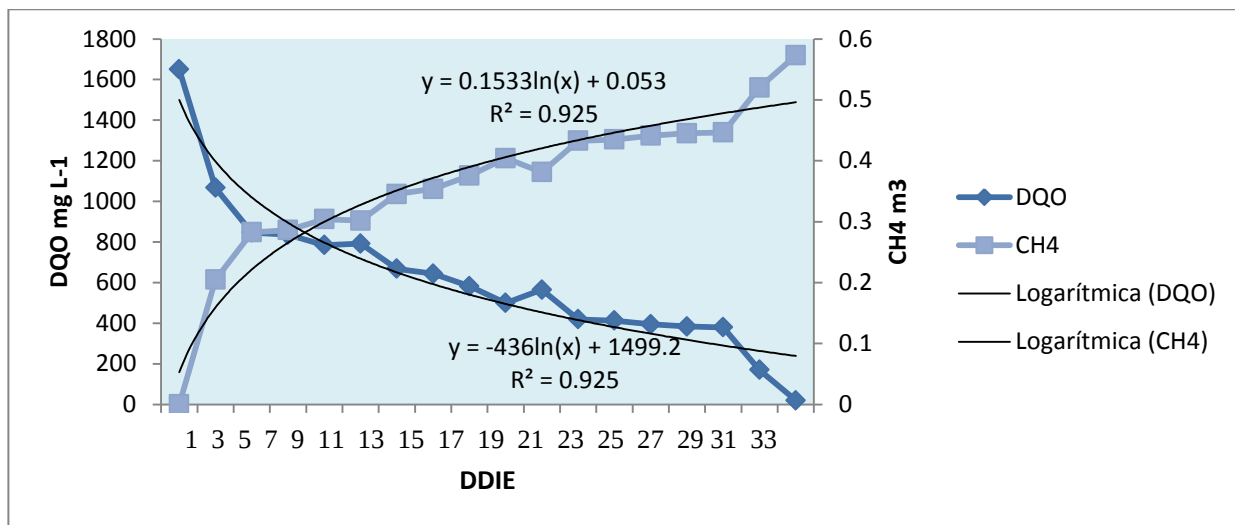


Figura 11. Estimación de la producción de gas metano (EPCH₄) en m³ días después de iniciado el experimento (DDIE) en base a la demanda química de oxígeno obtenida (DQO).

4.2.6 Correlación entre pH, T, DQO y CH₄

En el cuadro 14, se observa que existe una correlación significativa ($P=0.001$) entre la demanda química de oxígeno y la estimación de producción de gas metano, lo cual indica que conforme la DQO disminuye la estimación de gas metano tiende a aumentar de forma considerable, efecto similar al obtenido entre temperatura y DQO ($P=0.001$) donde a temperaturas más elevadas incrementan la eficiencia de la remoción de DQO.

Esto es congruente, pues ya se había mencionado anteriormente que las bacterias tiene un rango de temperatura óptimo de crecimiento (desde 40 hasta 10°C) y a lo largo del experimento se presentaron temperaturas dentro de estos rangos, lo cual volvió más eficiente la degradación de materia orgánica, aumentando la remoción de DQO y esto a su vez permite tener un incremento en la estimación de producción de gas metano.

Cuadro 15. Análisis de correlación de Pearson entre las variables de Potencial de Hidrógeno (pH), Temperatura (T), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Estimación de la Producción de Gas Metano (EPCH₄).

	pH	T	DQO	EPCH ₄
pH	1.00000	0.55363 0.0171	0.83082 <0.0001	-0.83055 <0.0001
T		1.00000	0.86364 <0.0001	-0.86383 <0.0001
DQO			1.00000	-1.0000 <0.0001
EPCH ₄				1.00000

PH=Potencial de hidrógeno T=temperatura DQO=Demanda Química de Oxígeno EPCH₄=Estimación de producción de gas metano.

V. CONCLUSIONES

5.1 Fase I o Fase In vitro

El potencial de hidrógeno de los distintos tratamientos y a diferentes temperaturas, tiende hacia la acidez al finalizar el experimento y de esta forma vuelve más eficiente el proceso de la remoción de la demanda química de oxígeno y aumenta la producción de gas metano.

De las temperaturas empleadas, la mayor remoción de DQO y producción de metano se presentó en los tratamientos expuestos a 37°C.

La mayor producción de metano fue a los 14 días de establecido el experimento, en todos los tratamientos, principalmente aquellos sometidos a 37°C.

La mayor producción de metano fue en los tratamientos donde se usó como fuente de materia orgánica fecal de cerdo, cabra y la combinación de ambas.

5.2 Fase II o Fase de Escalamiento y Validación

Los resultados obtenidos en la fase I coinciden con los obtenidos en la fase II, es decir el pH tiene hacia una ligera acidez al finalizar el experimento, volviendo más eficiente la remoción de la demanda química de oxígeno y aumentando la producción de gas metano obtenida mediante una estimación del mismo.

VI. RECOMENDACIONES

Es importante y recomendable realizar una caracterización del consorcio bacteriano empleado, para conocer exactamente que bacterias están presentes y en que concentración.

Es necesario y de gran importancia, continuar realizando estudios similares, que permita ir estableciendo sistemas de tratamiento de aguas residuales y producción de biogás como energía alternativa, adecuando las condiciones, métodos y tecnología, de acuerdo al tipo de aguas residuales que se desea tratar y que puedan ser adaptados principalmente en las comunidades marginadas de zonas áridas y semiáridas.

También es importante que se regule la disposición de aguas residuales indicando las proporciones y elementos permitidos en el drenaje de aguas. El monitoreo continuo de la calidad de agua de desecho daría bastante luz para establecer normas de desecho, debido a que actualmente las plantas tratadoras se encuentran el problema de antibióticos, anticonceptivos, etc., elementos que no permiten o hacen muy difícil el tratamiento para convertir al agua en “usable” para otros sectores productivos.

VII. LITERATURA CITADA

Álvarez M. C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. Universidad Autónoma de México UNAM. Recuperado de: <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>

Barkin D. (2001). Herramientas y metodologías para trabajar la concentración social en el manejo del agua. Universidad Autónoma Mexicana-Unidad Xochimilco. Recuperado de: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/dbarkin.pdf>

Behling Q. E H, Caldera M. Y.A, Marin L. J.C, Rincón L. L.C. Fernpane A. L.M. (2005). Eficiencia de un reactor anerobico en el tratamiento del efluente de una tenería. (Tesis inédita de maestría). Departamento Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Zulia, Venezuela.

Bermúdez S. R, Rodríguez P. S, Martínez A. M y Teny B. A. (2003). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente.

Benavides, A., Benjumea, P., y Pashova, V. (2007). El biodiesel de aceite de huiguerilla como combustible alternativo. Redalyc, 74 (153), 141-150.

Calderón M. C. G. (s/f). Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua. Recuperado de: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas_secundarios.pdf

Cámara Da L., M. Hernández y Paz Luiselena. (s/f). Manual de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales alimenticias. Miniproyecto de Ingeniería Química.

Carere, C. R., R. Sparling, N. Cicek, and D. B. Levin. (2008). Third generation biofuels via direct cellulose fermentation. Genome Biology , 9:242. Recuperado de: http://www.vurup.sk/pc/vol49_2007/issue2/pdf/pc_2_2007_jordanov.pdf

Carmona J. C., Bolívar D. M. y Giraldo L. A. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. Revista colombiana de ciencias pecuarias.

Castelló E. A Ghislieri D., L Borzacconi (2002). Optimización del funcionamiento de un SBR para la remoción de materia orgánica y nutrientes. Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales; AIDIS. Gestión Inteligente de los Recursos Naturales: Desarrollo y Salud. México, D.F.

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2001). Compendio básico del agua en México 2002, tercera edición. Recuperado de: <http://www.fao.org/DOCREP/006/Y5062S/y5062s08.html>

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2007). El agua en México. Recuperado de: http://www.cmic.org/mnsectores/agua/reunionCONAGUA/El_agua_en_Mexico.ppt

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2008). Estadísticas del agua en México. Edición 2008 (en línea). Comisión Nacional del Agua. Consulta 30/05/10. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx>

Comisión Nacional del Agua (CNA), (2010). Atlas digital del agua 2010. Contraste regional entre el desarrollo y la disponibilidad del agua, 2008. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/atlas.html?seccion=0&mapa=8>

Environmental Protection Agency (EPA), (1995). Natinal air quality: status and trends. Recuperado de: <http://www.epa.gov/airtrends/aqtrnd95/>

Gauri S. M. (2005). Treatment of wastewater from abbatoirs before land application. Journal: Bioresource Technology 97 (2006) 1119-1135.

González M. A. y Castañeda Z. Y. (2008). Biocombustibles, biotecnología y alimentos. Impactos sociales para México. Universidad Autónoma de México (UNAM). Nueva Época. Año 21. Núm. 57. Recuperado de: <http://scielo.unam.mx/pdf/argu/v21n57/v21n57a4.pdf>

Guzmán S. E., García S. J. A., Mora F. S., Fortis H. M., Valdivia A. R y Portillo V. M. (2006). La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. Agrociencia 40: 793-804. 2006. Recuperado de: <http://www.colpos.mx/agrocien/Bimestral/2006/nov-dic/art-11.pdf>

Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-067-ECOL-1994, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de los sistemas de alcantarillado o drenaje municipal. Recuperado de: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/gacetas/228/67.html>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), (2010). Censo de población y vivienda 2010. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/comunicados/default.aspx?c=17181&s=est>

Johnson K. A, Johnson D. E. (1995). Methane emissions from cattle. J Anim Sci. 73: 2483-2492.

Ketchum, J. (1997). Design and physical features of sequencing batch reactors"; *Wat. Sci. Tech.*, V.35, N°1, pp.11-18.

Maldonado, C. A. (2008), Tratamiento de agua residual del rastro, mediante biopelículas anaerobias desarrolladas en *Opuntia imbricata*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Biología, 70 p.

Massé D.I. y Masse,L. (2000). Characterization of wastewater from hog slaughterhouse in Eastern Canada and evaluation of their in-plant wastewater treatment system. *Can. Agr. Eng.* 42: 139-146.

McCaughey W, Wittenberg K, Corrigan D. (1999). Impact of pasture type on methane production by lacting beef cows. *Can J An Sc.* 79 (2): 221-226.

Miyant, N. Nirmalakhandan, R.E. Speece. (2006). Anaerobic fermentation of cattle manure: Modeling of hydrolysis and acidogenesis. *Journal of Watere Research* 41 (2007)323-332.

Montenegro J, y Abarca S. (2000). Fijación de carbono, emisión de metano y de óxido nitroso en sistemas de producción bovina en Costa Rica. En: Intensificación de la ganadería en Centroamérica: beneficios económicos y ambientales. CATIE – FAO – SIDE. Ed Nuestra Tierra. 334 p.

Moss A. R, Jouany J. P, Newbold J. (2000). Methane production by ruminants: its contribution to global warming. INRA EDP Sciences. *Ann Zootech*, 49: 231-253.

Primavesi O, Shiraishi RT, Dos Santos M, Aparecida M, Teresinha T, Franklin P. (2004). Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras. *Pesq agropec bras.* 39 (3): 277-283

Rodríguez F. A. A., Letón G. A., Rosal G. R., Dorado V. M., Villar F. S. y Sanz G. J. (2006). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de Vigilancia Tecnológica.

Sanz. J.L. (2011). Microbiología Ambiental. Taller práctico. Universidad Autónoma Metropolitana.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Comités Estatales de Información Estadística y Geográfica para el Desarrollo Rural Sustentable (SAGARPA-CEIEGDRS), (1990-2003). Anuario estadístico de la producción agropecuaria de la Región Lagunera Durango-Coahuila. Delegación en la Región Lagunera Durango-Coahuila. Subdelegación de Planeación y Desarrollo Social. Cd. Lerdo. Durango. 163 p.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2011). Análisis de agua-determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas para determinar demanda química de oxígeno total y potencial de hidrógeno. Recuperado de:

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-030-SCFI-2001.pdf>

Shanta S. y Ramakant, S. (2010). Biogas production enhancement by soya sludge amendment in cattle dung digesters. *Biomass and Bioenergy* 34(2010)1278-1282.

Sierra M. E. (2006). Producción y uso de biocombustibles en México. Taller Práctico Sobre Bioenergía. Secretaría de Energía (SENER). Recuperado de: http://www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/bioenergia_3_ma_elena_sierra.pdf

Torrijos, M. y Moletta, R. (1997). Winery wastewater depollution by sequencing batch reactor; *Wat. Sci. Tech.* V.35, N°1, pp 249-250, 1997.

Uludag D., G.N Demirer, C. Frear y S. Chen. (2006). Anaerobic digestion of dairy manure with enhanced ammonia removal. *Journal of Environmental Management* 86 (2008) 193-200.

Uludag D., G.N. Demier, C. y Frear, S. Chen. (2007). Anaerobic digestion of dairy manure with enhanced ammonia removal. *Journal of Environmental Management* 86(2008)193-200.

Valdivia. S., C. A.; González, B. O. y González, M. S. (2005). Filtración combinada en el lecho de tezontle para el tratamiento de aguas residuales. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México.

Van Haandel, M. M y Britz T.J. (1994). Characterisation and numerical analysis of the microbial community in raw baker's yeast factory effluent. *Water SA* Vol. 20 No. 2. Recuperado de: <http://www.wrc.org.za/downloads/watersa/1994/April/0784%20abstract.pdf>

Van Horn, H.H., Wilkie, A.C., Powers, W.J., Nordstedt, R.A. (1994). Components of dairy waste management systems. *J. Dairy Sci.* 77, 2008–2030.

Van Kessel J. S y Russell J. B. (1995). The effect of pH in vitro methane production from ruminal bacteria (Abstract # 2). In: 23rd Biennial Conference on Rumen Function. Chicago, Illinois, E.U. November 14-16, 1995; Vol. 23.

Weimer P. J. (1998). Manipulating ruminal fermentation: a microbial ecological perspective. *J Anim Sci*, 76: 3114 – 3122.

Yokoyama M.T y Johnson K.A. (1993). Microbiología del rumen e intestino. En: Church DC. El rumiante: fisiología digestiva y nutrición. Editorial Acribia S.A. Zaragoza, España, 137-156.

VIII. APENDICE

8.1 Cuantificación de gas metano

La cuantificación de metano, se realizó en el cromatógrafo Agilent Technologies 7890A, con las siguientes características observadas en el Cuadro 11, empleando como gas de arrastre Helio (He) a 5 PSI aproximadamente 8 mL min^{-1} .

Cuadro 16. Condiciones empleadas en el CG para cuantificación de metano.

Temperatura (°K)			
Horno	Inyector	Detector	Gas de arrastre
40	250	250	Helio (He)

Para hacer la calibración del equipo, primero se procedió a inyectar una muestra testigo, la cual consistió en 250 μL de gas natural, y posteriormente se realizó una curva con seis puntos de referencia (Cuadro 12).

Cuadro 17. Mezclas de gas natural con aire inyectadas en el CG para realizar curva de calibración.

Mezclas inyectadas para calibración (μL)						
Gas natural	0	25	50	100	200	250
Aire	250	225	200	150	50	0

Para inyectar tanto el testigo como las muestras, se apoyó de una jeringa de 250 μL de capacidad (Figura 12).



Figura 12. Jeringa empleada para inyectar las diferentes muestras en el CG.

8.2 Curva de calibración

Se realizó una regresión lineal, con los seis diferentes estándares inyectados (Cuadro 1), dando como resultado la obtención de una curva de calibración, con un intercepto de cero (Figura 13).

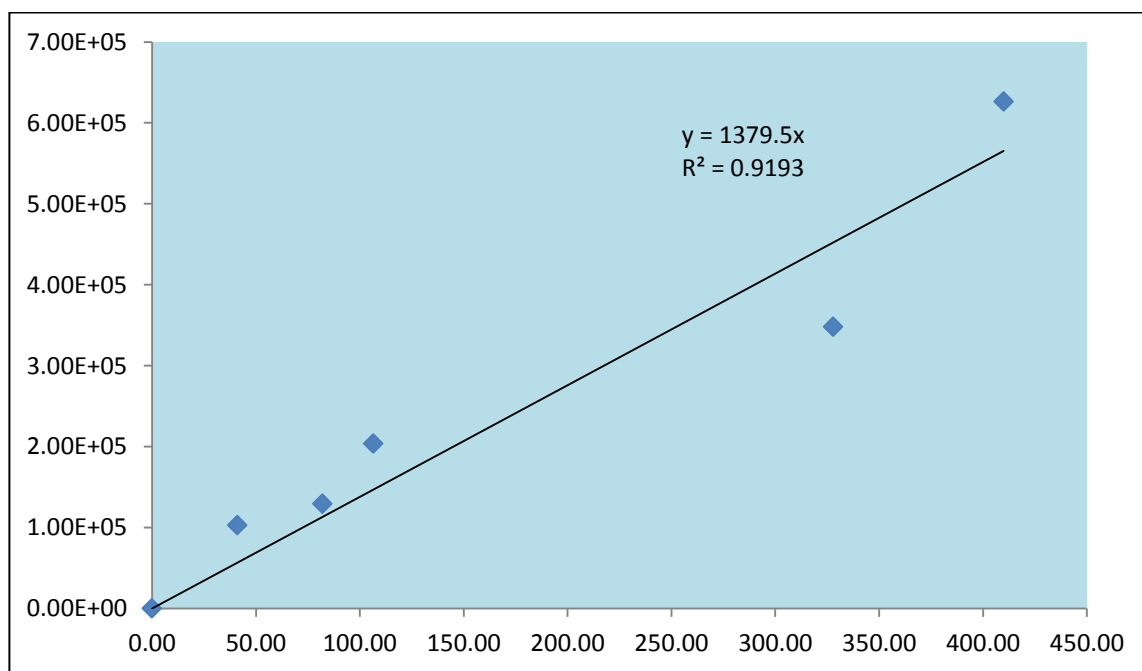


Figura 13. Curva de calibración obtenido de la regresión lineal realizada con las seis lecturas de las muestras estándar inyectadas en el CG.

8.3 Inyección de muestras problemas

Una vez que se conoció el equipo y se obtuvo la curva de calibración con las muestras estándar inyectadas, se procedió a inyectar las muestras problemas; para lo cual, primero se tomó una muestra de cada biorrecator, la cual consistió en 7 mL, que fueron colocados en tubos vacutainer, los cuales se etiquetaron para su correcta identificación (Figura 14).



Figura 14. Muestras tomadas de los biorreactores para su posterior lectura en el CG.

Una vez que se obtuvieron las muestras de cada uno de los biorreactores, se procedió a realizar la lectura de dichas muestras en el CG, el procedimiento utilizado fue sencillo, consistió en tomar una muestra de 250 μ L de cada tubo vacutainer con ayuda de la jeringa empleada para toma de muestras gas en el CG (Figura 15), y se inyectaron en el detector del CG para su posterior cuantificación (Figura 16).

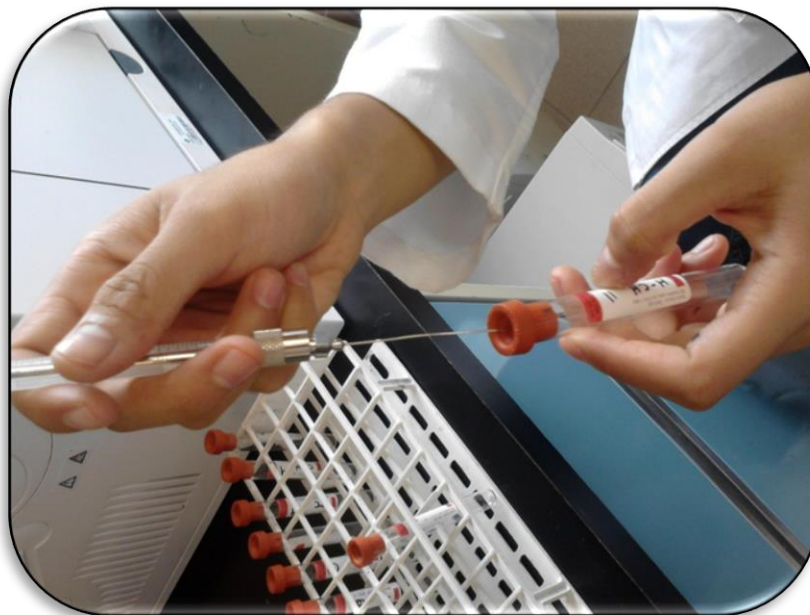


Figura 15. Toma de muestra de 250 μL , de los tubos vacutainer, con ayuda de la jeringa cromatográfica.



Figura 16. Inyección de las distintas muestras a analizar en el inyector del CG.

Una vez inyectadas las muestras en el CG, simplemente se presionaba la tecla “READ”, para poder analizar la muestra inyectada, y se dio un tiempo de 5 minutos para la cuantificación. Al finalizar los 5 minutos, automáticamente se imprime una hoja de resultados de la muestra analizada, esta hoja contiene el tiempo de retención de la muestra, así como el área de la misma. Durante el proceso el tiempo de retención se puede observar en pantalla lo que estaba pasando con la muestra, mediante una grafica que indica los picos obtenidos de cada muestra, así como el tiempo en el que estos eran detectados (Figura 17).

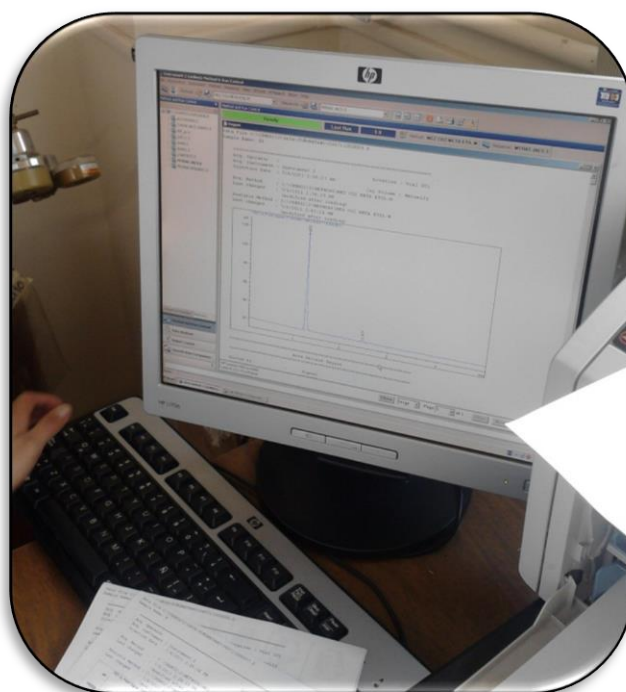


Figura 17. Resultados obtenidos durante el proceso de lectura de las muestras inyectadas en el CG.



Figura 18. Termoreactor y espectocolorímetro utilizados para el análisis de muestras.

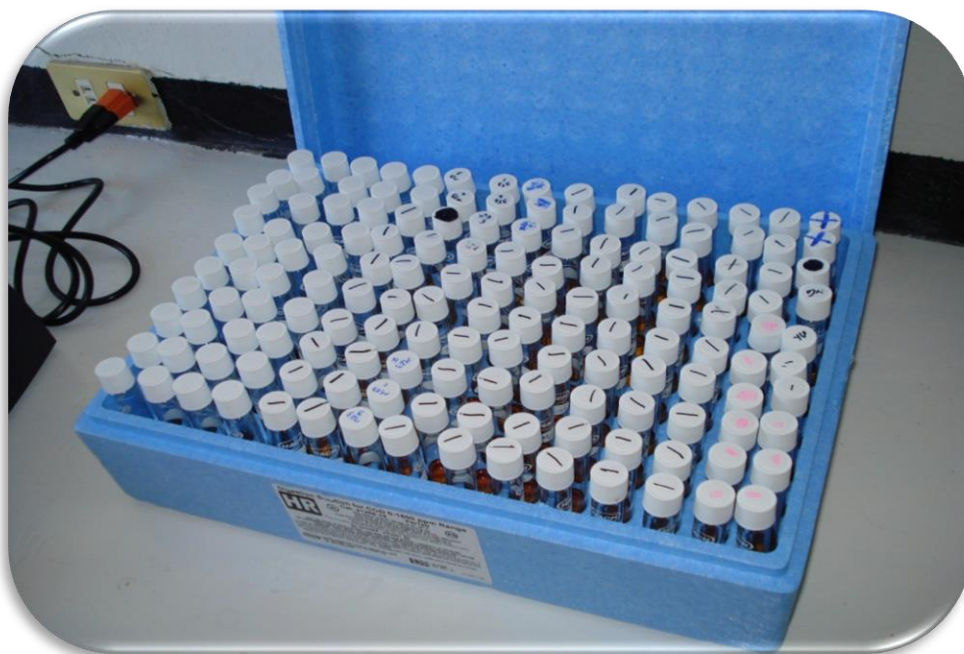


Figura 19. Kit utilizado para el análisis de DQOT de la Maraca HACH para concentraciones de 0 a 1500 mg L⁻¹.