

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

ESCUELA DE ESTUDIOS SUPERIORES DEL JICARERO



***Producción de biogás a partir de vinaza tequilera utilizando
reactores anaerobios de biomasa granular y fija***

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A:

Erick Gibran Chit Pantoja

DIRECTOR

Dra. Tania Gutiérrez Macías

JOJUTLA, MORELOS

NOVIEMBRE, 2020

Dedicatoria

A mis padres por todo el amor, sacrificio y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de esta vida.

A mis abuelos por el cariño, risas y bendiciones recibidas.

A mis hermanos por todas las risas y ánimo que me brindan día a día.

A mi novia por todo su amor y confianza.

A toda mi familia por todo el apoyo, cariño y confianza.

Agradecimientos

Al Instituto Mexicano de Tecnológica del Agua (IMTA) por las facilidades prestadas del equipo, material e instalaciones para la realización de trabajo de tesis.

A la Dra. Tania Gutiérrez, por su confianza y apoyo que siempre tuve de su parte, así como las observaciones que enriquecieron mi trabajo de tesis.

A mis tutores de tesis por su tiempo y dedicación en este trabajo.

A los profesores y compañeros por compartir sus conocimientos y experiencias vividas día a día.

A mis compañeras de proyecto de tesis, porque sin ellas se me hubieran hecho muy complicado haber realizado todas las actividades que surgían día a día, así como las risas y momentos divertidos.

Índice General

1	Introducción.....	1
1.1	Planteamiento de problema	2
1.2	Justificación	2
1.3	Objetivo general	3
1.4	Objetivo particular.....	3
1.5	Hipótesis.....	3
2	Marco teórico	3
2.1	Tequila	4
2.2	Vinazas.....	5
2.3	Procesos de degradación aerobia y anaerobia.....	8
2.4	Tipos de reactores	14
2.5	Operación de reactores (tiempo de retención).....	18
2.6	Biogás.....	20
2.7	Parámetros de operación	22
2.8	Agitación.....	26
2.9	Características de la biomasa granular y biomasa fija	26
2.10	Legislación ambiental.....	28
3	Metodología	29
3.1	Obtención de vinaza.....	29
3.1.1	Sistema operacional.....	29
3.1.2	Alimentación de los reactores	30
3.1.3	Reactor con biomasa granular	30
3.1.4	Reactor con biomasa fija.....	32
3.1.5	Parámetros de campo.....	34
3.1.6	Determinación de DQO	34

3.1.7 Eficiencia de remoción de la materia orgánica DQO	34
3.1.8 Determinación de alcalinidad total	34
3.1.9 Determinación de ácidos grasos	35
3.2 Determinación de sulfato	35
3.2.1 Determinación de nitrógeno amoniacal	36
3.2.2 Determinación de Carga orgánica volumétrica.....	36
3.2.3 Cuantificación del biogás	36
3.2.4 Cromatografía de gases	37
4 Resultado y discusión.....	38
4.1 Caracterización de la vinaza	38
4.2 Resultados de campo	40
4.2.1 pH.....	40
4.2.2 Temperatura	41
4.2.3 Oxígeno Disuelto	42
4.3 Resultados Fisicoquímicos.....	43
4.3.1 Sulfatos	43
4.3.2 Ácidos Grasos Volátiles.....	44
4.3.3 Alcalinidad total.....	45
4.3.4 Monitoreo de DQO en reactor de biomasa granular.....	46
4.3.5 Monitoreo de DQO en reactor de biomasa fija	47
4.3.6 Monitoreo de N-NH ₄ en reactor de biomasa granular	48
4.3.7 Monitoreo de N-NH ₄ en reactor de biomasa fija	49
4.4 Composición de biogás.....	50
4.5 Cuantificación de biogás.....	52
5 Conclusiones	55
6 Referencias	56

Índice de Tablas

Tabla 1. Características generales de vinaza tequilera (López-López <i>et al.</i> , 2010)	6
Tabla 2. Ventajas de la digestión aerobia (FAO, 2011).....	8
Tabla 3. Grupo de bacterias conforme su grupo bacteriano (Constanza <i>et al.</i> , 2015) ...	10
Tabla 4. Ventajas y desventajas de la digestión aerobia (Lira-Rodriguez, 2013).....	15
Tabla 5. Clasificación de rectores primera y segunda generación (Modificado de Montalvo y Guerrero, 2003)	15
Tabla 6. Ventajas de los filtros anaerobios flujo ascendente.....	16
Tabla 7. Parámetros óptimos para un buen funcionamiento de aguas residuales anaerobias (CONAGUA, 2015)	17
Tabla 8. Propiedades específicas del biogás (Deublein y Steinhauser 2008)	20
Tabla 9. Composición del biogás (CONAGUA, 2016)	21
Tabla 10. concentración de DQO en los dos tipos de reactores	30
Tabla 11. Comparativa de las normas referentes al vertido de aguas residuales	38
Tabla 12. Resultado de pH en biomasa granular y fija	40
Tabla 13. Resultado de temperatura en biomasa granular y fija	41
Tabla 14. Resultado de Oxígeno Disuelto en biomasa granular y fija	42
Tabla 15. Resultado de sulfatos en biomasa granular y fija	43
Tabla 16. Resultado de Ácidos Grasos Volátiles AGV en biomasa granular y fija	45
Tabla 17. Resultado de alcalinidad en biomasa granular y fija.....	46

Índice de figuras

Figura 1. Producción de tequila del año 2015-2018 de acuerdo al Consejo Regulador del Tequila CRT	5
Figura 2. Digestión Anaerobia (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991; modificado FAO, 2011)	14
Figura 3. Formación de una biopelícula (CONAGUA, 2017)	27
Figura 4. Estructura de microorganismos en biomasa granular (CONAGUA, 2017)	28
Figura 5. Diagrama del reactor granular	31
Figura 6. Biomasa granular	32
Figura 7. Arranque del reactor biomasa fija	33
Figura 8. Biomasa fija adherida a un cubo de poliuretano	33
Figura 9. Bolsa de tedlar llena del reactor granular	37
Figura 10. Cromatógrafo de gases, para la composición de biogás	37
Figura 11. Resultados de DQO en biomasa granular	47
Figura 12. Resultado de DQO en biomasa fija	48
Figura 13. Resultados de N-H ₄ , en biomasa granular	49
Figura 14. Resultados de N-NH ₄ , en biomasa fija	50
Figura 15. Porcentaje de gases en biomasa granular	51
Figura 16. Porcentaje de gases en biomasa fija	52
Figura 17. Cuantificación del biogás en el reactor de biomasa granular	53
Figura 18. Cuantificación del biogás en el reactor de biomasa fija	54

Abreviaturas

SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
°C	Grados Celsius
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanke (FAFA)
L	Litros
Kg	Kilogramos
DQO	Demanda Química de Oxígeno
m ³	Metros cúbicos
D	Días
DBO	Demanda Bioquímica de oxígeno
T	Temperatura
pH	Potencial de Hidrógeno
Mg	Miligramos
ST	Sólidos Totales
SSF	Sólidos Suspendidos Fijos
N-NH ₄ ⁺	Nitrógeno Amoniacal
CO ₂	Dióxido de Carbono
EGSB	Expended Granular Sludge Bed (RAFA)
FAFA	Filtro anaerobio de Flujo ascendente
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura
SEMARNAT	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
CONAGUA	Comisión Nacional del agua
NOM	Norma Oficial mexicana
CGIAR	Consultative Group on international Agricultural Research
CH ₄	Metano
CIATEJ	Centro de Investigación y asistencia en tecnología y Diseño del estado de Jalisco, A.C.
RAFA	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente
SO ₄	Sulfatos

Resumen

Actualmente la industria tequilera no lleva un proceso adecuado de sus residuos generados (vinazas), por lo que son descargadas a aguas superficiales llegando a afectar a la flora y fauna así como los mantos acuíferos, toda agua residual debe de cumplir con una normatividad que es la NOM-001-SEMARNAT-1997 y en la NOM-002-SEMARNAT-1996. Solamente un 59% de la vinaza lleva un proceso secundario de tratamiento, como son las lagunas de sedimentación, que consta solamente en la reducción de temperatura y pH. La digestión anaerobia puede llegar a tratar cantidades muy altas de materia orgánica y generar biogas rico en metano, por lo cual se considera un proceso factible a comparación de uno aerobio.

Se realizó un análisis previo a la vinaza para conocer sus características físico-químicas, por lo que se tuvo concentraciones de 70 kg/L DQO, un pH de 3.5, 30,000 mg/l SST, 625 mg/l SSV. Se utilizaron dos diferentes tipos de biomasa (granular y fija) la primera de una industria papelera, mientras que la segunda de una planta tratadora de agua residual municipal, se trabajó en un periodo de 260 días, dividido en 3 etapas y 3 COV diferentes con un TRH de 24 h. Para la biomasa granular se trabajó con una COV de 1.5, 2.5 y 4.0 kg DQO/L m³ d obteniendo una remoción de DQO en la primera fase del 80% hasta un 90% para la tercera fase con una producción total de metano de 290 litros mientras que para la biomasa fija se trabajó con COV de 3, 3.3 y 4 kg DQO/L m³ d obteniendo un 60% de remoción de DQO en la primera fase y un 90% para la última fase, con un total de producción de gas metano de 170 L.

Para un buen funcionamiento de un proceso anaerobio, es necesario realizar ciertos análisis como son AGV, DQO, NH₄, alcalinidad, sulfuros, así como la medición de pH, temperatura y OD. Entre otros, esto para llevar un control y poder generar una mayor producción de gas metano así como una remoción de DQO eficiente.

Palabras claves: Proceso anaerobio, Características físico-químicas, Vinazas, Reactor anaerobio.

1 Introducción

De acuerdo a la **NOM-006-SCFI-2012** el tequila es una bebida alcohólica por destilación de mostos producida en el estado de Jalisco, México. Su elaboración tiene más de 200 años, para poder utilizar el agave se necesita de 7 a 10 años para su maduración y su derivación procede de la cabeza de agave de la especie agave *Tequilana weber* variedad azul.

De acuerdo al consejo regulador del tequila (CRT) México cuenta con un total de 146 empresas certificadas para la fabricación de tequila, por lo que es de gran importancia económica para México. En el proceso de elaboración de tequila, se genera un residuo derivado del tequila denominado vinaza, el cual algunas industrias lo vierten de manera directa sobre el suelo (como disposición final) sin ningún previo tratamiento, provocando su erosión y contaminación. Otras industrias descargan la vinaza en cuerpos de agua y al no tener tratamiento esta llega con un el alto contenido de materia orgánica, además, su color oscuro impide la penetración de luz en aguas superficiales reduciendo la actividad fotosintética y la vida acuática (Íñiguez y Hernández, 2010).

Los altos volúmenes de residuos de vinaza generados y las elevadas cargas orgánicas, crean una problemática ambiental. Las industrias tequileras, al no contar con suficiente espacio disponible no tratan sus aguas residuales, por lo tanto es necesario la implementación de sistemas de tratamiento que ayuden a disminuir la problemática ambiental que se genera. Una de las opciones son los sistemas anaerobios mediante el uso de reactores conocidos como UASB por sus siglas en inglés (upflow anaerobic sludge bucket), ya que se ha demostrado que pueden operar a altas cargas de materia orgánica (Bermúdez-Savón *et al.*, 2000).

La población empieza hacer conciencia en la protección del medio ambiente, preocupándose en el agua usada para el uso industrial y a su vez con que calidad es arrojada a mantos acuíferos. Por lo cual se buscan procesos que sean económicos y prácticos, como lo son los tratamientos biológicos (Bermúdez *et al.*, 2003).

1.1 Planteamiento de problema

En México se produce más de 200 millones de litros de tequila anualmente, durante el proceso de su elaboración el tequila genera un residuo denominado “vinaza” sus características generales son: un color café turbio, olor a alcohol acaramelado y una composición de 90% agua y 10% solidos. Se ha reportado que, por cada litro de tequila producido, se genera de 10 a 12 L de vinaza y 1.4 kg de gabazo por lo que se existe una crisis ambiental ya que más del 80% de la vinaza, no lleva un tratamiento lo cual ha provocado un efecto nocivo en los cuerpos de agua superficiales (López-López *et al.*, 2010).

1.2 Justificación

Los tratamientos biológicos anaerobios, son capaces de operar con cargas altas de hasta 80 kg DQO/m³ d. Las vinazas se caracterizan por tener un alto contenido de materia orgánica de hasta 120 kg DQO/L por tal motivo es necesario utilizar para este tipo de residuos sistemas que soporten estas concentraciones sin embargo, en la actualidad el tratamiento de este residuo se encuentra limitado por la tecnología, la solvencia económica de las destilerías y la capacidad física que poseen las empresas.

Los reactores anaerobios (UASB), cuentan con algunas ventajas sobre los tratamientos aerobios, como una menor producción de lodos, una menor inversión (costos de implantación y manutención) consumo pequeño de energía y su simplicidad de funcionamiento, así como la recuperación de energía-producción de metano (López-López *et al.*, 2010).

En el año 2014 la producción de tequila generó 240 mil toneladas de gabazo y 1.6 millones de m³ de vinaza tratando solo el 59% con un tratamiento secundario. Por lo cual la vinaza como el gabazo son arrojados directamente al drenaje y alcantarillado, teniendo una disposición final en los ríos y lagos; Por tal motivo es de suma importancia la implementación de tecnologías sustentables para el tratamiento de dichos residuos. El uso de sistemas anaerobios con biopelícula fija con medios de soporte de poliuretano son sistemas poco estudiados los cuales llegan a remover materia orgánica produciendo biogás, el cual puede ser utilizado como energía (CRT, 2016 y Sandoval, 2015).

1.3 Objetivo general

Evaluar la producción de biogás a partir de agua residual de vinaza tequilera utilizando reactores anaerobios de biomasa granular y fija.

1.4 Objetivo particular

- Evaluar tres diferentes cargas orgánicas en cada reactor para el tratamiento de vinaza.
- Determinar los mejores parámetros de operación de cada sistema.
- Comparar las diferentes biomásas utilizadas (Granular y fija) mediante la degradación de materia orgánica.
- Identificar y cuantificar la producción de biogás.

1.5 Hipótesis

Se puede reducir la materia orgánica de la vinaza a través de un tratamiento anaerobio, utilizando reactores de biomasa granular y fija además de obtener un biogás rico en metano.

2 Marco teórico

2.1 Tequila

De acuerdo a la **NOM-006-SCFI-2012**, el tequila es una bebida alcohólica regional obtenida por destilación de mostos, preparados directa y originalmente del material extraído en las instalaciones de la fábrica de un productor autorizado la cual debe estar ubicada en el territorio comprendido en la declaración, derivados de las cabezas de agave de la especie *Tequilana weber* variedad azul, previa o posteriormente hidrolizadas o cocidas, y sometidos a fermentación alcohólica con levaduras, cultivadas o no, siendo susceptibles los mostos de ser enriquecidos y mezclados conjuntamente en la formulación con otros azúcares hasta en una proporción no mayor de 49% de azúcares reductores totales expresados en unidades de masa, en los términos establecidos en la presente norma y en la inteligencia que no están permitidas las mezclas en frío. El Tequila es un líquido que puede tener color, cuando sea madurado, abocado, o añadido de un color específico.

2.1.1 Importancia de la industria tequilera en México

La industria tequilera tiene alto significativo en la economía jalisciense especialmente en la región de origen (el valle de Amatitán y Tequila) desde el siglo XVII, cuyo paisaje natural y cultural ha sido registrado en la lista de la UNESCO. El crecimiento de la industria comenzó a ser constante en los años setenta con algunos altibajos sin embargo, el incremento en los últimos 15 años (1995-2010) ha sido el más significativo, pues la producción se ha triplicado sobrepasando en la actualidad los 300 millones de litros anuales (Valenzuela y Gaytán, 2009).

2.1.2 Clases de tequila

De acuerdo a la **NOM-006 SCFI 2012** el porcentaje de los azúcares provenientes del agave se utilice en la elaboración del tequila se divide en dos:(100% de agave y tequila) donde el tequila 100% agave se clasifica en cinco de acuerdo a su añejamiento en barricas de roble.

- Blanco o Plata
- Joven u Oro
- Reposado
- Añejo
- Extra añejo

2.1.3 Producción anual de tequila

De acuerdo con el CRT durante el año de 2015-2018 se produjeron 1,062.6 millones de litros de tequila al 40% de alcohol (Figura 1), esta práctica presenta un alto impacto ambiental, ya que por cada Kg/DBO se contamina 200 m³ de agua potable, provocando una contaminación de 82,296 toneladas de DBO que repercute en 16,500 km³ de agua (López-López *et al.*, 2010).

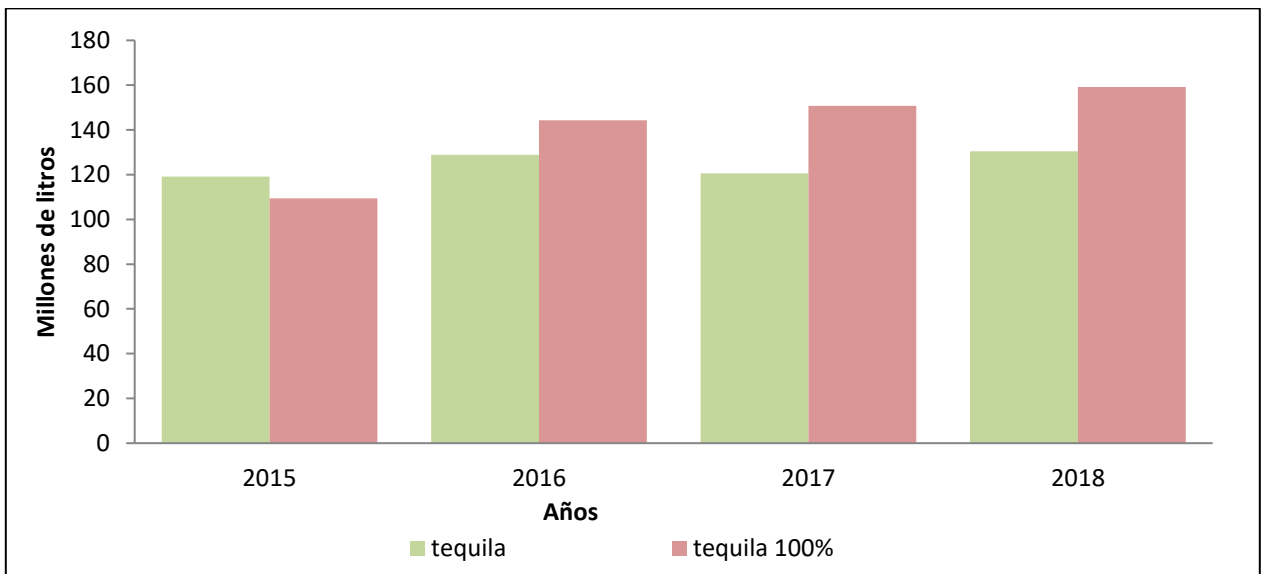


Figura 1. Producción de tequila del año 2015-2018 de acuerdo al Consejo Regulador del Tequila CRT

2.2 Vinazas

2.2.1 Vinaza

La vinaza surge después de la destilación del mosto del agave fermentado, que permanece en el fondo del alambique, es un residuo líquido, de color marrón oscuro debido a compuestos fenólicos y melanoidinas que son polímeros de bajo y alto peso molecular (López-López *et al.*, 2010).

2.2.2 Características de la vinaza

De acuerdo a López-López *et al.*, 2010 en 2008 se generaron 315.6 millones de Kilogramos de gabazo y 2,270 millones de litros de vinaza. La mayoría de destilerías tequileras, el gabazo lo procesan para obtener composta, depositándolo en los plantíos de agave y un 80% de la vinaza es vertida a ríos, arroyos, lagos, embalses y sistemas de alcantarillado municipal, ocasionando un deterioro ambiental. En la Tabla 1, se muestran las características fisicoquímicas de la vinaza.

Tabla 1. Características generales de vinaza tequilerera (López-López *et al.*, 2010)

Parámetro	Valores
pH	3.4-4.5
Aceites y grasas, mg/L	10-100
Demanda química de oxígeno (DQO) total, mg/L	60,000-100,000
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), mg/L	35,000- 60,000
Sólidos totales (ST), mg/L	25,000-50,000
Sólidos suspendidos totales (SST), mg/L	2,000-8,000
Sólidos suspendidos volátiles (SSV), mg/L	1,900-7,500
Sólidos suspendidos fijos (SSF), mg/L	10-500
Alcalinidad total, mg/L	<6.00
Nitrógeno amoniacal (N-NH ₄),mg/L	15-40

2.2.3 Tratamiento de vinazas por la industria tequilerera

La vinaza producida en micro y pequeñas destilerías solo tiene un pretratamiento, que consiste en elevar el pH mayor a 6 y bajar la temperatura a 40°C, en algunas destilerías incluyen el composteo de un 20% de la vinaza generada, para uso agrícola. Pero estos métodos no disminuyen la carga orgánica, de la vinaza. Otras destilerías con un espacio

mayor sedimentan la vinaza, en lagunas de oxidación durante un periodo de tiempo, eliminando un 30% de la DBO (Retes, 2014).

2.2.4 Toxicidad de la vinaza

De acuerdo a Tejerina *et al.*, 2007 la toxicidad no necesariamente puede llegar a ser letal para el metabolismo de las bacterias y solo puede llegar a inhibir el crecimiento de la actividad microbiana, clasificándose en tres tipos:

1) toxicidad metabólica: es una toxicidad completamente reversible, que llega a remover la sustancia toxica e inhibe el proceso metabólico. Por lo que perturba el metabolismo sin dañar la célula. Algunos inhibidores son por las sales y amoníaco.

2) toxicidad fisiológica: daña a componentes subcelulares como membranas o enzimas. Su recuperación es lenta, remueve la sustancia toxica y su restablecimiento de la actividad es más rápido que el crecimiento de nuevas bacterias. Esto a que se requiere más tiempo para reparar los daños de componentes celulares, por ejemplo, los compuestos fenólicos como los taninos.

3) toxicidad bactericida: las sustancias toxicas generan la muerte celular, provocadas por cloroformo y formaldehido entre otras. La toxicidad en un proceso anaerobio llega a reducir la producción de gas metano, esto debido a un compuesto o mezcla de algunos tóxicos, llegando a bajar la eficiencia del proceso anaerobio

De acuerdo a España *et al.*, 2011 menciona como puede llegar afectar la vinaza en el medio ambiente:

- la vinaza puede llegar a contener compuestos fitotóxicos, antibacterianos y fenoles, polifenoles y metales pesados afectando a los microorganismos y plantas en los sitios de disposición final.
- Posee un alto contenido de materia orgánica afectando las aguas subterráneas a través del aumento de nutrientes. Ocasionando cambios inestables en la estructura del ecosistema y su función. Como puede ser el nitrógeno, que se puede acumular en el suelo, posteriormente pasa a las aguas superficiales, migrando a las aguas subterráneas y al final entra a la atmosfera a través de la volatilización de amoníaco y la producción de óxido nitroso.

- Un pH bajo puede provocar una movilización de metales pesados en los suelos.
- Las altas cargas de sólidos en suspensión llegan a obstruir los poros en el suelo, por lo que se pueden desarrollar condiciones anaerobias, reduciendo el pH del suelo y la removilización de los metales pesados.

2.2.5 Biodegradabilidad

Son aquellas sustancias capaces de ser descompuestas en moléculas más simples por acción microbiana teniendo como característica, la biodegradabilidad de compuestos orgánicos o de un agua residual y así poder conocer su persistencia en el ambiente, de igual forma conocer su alcance de su tratamiento biológico, por lo que es necesario contar con información del agua residual que se va a tratar (Sandoval, 2015).

2.3 Procesos de degradación aerobia y anaerobia

2.3.1 Digestión aerobia

Es un proceso donde el lodo es sometido a una aireación, en un reactor descubierto, por lo cual existe una oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la autooxidación de la materia celular. Este proceso se realiza principalmente por bacterias y protozoos, que actúan sobre la materia orgánica disuelta. En la Tabla 2, se muestra las ventajas de la digestión aerobia, aunque también presentan varias desventajas como los altos costos de consumo de energía, falta de parámetros, criterios claros para el diseño, la dificultad de separar los lodos mediante centrifugación y filtración al vacío (FAO, 2011).

Tabla 2. Ventajas de la digestión aerobia (FAO, 2011)

Ventajas de la digestión aerobia
• Facilidad de operación del sistema
• Bajo capital de inversión
• No genera olores
• Reduce la cantidad de coliformes fecales
• Produce un sobrenadante clarificado con una baja de DBO ₅

Ventajas de la digestión aerobia
<ul style="list-style-type: none"> • Genera pocos sólidos
<ul style="list-style-type: none"> • Genera poco fósforo

2.3.2 Digestión anaerobia

El proceso anaerobio es complejo y degradativo para la materia orgánica como son residuos de animales y vegetales que posteriormente se convierte en biogás, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno. El proceso de digestión anaerobia convierte gran cantidad de residuos a subproducto de utilidad (FAO, 2011).

El 90% de energía disponible por oxidación directa, se transforma en metano y solo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, frente al 50% consumido en un sistema aerobio. El proceso anaerobio se puede clasificar como fermentación anaerobia o respiración anaerobia de acuerdo a los aceptores de electrones (FAO, 2011).

La digestión anaerobia se puede encontrar en diferentes lugares, simplemente debe de haber materia orgánica y un potencial redox negativo, como son los estómagos de los rumiantes, pantanos, sedimentos de lagos o lagunas e inclusive alcantarillas municipales. El tratamiento anaerobio es muy efectivo en la remoción de compuestos orgánicos biodegradables, dejando compuestos mineralizados como NH_4^+ , PO_4^{3-} , S^{2-} en la solución, por lo que simplemente remueve los contaminantes orgánicos (Van-Lier *et al.*, 2017).

El proceso anaerobio se puede clasificar como fermentación anaerobia debido al tipo de aceptores de electrones. Las enzimas respiratorias junto con las enzimas de células aeróbicas, constituyen una cadena alimentaria en relación mutua, donde los residuos orgánicos se transforman en biogás que abandona el sistema sin embargo, el biogás no es 100% metano por lo que se suele estar contaminado con diferentes componentes, donde su manejo y aprovechamiento se llega a complicar (FAO, 2011).

2.3.3 Bacterias en la degradación anaerobia de la materia orgánica

De acuerdo a Constanza *et al.*, 2015 dentro del metabolismo de la digestión anaerobia existen diferentes grupos de bacterias (Tabla 3), por lo que se clasifican en 4 categorías diferentes, participando en la conversión de la materia hasta las moléculas sencillas como es el metano y el dióxido de carbono (CO₂).

Tabla 3. Grupo de bacterias conforme su grupo bacteriano (Constanza et al., 2015)

Ejemplos de bacterias conforme a su grupo bacteriano			
Grupo 1: Bacterias hidrolíticas	Grupo 2: Bacterias fermentativas acidogénicas	Grupo 3: Bacterias acetogénicas	Grupo 4: Bacterias metanogénicas
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Clostridium</i> • <i>Bacteroides</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Clostridium</i> • <i>Lactbacillus</i> • <i>Bacillus</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Syntrophobacter wolinii</i> • <i>Syntrophomonas wolfei</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Methanobacterium sp</i> • <i>Fusobacterium sp</i> • <i>Desulfovibrio sp</i>

2.3.4 Hidrólisis

La hidrólisis es el primer paso para la degradación anaerobia de substratos orgánicos complejos, en el cual se incluye dos procesos, la solubilización del material particulado insoluble y la descomposición biológica de polímeros orgánicos como son lípidos, proteínas e hidratos de carbono a monómeros o dímeros que son capaces de atravesar la membrana celular por lo cual, la solubilización se considera un proceso fisicoquímico y no enzimático dependiendo también por el tamaño de la partícula el pH la producción de enzimas, la difusión y absorción de enzimas denominadas hidrolasas, que son capaces de solubilizar la materia orgánica y romper enlaces específicos con ayuda de agua para poder ser utilizadas. La etapa hidrolítica es la que puede limitar la velocidad de todo el proceso anaerobio si el sustrato cuenta con alto contenido en sólidos (Peña, 2012; Rodriguez *et al.*, 2005).

Carbohidratos. La lignina, la hemicelulosa y la celulosa son los principales componentes de este grupo. La lignina es considerada como un material altamente resistente a la degradación anaerobia, por lo que afecta a la biodegradabilidad de la celulosa y otros polímeros, llegando a limitar el proceso de hidrolisis (Peña, 2012).

Lípidos. Están constituidas por ácidos grasos unidos por un enlace éster a una molécula de glicerol y se denomina triglicéridos cuando tres ácidos grasos se unen a un glicerol. La hidrolisis depende del pH y la solubilidad del ácido, por lo que altos valores la solubilidad aumenta y a bajos valores disminuye. Donde los ésteres del glicerol en ambientes anaerobios liberan ácidos grasos. En la hidrolisis también se libera, glicerol, lactosa, colina y a su vez convertidos a ácidos grasos volátiles por acción de bacterias fermentativas y un pequeño porcentaje los ácidos grasos insaturados son hidrogenados (Peña, 2012).

Proteínas. Están formados por aminoácidos mediante enlaces peptídicos. En agua son solubles y su hidrolisis se realiza por enzimas extracelulares (proteasas) en aminoácidos, amoniacos y CO₂, por lo que su hidrolisis de carbohidratos es más lento. Las proteínas son fuente de carbono y energía, el amoniacos sirve principalmente como fuente de nitrógeno y el desarrollo de biomasa (Campos, 2001).

2.3.5 Acidogénesis

En esta etapa se da la fermentación de las moléculas orgánicas solubles, que son utilizadas directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que a su vez son oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. Este grupo bacteriano es de gran importancia ya que elimina cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema y a su vez producen el alimento para el siguiente grupo de bacterias (FAO, 2011).

2.3.6 Acetogénesis

De acuerdo a Martí, 2006; menciona que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos, (H₂ y acético) pero algunos otros como etanol, ácidos grasos volátiles como valerato, butirato propionato y

compuestos aromáticos etc., deben de transformarse en compuestos más sencillos como el acetato y H₂ por las bacterias acetogénicas (*Syntrophomonas wolfei* y *Ssyntrophobacter wolini*).

En este proceso los ácidos grasos volátiles son convertidos a ácido acético, dióxido de carbono e hidrogeno. El ácido acético se produce por dos mecanismos: Acetogénesis por hidrogenación que se produce acetato como producto final de la reducción de dióxido de carbono (CO₂) más hidrógeno (H), el otro mecanismo es la acetogénesis por deshidrogenación donde las bacterias se inhiben en concentraciones de oxígeno (O₂), por lo que solo llegan a sobrevivir consumiendo hidrógeno, algunas bacterias son las homoacetogénicas (fermentación láctica) y bacterias sulfato reductoras (Constanza *et al.*, 2015).

2.3.6 Metanogénesis

El metano se conoce desde el siglo XVIII que se desprende en ambientes anaerobios ricos en materia orgánica. La metanogénesis es obligada y para reducir el O₂ a metano solo pueden oxidarse a H₂ formiato, metanol, metilaminas o acetato y algunas veces etanol (Parés y Juárez, 1997).

Los microorganismos metanogenicos se puede considerar como el proceso más importante, ya que son los responsables de la formación de metano y la eliminación de los productos de los grupos anteriores, por lo cual el metano surge a partir de monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H₂, CO₂, metano y algunas metilaminas (Medrano, 2018).

Las arqueobacterias metanogénicas es la parte final de la cadena trófica, gracias a su actividad no se acumulan grandes cantidades de materia orgánica, donde esta materia es inaccesible para los organismos aerobios (Jules *et al.*, 2017).

De acuerdo a (Peña, 2012) existen dos tipos de bacterias metanogénicas: acetoclástica e hidrogenotróficas:

Acetoclástica: su principal función es reducir el acetato a metano y dióxido de carbono elevando generalmente el pH del medio por la eliminación del ácido acético y la formación de CO₂ al momento de disolverlo forma una solución amortiguadora de bicarbonato.

Hidrogenofilicas: utilizan Hidrógeno como donadores de electrones y CO₂, por lo que se produce metano y elimina el H₂ gaseoso.

2.3.7 Reducción de sulfato

De acuerdo Van-Lier *et al.*, 2017 son bacterias anaerobias estrictas, encontradas en ambientes acuáticos y terrestres donde se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica, usan los electrones de sulfato para la oxidación de compuestos orgánicos, utilizando también tiosulfato, tetrationato y azufre elemental. Los sulfatos se reducen a sulfuros de hidrógeno, es necesario de ocho electrones, ya que el ion sulfato es muy estable y es necesario una activación mediante el ATP. En la Figura 2, se presenta de manera esquemática cada etapa y grupo en la que intervienen los diferentes tipos de bacterias y sub-procesos.

Van-Lier *et al.*, 2017 esquematiza en 4 el proceso anaerobio en sub-productos:

Hidrolisis de biopolímeros:

- Hidrolisis de proteínas
- Hidrolisis de polisacáridos
- Hidrolisis de grasas

1) Acidogénesis/fermentación:

- Oxidación anaerobia de aminoácidos y azúcares
- Oxidación anaerobia de ácidos grasos de cadena larga y alcoholes

2) Acetogénesis:

- Formación de ácido acético e H₂ a partir de los productos intermedios (especialmente AGV)
- Homoacetogénesis: formación de ácidos acético a partir de H₂ y CO₂

3) Metanogénesis:

- Formación de metano a partir de ácido acético
- Formación de metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono

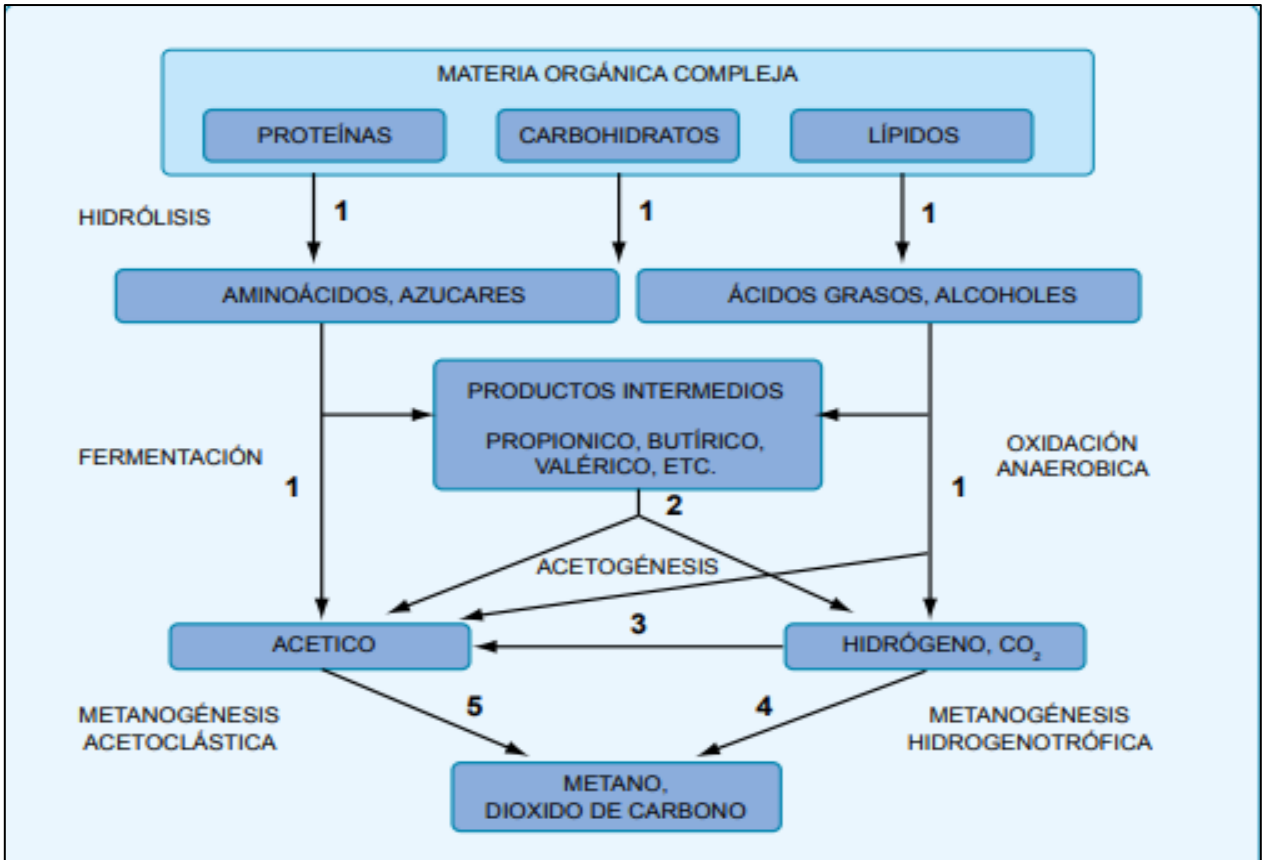


Figura 2. Digestión Anaerobia (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991; modificado FAO, 2011)

2.4 Tipos de reactores

2.4.1 Reactores aerobios

Consiste en la degradación de la materia orgánica en presencia de oxígeno, utilizando lodos activados, donde se descompone convirtiéndose en dióxido de carbono y en especies minerales oxidadas. La presencia del oxígeno hace que este elemento sea aceptor de electrones, por lo que se obtiene un rendimiento energético elevado, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de bacterias aerobias. Su aplicación puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua en la Tabla 4, se observan algunas de las ventajas y desventajas de dicho tratamiento (Lira-Rodríguez, 2013).

Tabla 4. Ventajas y desventajas de la digestión aerobia (Lira-Rodriguez, 2013)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de compuestos volátiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos tiempos de residencia • Gran generación de fangos o lodos

2.4.2 Reactores anaerobios

De acuerdo a Montalvo y Guerrero, 2003; Hess y Paz, 2017 en la actualidad existe un sinnúmero de sistemas en la operación de reactores, algunos son solo prototipos en escala piloto y otros ya funcionando, se clasifican de dos maneras que son de primera y segunda generación. En la primera generación se caracteriza por el tiempo de retención que es igual al tiempo de sólidos, en la segunda generación los sólidos su tiempo de retención es mayor a comparación al tiempo hidráulico y por consecuencia se obtiene una eficacia relevante en el proceso (Tabla 5).

La digestión anaerobia es considerada como uno de los tratamientos con mayor resultado en la degradación de materia orgánica, aunque existe un pequeño porcentaje de compuestos recalcitrantes como son los polímeros de color marrón, que llegan a permanecer después del tratamiento. Por lo que se debe de aumentar otro proceso como es de oxidación avanzada (Robles-Gonzales *et al.*, 2011).

Tabla 5. Clasificación de reactores primera y segunda generación (Modificado de Montalvo y Guerrero, 2003)

1era Generación	2da Generación	
	Biomasa adherida	Biomasa suspendida
<ul style="list-style-type: none"> • Tanque séptico • Lagunas anaerobias • Minidigestores • Digestores convencionales 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro anaerobio (flujo ascendente) • Reactor de lecho fijo (flujo descendente) • Lecho fluidizado 	<ul style="list-style-type: none"> • UASB • EGSB • Circulación interna • Dos etapas • Proceso Anaerobio Secuencial

1era Generación	2da Generación	
	<ul style="list-style-type: none"> • Lecho expandido 	<ul style="list-style-type: none"> • Reactor con membrana

2.4.3 Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

El filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) es un sistema de tratamiento de aguas residuales con biopelícula fija para la remoción de materia orgánica en condiciones anaerobias. Su utilización en México es incipiente sin embargo, en otros países de climas templados han demostrado su eficiencia, principalmente cuando se combina con otros procesos de tratamiento biológico pero cada vez su implementación es mayor por tener una reducción de espacio y un bajo costo en mantenimiento en la tabla 7 se muestran algunas ventajas de los Filtros anaerobios. (CONAGUA, 2016; Rincón, 2007).

En los filtros anaerobios de flujo ascendente, es el contacto entre las vinazas y los microorganismos que se encargarán de reducir su carga contaminante. Las vinazas alimentan al reactor, donde el flujo se distribuye uniformemente luego pasa sobre o a través de una masa de sólidos biológicos suspendidos, los microorganismos se adhieren a la superficie del medio en forma de fina biopelícula o bien se agrupan en forma de una masa de lodo floculado o granulado dentro de los intersticios del medio. La materia orgánica soluble que pasa a través del filtro se difunde dentro de las superficies de los sólidos adheridos o floculados, donde se realiza el proceso de degradación anaerobia (Young, 1991).

Tabla 6. Ventajas de los filtros anaerobios flujo ascendente

Ventajas de filtros anaerobios
<ul style="list-style-type: none"> • Pueden producir energía por medio del biogás, el cual puede emplearse para calentar el reactor
<ul style="list-style-type: none"> • El exceso de gas metano puede emplearse como gas combustible
<ul style="list-style-type: none"> • Son un sistema compacto con bajos requerimientos de terreno
<ul style="list-style-type: none"> • Costos de construcción y de operación bajos
<ul style="list-style-type: none"> • Baja producción de lodos

Ventajas de filtros anaerobios
<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden alcanzar eficiencias de remoción de DQO y DBO de entre 65% y 75%
<ul style="list-style-type: none"> • Alta concentración de sólidos suspendidos en el lodo
<ul style="list-style-type: none"> • Buenas características de desaguado del lodo

2.4.4 Reactor anaerobio de lodos de flujo ascendente (UASB)

El reactor UASB se basa en la formación de un lecho de lodos biológicos, encargados de realizar la digestión anaerobia albergando microorganismos en forma de gránulos, encontrándose en ligera suspensión conforme a la velocidad de recirculación aplicada. Es alimentado por la parte inferior y se puede dividir en 4 compartimientos de abajo hacia arriba; cama de lodos, separador de gas líquido y el compartimiento de sedimentación, formando un lodo granular evitando que los microorganismos sean evacuados del reactor por el flujo ascendente del agua (Kalogo *et al.*, 1999; Parra-Huertas, 2010).

2.4.5 Caracterización para un buen funcionamiento de aguas residuales anaerobias

Los países con climas tropicales, presentan temperaturas óptimas para la aplicación del proceso anaerobio se debe de saber la tasa disponible de nutrientes, la concentración de sustrato y compuestos inhibidores. Para un arranque adecuado se debe de llevar un seguimiento en la medición de diferentes parámetros como pH, alcalinidad, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Demanda Química de Oxígeno (DQO), en la tabla 7 se mencionan los parámetros óptimos para un proceso anaerobio (CONAGUA, 2015).

Tabla 7. Parámetros óptimos para un buen funcionamiento de aguas residuales anaerobias (CONAGUA, 2015)

Parámetro	Rango optimo
Temperatura °C	25–40 optima de 37
Potencial de hidrógeno, mg/L	6.8 – 7.5
Alcalinidad, mg/L	2,000 – 5,000

Parámetro	Rango optimo
Ácidos grasos volátiles, mg/L	50 – 300
Sulfuros, mg/L	50 – 100
Nitrógeno amoniacal, mg/L	50 – 200

2.4.6 Problemas al comienzo del proceso anaerobio

Los microorganismos anaerobios tienen una baja tasa de crecimiento, por lo cual se necesita un periodo de tiempo entre 30 y 180 días dependiendo del inóculo utilizado, esto debido a que la estabilidad de un proceso anaerobio es la parte más complicada (Weiland y Rozzi, 1991).

2.5 Operación de reactores (tiempo de retención)

Según su modo de operación, se clasifican en:

- Por lote o batch
- Régimen semi-continuo

2.5.1 Digestores de régimen por lote

Los digestores tipo batch son tanques herméticos, en la parte superior cuenta con una salida para la expulsión del biogás y con un tanque para poder almacenarse. Se introduce toda la materia para poder digerir y se pueda fermentar, disminuyendo así la materia prima. Se considera un reactor sencillo cuanto su operación, pero el biogás puede a no producirse continuamente (López-Cabanes, 1989).

Algunas de las desventajas en régimen por lote, es la producción del biogás ya que llega a ser esporádico, al principio el biogás tiene altas concentraciones en dióxido de carbono, aunque es útil para la experimentación preliminares y la producción de bacterias generadoras de metano (Álvarez y Álvarez, 2008).

2.5.2 Digestor de régimen semi-continuo

Se comienza cargándolas con materia prima orgánica de manera intermitente, donde el volumen entrante desplazara de manera equivalente, al producto existente, su porcentaje

de efectividad es mayor, cuando la materia prima consiste en un suministro, regular de desechos fácilmente degradables. Su dosificación suele ser de 1 a 3 veces por día (Álvarez y Álvarez, 2008).

2.5.3 Energías renovables

Son todas aquellas derivadas de recursos regenerativos, por lo que las vuelve diferentes a los combustibles fósiles. Solo un 12% de la energía consumida en el mundo fue de una fuente de energía renovable, como lo es la hidroeléctrica, biomasa y en menor consumo la energía geotérmica y eólica. La disminución de las reservas, el alto precio del petróleo y la inestabilidad política, se han considerado las fuentes renovables como alternativas. Dentro de 20 años un 30% de la energía consumida será proveniente de las fuentes renovables (Machado, 2008).

2.5.4 Tipos biocombustible

Los biocombustibles se definen como combustibles líquidos o gaseosos para el sector de transporte que son predominantemente, producidos por la biomasa. El termino biocombustible, recientemente; se puede clasificar en 1ra, 2da, 3ra generación, pero no cuenta con una definición técnica estricta por lo cual se encuentra en una controversia (CGIAR y FAO, 2008).

Biocombustibles de 1^{ra} generación: son producidos por plantas tradicionales como son el maíz, trigo soya. A partir de azúcar, amida y aceites. Generando etanol y biodiesel, por lo cual ya son producidos y constituye un 1.5% total del combustible de transporte en el mundo, sin embargo, existe una problemática al uso excesivo de la tierra (CGIAR y FAO, 2008).

Biocombustible de 2^{da} generación: llamados también biocombustible celulósicos, son aquellos producidos de materias primas como son los residuos agroindustriales. Tienen una producción más compleja y todavía no son comercializados. Se clasifican a través de su conversión de biomasa: como son los bioquímicos producidos por hidrolisis (CGIAR y FAO, 2008).

Biocombustibles de 3^{ra} generación: es aquella biomasa que ha sido genéticamente modificada y facilita los procesos subsecuentes y son producidos a partir de la materia

prima, como son los microorganismos y algas que son agentes de conversión y su proceso sea más eficiente (CGIAR y FAO, 2008).

2.6 Biogás

2.6.1 Biogás de forma natural en los ecosistemas

La digestión anaerobia es la encargada de generar biogás por la biomasa que se encuentra, los principales gases son metano y CO₂. Por lo cual se puede utilizar en sistemas de calefacción para producir calor y electricidad o como combustible para automóviles (Biniam, 2014).

El metano se considera como un gas de efecto invernadero, tiene 21 veces más efecto que dióxido de carbono, pero su disponibilidad es menor. El biogás (CH₄ y CO₂) se ha recolectado durante muchos años, ya que se considera como una fuente de energía después de que se haya separado del CO₂. El biogás es producido por la digestión anaerobia, a partir de aguas residuales y residuos agrícolas, por lo que se ha aplicado tanto a escala piloto e industrias, en países desarrollados como Dinamarca y Alemania (Reith *et al.*, 2001).

De acuerdo a Ogejo *et al.*, 2007 el biogás se consideraba un subproducto, a partir de la descomposición anaerobia de desechos urbanos, residuos animales y lodo proveniente de estaciones de tratamiento de efluentes domésticos. Sin embargo, los altos volúmenes de residuos como son la fábrica de lácteos, destilerías, tratamiento de alcantarillado doméstico, también puede producir una conversión energética, por lo cual puede ser una solución a la problemática ambiental, Cuando el biogás supera el 45% de metano producido es inflamable, el biogás tiene ciertas propiedades particulares por lo cual se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades específicas del biogás (Deublein y Steinhauser 2008)

Características	Valores
Composición	55-70% metano (CH ₄) 30-45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases

Características	Valores
Contenido energético, kW h/m ³	6.0 - 6.5
equivalente de combustible, L petróleo/m ³ biogás	0.60 – 0.65
Límite de explosión, % de biogás en el aire	6 – 12
Temperatura de ignición °C (con el contenido de CH ₄ mencionado)	650 – 750
Presión crítica, atm	74 – 88
Temperatura crítica, °C	-82.5
Densidad normal, kg/m ³	1.2
Olor, (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)	Huevo podrido
Masa molar, kg/Kmol ⁻¹	16.043

2.6.2 Composición de biogás

El biogás es considerado como un biocombustible, tiene un menor peso y densidad que el aire, su composición va variando de acuerdo con su origen por ejemplo el proveniente de aguas residuales diluidas a bajas temperaturas genera un porcentaje de biogás menor, una de sus capacidades es que al momento de quemarse no genera olores, y tiene un color en la llama azul, en la tabla 9 se muestra el porcentaje de gases generados (CONAGUA, 2016).

Tabla 9. Composición del biogás (CONAGUA, 2016)

Porcentaje de gases
• Metano (CH ₄) 55-70%
• Dióxido de carbono (CO ₂) 20-45%
• Hidrógeno (H ₂) 1-10%

Porcentaje de gases
<ul style="list-style-type: none"> • Nitrógeno (N₂) 0.5-3%
<ul style="list-style-type: none"> • Ácido sulfhídrico (H₂S) 1%

2.7 Parámetros de operación

2.7.1 Ácidos grasos volátiles, AGV

Existe una gran variedad de bacterias anaerobias para la descomposición bioquímica de la materia orgánica, las cuales hidrolizan, convirtiendo compuestos complejos a un peso molecular bajo, que son los ácidos grasos de cadena corta: acético, propiónico, butírico. Concentraciones altas de AGV, llega afectar la capacidad amortiguadora del sistema y el pH decae, para poder lograr un pH favorable y una producción de metano las concentraciones deben de oscilar entre 50 a 300 mg/L expresado como ácido acético (CONAGUA, 2016). Con los AGV, podemos observar si tenemos una sobrecarga orgánica y condiciones toxicas, las bacterias acetogénicas y metanogénicas están inhibidas (Boe, 2006).

2.7.2 pH

El pH debe de estar en un intervalo óptimo, existen dos grupos de bacterias que son las acidogénicas y las metanogénicas. Las primeras prefieren un pH de entre 5.5 y 6.5, mientras que las segundas su pH optimo es de 7.8 a 8.2 por lo que a la comunidad microbiana el intervalo del pH debe de ser de 6.8 a 7.4. La metanogénesis, se considera como el paso limitante de la velocidad, por lo que es necesario mantener un pH dentro de la neutralidad. Los microorganismos metanogenicos son susceptibles a la variación del pH, mientras que las bacterias acidogénicas son menos sensibles a los valores del pH, pero es la que mayor genera una elevada acidez en el reactor. El pH se puede controlar a través de la alcalinidad propia o natural. El nitrógeno orgánico en contenidos altos contribuye de forma adecuada a la alcalinidad, la suplementación de alcalinidad es el éxito del tratamiento anaerobio y necesario para el proceso (CIATEJ, 2015).

Teniendo un pH menor a 6 las bacterias formadoras de metano se inhiben, formándose grandes cantidades de ácidos grasos volátiles, cuando el pH es mayor a 8 se generan iones tóxicos para el proceso. Para ajustar el pH se puede utilizar: cal, bicarbonato de sodio (NaHCO_3), o hidróxido de sodio (NaOH). También se debe tener cuidado con la precipitación excesiva de los carbonatos de calcio que se lleguen a formar (CONAGUA, 2016).

2.7.3 Temperatura

De acuerdo a la FAO, 2011 en la operación de digestión anaerobia, la temperatura es uno de los principales parámetros, debido a su fuertemente dependencia con el crecimiento bacteriano; Una variación brusca de temperatura, puede llegar a desestabilizar el proceso, por lo que es recomendable tener un sistema de agitación y una homogenización así como un controlador de temperatura para poder generar una mayor producción de biogás y un crecimiento bacteriano conforme a la temperatura:

- Psicófilos (menor a 25 °C)
- Mesófilos (entre 25°C y 45°C)
- Termófilos (entre 45°C y 65°C)

El rango psicófilo ha sido poco estudiado y es considerado como poco viable, ya que se necesita de reactores de mayor volumen, pero su estabilidad es mayor conforme a los otros rangos de temperatura de operación (FAO, 2011).

Si la temperatura es mayor, la tasa de crecimiento aumenta ampliamente como es en el rango termófilo que es considerado como el más idóneo ya que tiene una mayor velocidad en el proceso, mayor eliminación de patógenos, menor inestabilidad a cualquier cambio de condiciones de operación y una mayor posibilidad de inhibición del proceso por la mayor toxicidad de determinados compuestos a elevadas temperaturas, como es el nitrógeno amoniacal o los ácidos grasos de cadena larga, además de un mayor control de seguimiento del proceso pero con un gasto mayor energético en cuestión de mantener la temperatura elevada, mientras que en el rango mesófilo es más estable y un consumo menor energético (Fernández *et al.*, 2008).

2.7.4 Tiempo de retención hidráulico, TRH y Carga Orgánica Volumétrica, COV

El Tiempo de Retención Hidráulico se designa al volumen de sustrato orgánico cargado diariamente al digestor, por lo que el valor tiene una relación inversa con el tiempo de retención ya que cada vez aumenta la carga volumétrica y las bacterias requieren de un cierto tiempo para poder degradar la materia orgánica (FAO, 2011).

La Carga Orgánica Volumétrica, es la cantidad de materia orgánica introducida diariamente o cada cierto tiempo en el reactor por unidad de volumen, expresada en términos de DQO o de sólidos volátiles siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y de tiempo de retención fijado por lo que la cantidad de entrada en el influente es expresada en litros y el tiempo (días). En ausencia de inhibidores, cargas orgánicas colosales proporcionan altas producciones volumétricas de biogás (de Basurto, 2013). Procesos anaerobios con TRH de entre 0 a 24 horas, llega a favorecer la producción de hidrógeno en vez de metano (Arime *et al.*, 2015).

2.7.5 Potencial redox

Para un adecuado crecimiento en los microorganismos anaerobios obligados se deben de tener valores entre -220 mV a -350 mV a un pH 7 esto para mantener un ambiente fuertemente reductor para las bacterias metanogénicas para su óptima actividad al momento que se cultivan se incorporan agentes reductores fuertes como sulfuros, cisteínas o titanio III para ajustar el medio a un potencial redox adecuado (FAO, 2011).

2.7.6 Nitrógeno amoniacal

El amonio se encuentra en la materia prima que entra al reactor, o ser producido durante la degradación anaerobia a partir de compuestos orgánicos nitrogenados tales como proteínas o aminoácidos. El nitrógeno amoniacal se puede considerar como un nutriente importante para el crecimiento bacteriano a bajas concentraciones, pero en exceso puede llegar a inhibir el proceso (FAO, 2011).

2.7.7 Sulfatos y Sulfuros

La presencia de altas concentraciones de sulfato en el sustrato puede llegar a inhibir el proceso anaerobio, específicamente el de metanogénesis, ya que bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrogeno), por lo que se pueden observar en los resultados de acuerdo a la proporción que se genera de ácido sulfhídrico y metano en el biogás (FAO, 2011).

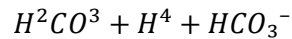
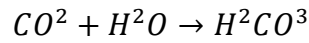
El sulfuro también se considera un componente inhibidor para grupos bacterianos, que se llega a producir durante la degradación de materia orgánica que contiene azufre (proteínas), que se llegan a encontrar en residuos como el guano de cerdo. Por lo que el grupo metanogenico es más sensible a los grupos acidogénicas y acetogénicas, comenzando a ser tóxicos a concentraciones mayores a 50 mg/L si los microorganismos metanogenicos no están aclimatados a los sulfuros. Por tanto, la inhibición se divide en dos etapas la primera a la competencia por el sustrato entre los microorganismos metanogenicos y sulfatos-reductores donde la segunda se clasifica por una inhibición indirecta de crecimiento metanogenico por la presencia de sulfuros solubles (FAO, 2011).

2.7.8 Demanda Química de Oxígeno, DQO

La DQO es la medida de oxígeno necesario para oxidar a la materia orgánica de un desecho por medio de un agente oxidante bajo ciertas condiciones de acidez, temperatura y tiempo, transformando la materia orgánica en dióxido de carbono y agua (CONAGUA, 2018).

2.7.9 Alcalinidad

De acuerdo a CONAGUA, 2016 la alcalinidad es una medida para determinar la capacidad buffer de un proceso, esto se entiende como la capacidad de una solución para amortiguar los cambios en el potencial de hidrógeno pH. La alcalinidad está presente en forma de bicarbonatos en equilibrio con el dióxido de carbono en el gas. La formación de AGV, puede causar una acumulación de ácidos no reutilizables, la relación de alcalinidad se representa de la siguiente forma:



2.8 Agitación

De acuerdo a Appels *et al.*, 2008 existen diferentes tipos de agitación como la recirculación de materia digerida, agitación mecánica y la inyección del gas producido. La materia digerida es recirculada desde el centro del reactor y es mezclado con el sustrato nuevo agregado. La agitación mecánica se lleva a cabo, con turbinas de baja velocidad esto para no destruir los flóculos y así tener un proceso estable. El método de inyección de biogás hace agitar el contenido del reactor y así se evita la formación de costras.

2.9 Características de la biomasa granular y biomasa fija

La biomasa anaerobia tiene una mayor ventaja cuando la DQO es mayor, además puede dejarse sin alimentar por días o hasta meses sin perder su actividad metanogénica, por lo que la hace una característica única e incomparable, teniendo un mayor interés para las industrias estacionales como son las destilerías por lo cual se logra una mayor aceptación para el tratamiento de vinazas (Bermúdez-Savón *et al.*, 2000).

2.9.1 Biopelícula

Una biopelícula es aquella célula, con una estructura compleja y productos celulares, los cuales se adhieren a una superficie sólida o sustrato (Figura 3), donde la inmovilización puede alcanzarse de dos formas, artificial o naturalmente en condiciones naturales específicas que forman biopelículas espontáneas, esto debido a que los microorganismos están asociados con superficies sólidas. En corrientes como ríos, existe una actividad microbiana que ocurre en películas adheridas, teniendo la capacidad de purificar los ríos por transformación y degradación de los compuestos naturales y antropológicos. En métodos de inmovilización artificiales de procesos de biopelículas se pueden clasificar en tres categorías como partículas acarreadoras, soportes de biopelículas entrampadas o partículas porosas (Sandoval, 2015).

En los reactores de biopelícula, se encuentran inmobilizados formando una capa densa, la cual crece adherida a una superficie sólida. Las bacterias en suspensión pueden ser eliminadas fácilmente por el flujo de agua; sin embargo, las bacterias que se encuentran adheridas a la biopelícula no son afectadas por dicho flujo. La sustancia polimérica extracelulares (SPE) se consideran como el pegamento que mantiene a la biopelícula en su lugar (Morgenroth, 2017).

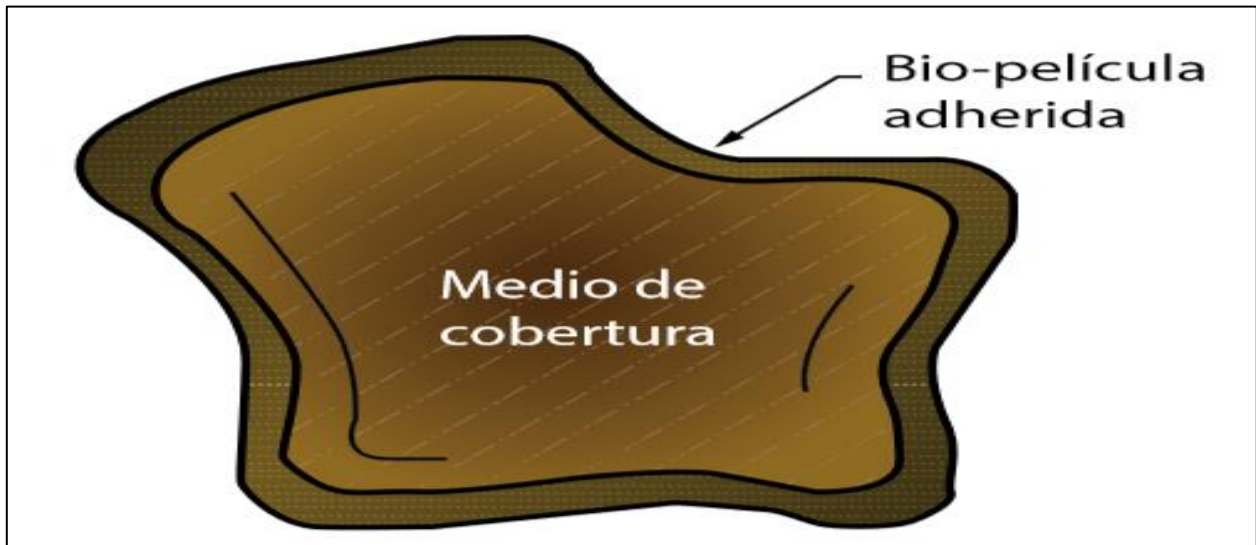


Figura 3. Formación de una biopelícula (CONAGUA, 2017)

2.9.2 Biomasa granular

En la Figura 4, se muestra la estructura de un lodo granular. En los reactores RAFA, se llegan a producir los lodos granulares formándose en los intersticios. La superficie sirve como un medio de soporte, formando un crecimiento bacteriano (biopelícula), mientras que los espacios sobrantes se ocupan por microorganismos que crecen dispersamente (CONAGUA, 2017).

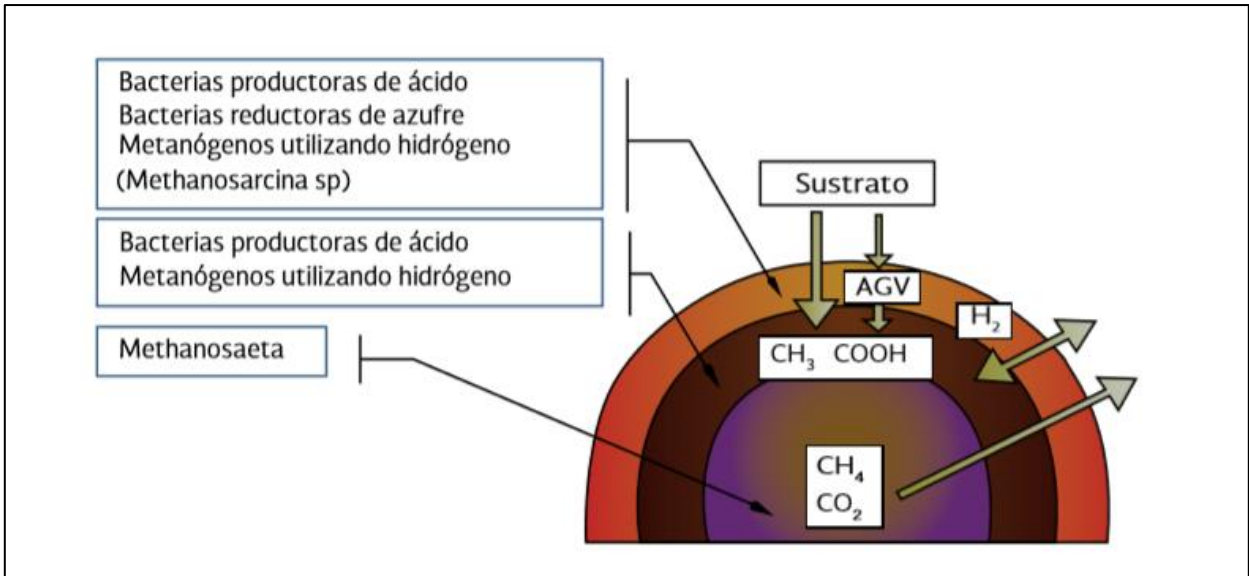


Figura 4. Estructura de microorganismos en biomasa granular (CONAGUA, 2017)

2.10 Legislación ambiental

Cualquier responsable de generar y descargar aguas residuales debe de cumplir con la normatividad vigente, por lo que la industria tequilera no queda exenta. Como es la (NOM-001-SEMARNAT-1996), encargada de regular los límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Si la empresa descarga sus aguas residuales en alcantarillado municipal deberán cumplir con la (NOM-002-SEMARNAT-1996), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal. Por el momento el tratamiento de vinazas y las plantas en operación no han sido técnicamente eficientes y a su vez no cumplen con la normatividad vigente. Mientras que las pequeñas empresas se encuentran limitadas por el recurso financiero. Solamente las grandes empresas tequileras producen el 80% de tequila si estas tienen el equipo necesario para el tratado de vinazas se puede resolver dicho problema (CIATEJ, 2015).

3 Metodología

A continuación se describe el proceso y técnicas, que fueron empleadas para la alimentación de vinaza tequilera, con procesos de digestión anaerobia, con dos tipos de biomasa diferente (granular y fija). Tratando de mantenerlo en condiciones óptimas a través de técnicas de cuantificación y cualitativas.

3.1 Obtención de vinaza

No todas las vinazas tienen la misma composición de contaminantes esto debido a la fábrica que lo produce y su método de producción, como lo es un proceso artesanal. La vinaza, provino de Guadalajara Jalisco, donde se proporcionó la cantidad de 1,000 L, la cual se almacenó en el cuarto de refrigeración, a una temperatura de 4-5 °C, sin ningún pretratamiento ni alteración en el pH.

3.1.1 Sistema operacional

El estudio fue realizado en el laboratorio de tratamiento de aguas residuales (planta piloto), en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) Jiutepec, Morelos. Cada reactor fue construido de acrílico transparente, con una altura de 100 cm y un diámetro de 8 cm, con una capacidad de 5,000 mL del cual solo se ocupó un volumen de 4,800 mL debido a que el volumen aumenta por la producción de biogás ya que se generan burbujas y quedan atrapadas entre la biomasa. Para la operación, se le instalo dos bombas peristálticas conectadas con mangueras, una para la recirculación y otra para la alimentación, teniendo un tiempo de retención hidráulico de 24 horas (tipo batch), a una temperatura de 33° C, en un periodo de 250 días, dividido en tres fases la primera de 70 días, la segunda 100 días y la ultima 80 días. En la tabla 10 se muestran las concentraciones de DQO en cada reactor, asi como la COV que se trabajó para cada tipo de reactor, de acuerdo a cada fase.

Tabla 10. concentración de DQO en los dos tipos de reactores

Periodo/dias	Reactor de biomasa granular (DQO)	Reactor de biomada fija (DQO)
Fase 1, 70 dias	8,000 mg/L, (3 kg DQO/m ³ d)	4,500 mg/L, (1.5 kg DQO/m ³ d)
Fase 2, 100 dias	10,000 mg/L, (3.5 kg DQO/m ³ d)	8,000 mg/L, (2.5 kg DQO/m ³ d)
Fase 3, 80 dias	12,000 mg/L, (4 kg DQO/m ³ d)	12,000 mg/L, (4 kg DQO/m ³ d)

3.1.2 Alimentación de los reactores

Se debe destacar que siempre se trabajó con vinaza diluida, agregándole agua de la llave, esto para disminuir la concentración de la DQO, ya que la vinaza tenía una DQO inicial de 75,000 mg/L. Debido a que la vinaza tiene un pH ácido 3-4, se le agregó óxido de calcio (CaO) a fin de alcanzar un pH 9, sin embargo se observó que el uso de este químico generó un precipitado, para poder eliminarlo se dejó sedimentar durante 2 horas para no introducirlo en el reactor, por lo que solo se tomó la parte superior del alimento. En ocasiones se amortiguó la vinaza mediante el suministro de hidróxido de sodio (NaOH) si el pH llegase a bajar, algunos autores como España-Gamboa, *et al.*, 2012 menciona que los AGV llegan a causar una inhibición en el proceso anaerobio, por lo que recomienda agregar (NaOH) para prevenir una caída del pH. De igual forma igual forma Bermúdez-Savón, *et al.*, 2000 menciona que los tratamientos neutralizados con NaOH, mantienen una mayor velocidad de producción de metano.

3.1.3 Reactor con biomasa granular

En la parte inferior del reactor granular, se le agregaron 2 cm de grava, esto para poder evitar que la manguera se llegara a tapar, se le agrego 1,550 mL de biomasa y 2,250 mL vinaza en la Figura 5 se muestra el diagrama del reactor. El lodo granular ya estaba aclimatado a comparación de la biomasa fija, debido a que provenía de una industria papelera por lo cual había tratado COV altas, posteriormente en el laboratorio del IMTA,

se le realizo un pretratamiento y aclimatación con vinaza tequilera, para poder comenzar con dicho trabajo. En la Figura 6, se muestra la biomasa, se puede observar que el diámetro abarca entre 1 a 3 mm, siendo similar a la biomasa tratada por Sosa, 2013, mientras que para (Urbano, M. 2017) menciona que entre 1 a 4 mm de lodo granular es un adecuado tamaño, para el tratamiento de vinaza y una adecuada eliminación en la DQO.

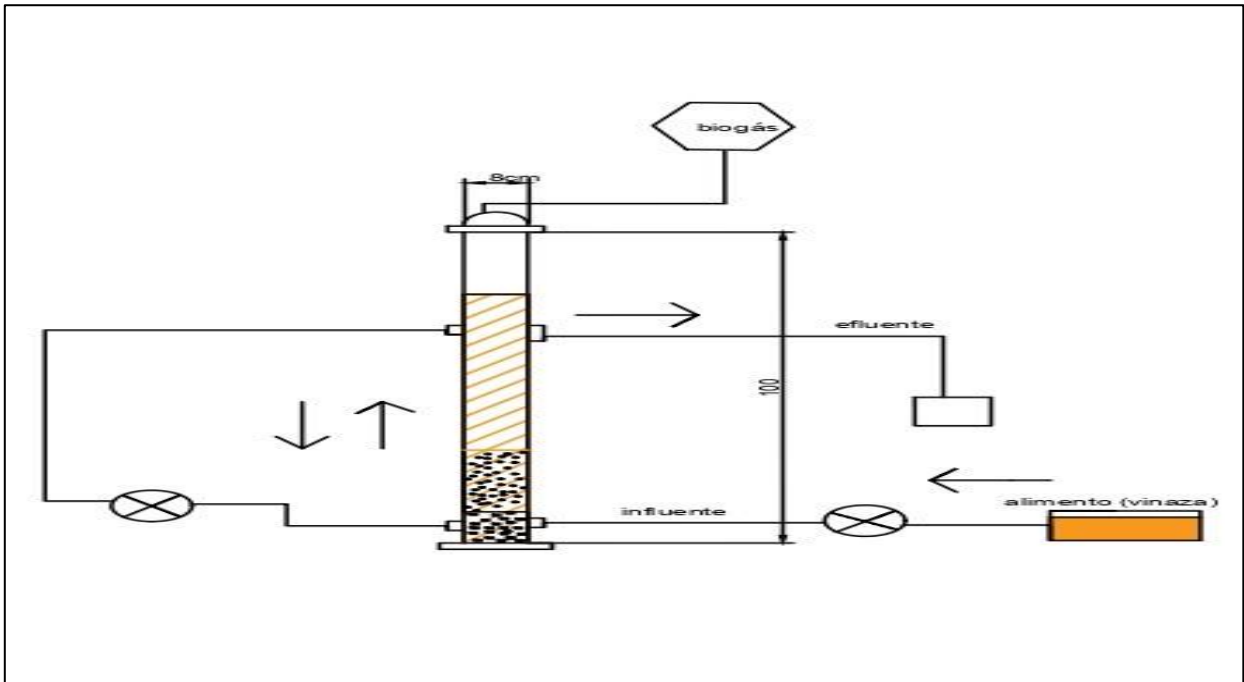


Figura 5. Diagrama del reactor granular



Figura 6. Biomasa granular

3.1.4 Reactor con biomasa fija

El reactor con biomasa fija (Figura 7), se le agrego 1,200 mL de biomasa y 3,000 mL de alimento (vinaza), teniendo un total de 4,200 mL. La biomasa que se utilizó, fue proporcionada por la planta de aguas residuales de Cuautla, Morelos, solo había trabajado con una DQO, no mayor a 500 mg/L, para un mayor porcentaje de remoción se le agrego 350 cubos de poliuretano, los cuales median 1 cm³, con una superficie porosa con el fin de ocupar los espacios vacíos y tener un mayor porcentaje de microorganismos adheridos a estos, formando una biopelícula (Figura 8). En el día 93 se le agrego 1 kg, de lodo granular donde se tuvo que romper la estructura por lo cual se molió en un mortero, esto para poder mejorar el proceso anaerobio viéndose reflejo en el porcentaje de DQO del efluente. De acuerdo a Vdlani *et al.*, 2008 utilizar lodo proveniente de un tratamiento de aguas residuales domesticas puede llegar a reducir hasta un 40% el proceso.

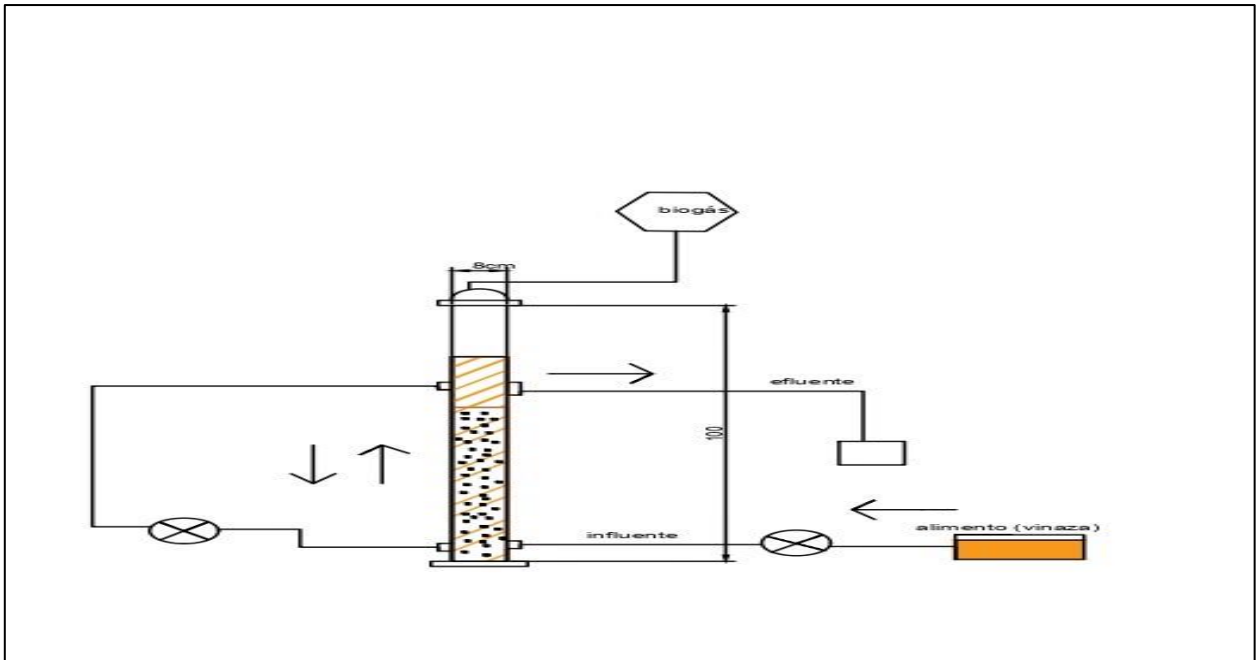


Figura 7. Arranque del reactor biomasa fija



Figura 8. Biomasa fija adherida a un cubo de poliuretano

3.1.5 Parámetros de campo

Se realizaron mediciones de pH, O.D. y temperatura diariamente utilizando un multiparametros Hach, tomando una muestra de 100 mL del efluente de la DQO tratada.

3.1.6 Determinación de DQO

Para la valoración de DQO se utilizó el método DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO METODO TUBO SELLADO mediante medición espectrofotométrica de alto rango aforando de 10:50 ml tomando en cuenta la (NMX-AA-030/1-SCFI-2012) y la (NMX-AA-030/2-SCFI-2011). Donde se dará la oxidación química de la materia orgánica e inorgánica, presente en las muestras de agua.

3.1.7 Eficiencia de remoción de la materia orgánica DQO

El proceso de remoción describe el funcionamiento de los reactores conforme a su eficiencia de degradación de la materia orgánica DQO, por lo cual se mide en porcentaje.

$$E = \frac{DQOe - DQOi}{DQOe} * 100$$

Dónde:

E: eficiencia de remoción del sistema (%)

DQOi: carga contaminante de salida (DQO mg)

DQOe: carga contaminante de entrada (DQO mg)

3.1.8 Determinación de alcalinidad total

Para la valoración de alcalinidad total se utilizó el MÉTODO ELECTROMÉTRICO tomando en cuenta la NMX-AA-036-SCFI-2001, llegando a un pH de 4.5

1.1 Formula N acido.

$$N \text{ acido} = \frac{gNa_2CO_3 * PESADOS}{0.053 * mL \text{ de acidos utilizados}}$$

.053= miliequivalente de Na₂CO₃

1.2 La alcalinidad total expresada en mg/L de carbonato de calcio, se calcula mediante la siguiente formula.

$$\text{alcalinidad como CaCO}_3 \text{ en } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{(f+A)*N*50*1000}{V}$$

En dónde:

F+A= volumen utilizado en la valoración con la solución acida hasta el vire de naranja de metilo, pH de 4.5.

N= normalidad de la solución ácido sulfúrico o clorhídrico

V= volumen de la muestra en mililitros

50= peso equivalente del CaCO₃

1.2 para alcalinidades bajas utilizar la siguiente formula

$$\text{alcalinidad como CaCO}_3 \text{ en } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{(2B - C) * N * 50 * 1000}{V}$$

Dónde:

B= mL gastados de ácido para el primer pH registrado

C= total de mL gastados de ácido para alcanzar el pH de 0.3 y CAQAF7 – 06

3.1.9 Determinación de ácidos grasos

Se utilizó el método (Hach ácido acético) aceptado por la USEPA (Agencia para la protección del ambiente de EE.UU.) la prueba de ácidos volátiles está diseñada específicamente para determinar los ácidos volátiles en los lodos. El método se basa en la esterificación de los ácidos carboxílicos presentes en la muestra y la posterior determinación de los esteres mediante la reacción de hidroxomato férrico. Todos los ácidos volátiles presentes se informan como su equivalente mg/L como ácido acético.

3.2 Determinación de sulfato

Para poder determinar sulfatos se utilizó método (Hach SulfaVer 4*) aceptado por la USEPA (Agencia para la protección del ambiente de EE.UU.) Los iones de sulfato en la muestra reaccionan con el bario en el reactivo de sulfato Sulfaver4 y forman una turbidez

de sulfato de bario insoluble. La cantidad de turbidez formada es proporcional a la concentración de sulfato.

3.2.1 Determinación de nitrógeno amoniacal

Para poder determinar nitrógeno amoniacal se utilizó método (Hach método Nessler) aceptado por la USEPA (Agencia para la protección del ambiente de EE.UU.) Dónde el estabilizador mineral forma complejos con la dureza en la muestra. El agente de dispersión de alcohol polivinil ayuda a la formación del color en la reacción del reactivo Nessler con iones de amonio. Se forma un color amarillo proporcional a la concentración de amonio.

3.2.2 Determinación de Carga orgánica volumétrica

De acuerdo a CONAGUA 2016 la COV, es el producto del gasto por la concentración de la materia orgánica DQO del agua residual alimentada diariamente al reactor, dividido entre el volumen efectivo del reactor

La carga volumétrica se define como:

$$L = \frac{DQO_i}{TRH}$$

Dónde:

L: carga orgánica volumétrica (kg/m³.d)

DQO: concentración contaminante del afluente (mg/L)

TRH: tiempo de retención hidráulico (días)

3.2.3 Cuantificación del biogás

El biogás durante toda la experimentación fue captado en una bolsa tedlar de 5 L (Figura 9). La cuantificación, se realizó conforme a la producción diaria, posteriormente se llevó la muestra al laboratorio donde se encontraba el cromatógrafo de gases para los análisis correspondientes.



Figura 9. Bolsa de tedlar llena del reactor granular

3.2.4 Cromatografía de gases

Para la identificación de gases que se produjeron en los diferentes reactores, se utilizó el cromatógrafo de gases modelos SRI 8610c (Figura 10), con el método para la columna shincarbon st (restek), donde se tomará una porción de 0.5 mL de muestra.

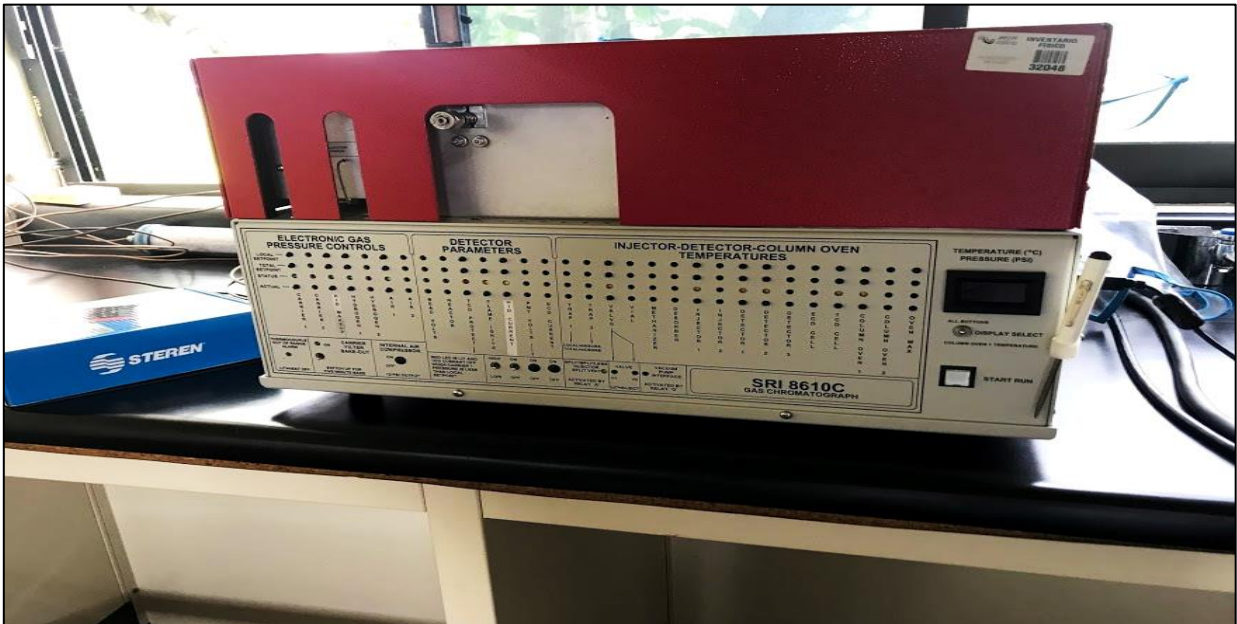


Figura 10. Cromatógrafo de gases, para la composición de biogás

4 Resultado y discusión

4.1 Caracterización de la vinaza

De acuerdo a Ríos-Gutiérrez *et al.*, 2005 todas las vinazas tequileras, tienen una composición diferente, esto debido al agave usado, la eficiencia de los procedimientos de cocimiento y la fermentación del proceso de destilación utilizado. Por lo cual se comenzó con la caracterización fisicoquímica de la vinaza (Tabla 11), para poder obtener información relevante sobre este tipo de descarga industrial y qué porcentaje de vinaza utilizar, para no inhibir el proceso anaerobio. En los resultados de sulfatos, se observa una producción de H₂S, con un resultado de 460 mg/L con resultados similares con (Rivera *et al.*, 2002). En el caso del nitrógeno amoniacal, se obtuvo un resultado de 415 mg/L, para el caso del pH se considera con una vinaza acida, teniendo un valor de 3.2 por lo cual si se vierte directamente a mantos acuíferos, ocasionaría una acidificación. En el caso de los SST se encuentran con valores muy excesivamente elevados, con un resultado de 30,000 mg/L. Para los sulfuros se encontraron elevados a comparación de (Ríos-Gutiérrez, 2005) con una diferencia de 200 mg/L. (Rivera *et al.*, 2002) obtuvo resultados en la DQO de 67,057 mg/L siendo similar a la vinaza. Con los resultados obtenidos se observó que no cumple con ninguna de estas dos normas, NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-002-SEMARNAT-1996, llegando a ocasionar grandes multas para las empresas como un deterioro ambiental.

Tabla 11. Comparativa de las normas referentes al vertido de aguas residuales

Parámetros medidos	Resultados	NOM-001- SEMARNAT- 1996	NOM-002- SEMARNAT- 1996
DQO, mg/L	75,000		
Temperatura, °C	90	40	40
Ácidos Grasos, mg/L	3,900		
Oxígeno Disuelto, mg/L	0.53		

<i>Parámetros medidos</i>	<i>Resultados</i>	NOM-001- SEMARNAT- 1996	NOM-002- SEMARNAT- 1996
pH,	3.2	5-10	5.5-10
Sulfuros, mg/L	362.50		
Sulfatos (SO ₄), mg/L	460		
Sólidos Suspendidos Totales, mg/L	30,000	125	
Sólidos Suspendidos Volátiles, mg/L	625		
Potencial Redox, mV	-85		
Nitrógeno Amoniacal, mg/L	415		

4.2 Resultados de campo

4.2.1 pH

En la Tabla 12, se presenta en promedio los resultados obtenidos durante las tres fases en cada uno de los reactores. Para llevar a cabo un proceso anaerobio óptimo es necesario utilizar un pH alrededor de 7 (Sosnowski et al., 2002). Durante todo el proceso el pH fue inestable para ambos reactores, esto debido a la acumulación de algunos ácidos orgánicos como, butírico, propiónico y acético que se producen en los tratamiento anaerobios (Goel *et al.*, 2003), afectando directamente a la remoción de DQO, producción de biogás y generando gases no deseados.

Para ambos reactores siempre se mantuvo en el rango óptimo entre un pH (6.8-7.2), donde en la tercera fase en el reactor con biomasa granular es el que mayor se acercó, con un promedio de pH a 6.93, por lo que se logró una mayor estabilidad. Marino-Marmolejo *et al.*, 2015 menciona que el pH tiene una relación con la concentración de DQO, por lo que si el pH se vuelve ácido afecta a su remoción de DQO.

Para el reactor de biomasa fija, el pH tuvo un aumento gradual, comenzando con un resultado de 6.74 para la primera fase, llegando hasta un pH de 6.87 de acuerdo a López-López y Contreras-Ramos, 2015 se considera un pH óptimo con valores de 6.8 a 7.4.

Algunos autores como Sosa, 2013 reportó un pH de 7.5, debido que durante la operación de un reactor UASB, no presentó acumulación de AGV y una capacidad buffer amortiguadora. El pH se consideró un parámetro importante ya que las bacterias metanogénicas, son muy sensibles a cambios muy bruscos y pueden llegar a morir.

Tabla 12. Resultado de pH en biomasa granular y fija

Parámetro	Fase 1	Fase 2	Fase 3
	Reactor biomasa granular		
COV, kg DQO/m ³ d	3	3.5	4
pH	6.82 ± 0.26	6.78 ± 0.23	6.93 ± 0.16

Parámetro	Fase 1	Fase 2	Fase 3
	Reactor biomasa fija		
COV, kg DQO/m³ d	1.5	2.5	4
pH	6.74 ± 0.21	6.85 ± 0.17	6.87 ± 0.25

4.2.2 Temperatura

En la tabla 13, se muestran los resultados, de las 2 diferentes biomazas, para la granular en la primera fase se obtuvo un promedio, de 31.2 °C, para la segunda fase se obtuvo un valor de 31.8°C y la tercera fase con un promedio de 31.5 C mientras que para la biomasa fija, en la primera fase se obtuvo un promedio de 30.3 °C, para la segunda fase con un promedio de 30.8 °C y la última con un promedio de 30.6° C. Wang *et al.*, 2018 menciona que mientras menor sea la temperatura, ocurre una disminución de biogás. Se trabajó con bacterias microbianas mesofilas, se consideró trabajar con este tipo de microorganismos ya que se considera como menos vulnerables a cambios de temperatura drástica y por ser uno de los sistemas más estudiados.

Tabla 13. Resultado de temperatura en biomasa granular y fija

Parámetro	Fase 1	Fase 2	Fase 3
	Reactor biomasa granular		
COV, kg DQO/m³ d	3	3.5	4
°C	31.2 ± 2.8	31.8 ± 2.3	31.5 ± 1.9
	Reactor biomasa fija		
COV, kg DQO/m³ d	1.5	2.5	4
°C	30.3 ± 1.5	30.8 ± 2.1	30.6 ± 2.0

4.2.3 Oxígeno Disuelto

En la tabla 14, se muestra los resultados de los promedios de cada fase, por lo cual se mantuvo en control, manteniéndose bien sellado debido a que este parámetro es de gran importancia, la concentración de oxígeno disuelto debe de ser nula o baja en todo momento. Para la biomasa granular se obtuvo un resultado de 0.76 mg/L, en la segunda fase con un promedio menor de 0.54 mg/L, obteniendo mejores resultados en la producción de metano, ya para la tercera fase con un promedio de 0.68 mg/L, aumentando muy poco, pero sin afectar al proceso anaerobio, teniendo de igual forma, resultados favorables en la producción de metano.

Para el reactor de biomasa fija en la primera fase se obtuvo un promedio de 0.26 mg/L considerándose como la concentración más baja para ambos sistemas, para la segunda fase se obtuvo un promedio de 0.32 mg/L siendo favorable, ya para la tercera fase se obtuvo un resultado de 0.35 mg/L por lo cual no hubo un cambio drástico en todo el proceso en la biomasa fija, aun teniendo concentraciones más bajas en el oxígeno disuelto, que la biomasa granular, no se lograron obtener mejores resultados tanto en la producción de metano como la remoción de DQO.

Tabla 14. Resultado de Oxígeno Disuelto en biomasa granular y fija

Parámetro	Fase 1	Fase 2	Fase 3
	Reactor biomasa granular		
COV, kg DQO/m³ d	3	3.5	4
Oxígeno disuelto mg/L	0.76 ± 0.26	0.54 ± 0.21	0.68 ± 0.16
	Reactor biomasa fija		
COV, kg DQO/m³ d	1.5	2.5	4
Oxígeno disuelto mg/L	0.26 ± 0.17	0.32 ± 0.36	0.35 ± 0.25

4.3 Resultados Fisicoquímicos

4.3.1 Sulfatos

En la tabla 15, se muestran los resultados de las dos diferentes tipos de biomasa, para la biomasa granular se obtuvo un promedio en el influente de 180 mg/L y un efluente de 132 mg/L, para la segunda fase en el influente se obtuvo un promedio de 184 mg/L y en el influente con un promedio de 153 mg/L, por lo cual se mantuvo estable, para la tercera fase se obtuvo un promedio en el influente de 180 mg/L y un efluente de 112 mg/L siendo la de mayor remoción.

Para la biomasa fija, en la primera fase se obtuvo un promedio en el influente de 171 mg/L y un efluente de 113 mg/L. Para la segunda fase se obtuvo un promedio en el influente de 182 mg/L y para el efluente, un promedio de 139 mg/L este sin afectar la producción de metano, para la tercera fase se obtuvo un promedio en el influente de 181 mg/L y en el efluente un promedio de 136 mg/L considerándose óptimos para ambos procesos.

España-Gamboa *et al.*, 2012 menciona que resultados mayores a 170 mg/L de sulfatos pueden llegar a inhibir el proceso de gas metano ocasionando gases no deseados, por lo cual las bacterias sulfa-reductoras siempre estuvieron presente, ocasionando gases no deseados viéndose reflejados en el porcentaje de metano para ambos reactores.

Tabla 15. Resultado de sulfatos en biomasa granular y fija

Parámetro	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	Reactor biomasa granular					
COV, kg DQO/m³ d	3		3.5		4	
	influyente	efluente	influyente	efluente	influyente	Efluente
Sulfatos mg/L	180 ± 7	132 ± 14	184 ± 7.6	153 ± 19	180 ± 13	112 ± 13

Parámetro	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	Reactor biomasa fija					
COV, kg DQO/m³d	1.5		2.5		4	
	influyente	efluente	influyente	efluente	influyente	Efluente
Sulfatos mg/L	171 ± 8	113 ± 10	182 ± 22	139 ± 35	181 ± 7	136 ± 13

4.3.2 Ácidos Grasos Volátiles

Para los AGV (Tabla 16), se muestran los resultados muy altos en el influente tanto para la biomasa granular como fija, por lo cual se generó una inhibición en las bacterias metanogénicas para la biomasa fija en la primera fase del proceso. Para la biomasa granular, se obtuvo un promedio en el influente de 490 mg/L y 270 mg/L en el efluente. Para la segunda fase el influente fue de 510 mg/L y de 220 mg/L, en el efluente. En la tercera fase en el influente fue de 570 mg/L y en el efluente de 180 mg/L para la segunda y tercera fase se logró una estabilidad en ambos reactores.

En la biomasa fija, se obtuvo un promedio en el influente de 465 mg/L y en el efluente de 238 mg/L. En la segunda fase se obtuvo un promedio en el influente de 474 mg/L y un promedio del influente de 214 mg/L considerándose favorable para la producción de metano, para la última fase se tuvo un promedio en el influente de 547 mg/L y un promedio en el efluente de 193 mg/L teniendo el mejor porcentaje a comparación de las otra dos fases. Tanto en el reactor de biomasa granular como fija, hubo una estabilidad a partir de la segunda fase, como menciona Terry *et al.*, 2008 concentraciones menores a 200 mg/L se obtendrá una buena formación del lodo y una mayor producción de metano.

Tabla 16. Resultado de Ácidos Grasos Volátiles AGV en biomasa granular y fija

Parámetro	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	Reactor biomasa granular					
COV, kg DQO/m³d	3		3.5		4	
	influyente	Efluente	influyente	efluente	influyente	Efluente
AGV, mg/L	490 ± 90	270 ± 60	510 ± 90	220 ± 30	570 ± 70	180 ± 70
	Reactor biomasa fija					
COV, kg DQO/m³d	1.5		2.5		4	
	influyente	Efluente	influyente	efluente	influyente	Efluente
AGV, mg/L	465 ± 72	238 ± 38	484 ± 90	214 ± 58	557 ± 63	193 ± 30

4.3.3 Alcalinidad total

Villalobos, 2013 menciona que se deben de tener concentraciones entre 2,000 a 3,000 mg/L, para un buen proceso anaerobio y evitar caídas de pH, por lo cual no se pudo llegar a dichos resultados (Tabla 17).

En la primera fase de biomasa granular se obtuvo como resultado un promedio, de 482 mg/L en el influente, y en el efluente con un promedio de 1,360 mg/L, en la segunda fase se obtuvo un promedio en el influente de 632 mg/L y para el efluente aumento teniendo un resultado de 1,814 mg/L. Para la tercera fase se obtuvo como resultado un promedio de 700 mg/L y en el efluente aumento, a 1,869 mg/L considerando estable.

Para la biomasa fija se obtuvo un promedio en la primera fase de 543 mg/L y en el efluente con un promedio 1,423 mg/L para la segunda fase, en el influente se obtuvo un resultado de 490 mg/L y en el efluente con un promedio de 1,567 mg/L ya en la tercera fase con un promedio en el influente de 605 mg/L y en el efluente con un promedio de 1,740 mg/L.

Teniendo altos contenidos de nitrógeno alto, existe una producción natural de un alcalinidad natural o propia, por lo que una suplementación adecuada de alcalinidad, se obtiene un tratamiento anaerobio exitoso (López-López y Contreras, 2015). Las concentraciones bajas en la alcalinidad ocasionaron una caída en el pH, por lo que no se pudo obtener un pH mayor a 7.

Tabla 17. Resultado de alcalinidad en biomasa granular y fija

Parámetro	Fase 1		Fase 2		Fase 3	
	Reactor biomasa granular					
COV, kg DQO/m ³ d	3		3.5		4	
	influyente	efluente	influyente	Efluente	Influente	Efluente
Alcalinidad, mg/L	482.33 ± 35	1,360 ± 550	632 ± 178	1,814 ± 380	700 ± 200	1,869 ± 400
	Reactor biomasa fija					
COV, kg DQO/m ³ d	1.5		2.5		4	
	influyente	Efluente	influyente	Efluente	Influente	Efluente
Alcalinidad, mg/L	543 ± 56	1,423 ± 284	490 ± 89	1,567 ± 258	605 ± 23	1,740 ± 213

4.3.4 Monitoreo de DQO en reactor de biomasa granular

En la Figura 11, se observó como la operación del reactor de biomasa granular tuvo un mayor porcentaje de remoción y una DQO más alta a comparación del reactor con biomasa fija. Para lograr un arranque exitoso es recomendable comenzar con una carga inicial de 4 kg DQO/m³ d e ir aumentando las cargas cuando exista una estabilidad y remoción del 90% en la DQO (Wolmarans y de Villiers, 2002).

Debido a lo anterior se comenzó, con una COV de 3 kg DQO/m³ d con una DQO de 8,500 mg/L alcanzando una remoción de 80-90% en la primera fase, siendo más estable que en el reactor de biomasa fija. Posteriormente se aumentó a una COV de 3.5 kg DQO/m³ d, con una DQO de 10,000 mg/L manteniéndose con una remoción mayor al 90%, para la tercera fase se trabajó con una COV de 4 kg DQO/m³ d, con una DQO de 12,000 mg/L y de igual forma se obtuvo una remoción mayor a 90% por lo cual se obtuvieron resultados similares de acuerdo con Cabrera et al., 2017 en la segunda fase.

Se observó que la biomasa granular tuvo una aclimatación más rápida, por lo cual trabajo sin problemas en las tres diferentes fases y comenzando con una COV mayor, Sosa et al., (2012) menciona que un reactor UASB, llega a tolerar concentraciones entre 1 y 6 kg DQO/m³ d y una remoción de hasta 76% en la DQO.

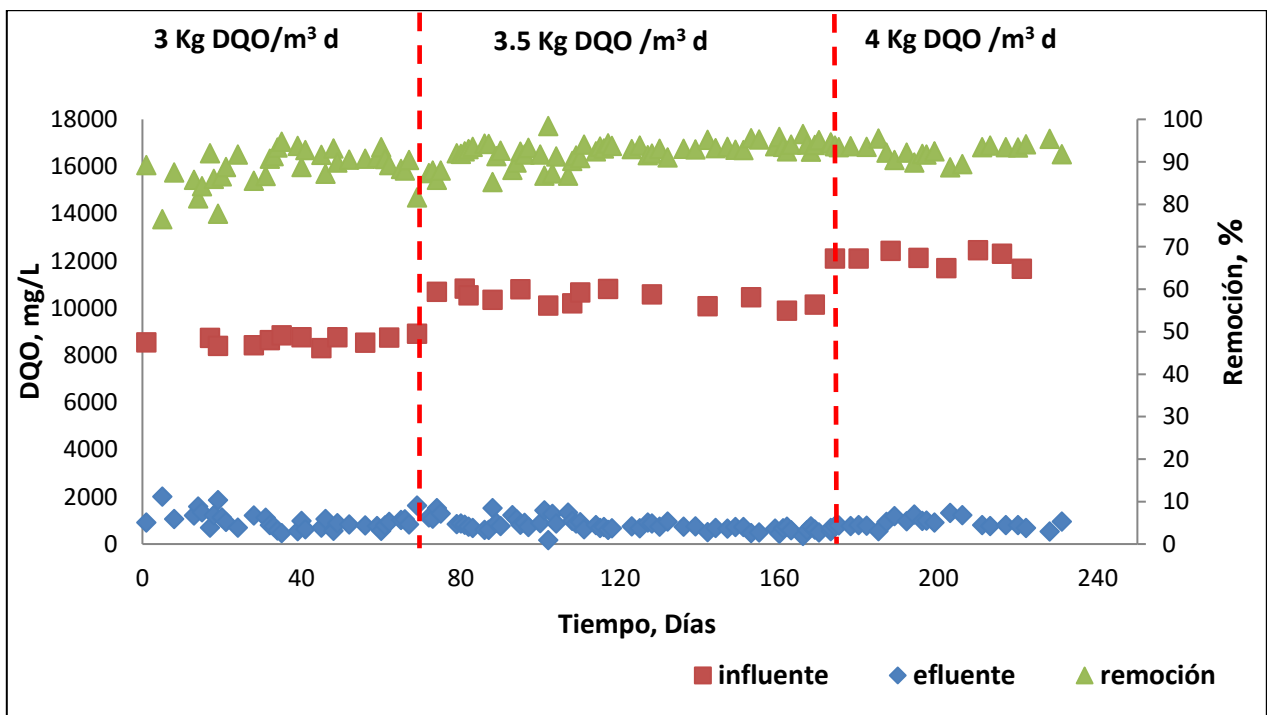


Figura 11. Resultados de DQO en biomasa granular

4.3.5 Monitoreo de DQO en reactor de biomasa fija

La Figura 12, se muestran los valores de la concentración de DQO para el influente, efluente y el porcentaje de remoción. Se puede observar un comportamiento inestable en la primera fase.

Se inició con una COV de 1.5 kg DQO/m³ d y un porcentaje de remoción en la DQO de entre un 60-70%. Para la segunda fase se aumentó la COV hasta 3.5 kg DQO/m³ d, con una remoción inicial de DQO del 70% y llegando a una remoción de hasta el 90%. Para la última fase se trabajó con una COV de 4 kg DQO/m³d y una remoción de DQO por arriba del 90% siendo similar a la de Cárdenas y Ramos, 2009 alcanzando una remoción de hasta de 89.7%, para Cabrera-Díaz *et al.*, 2017 con una COV de 4.7 kg DQO/m³ logro una remoción del 70%.

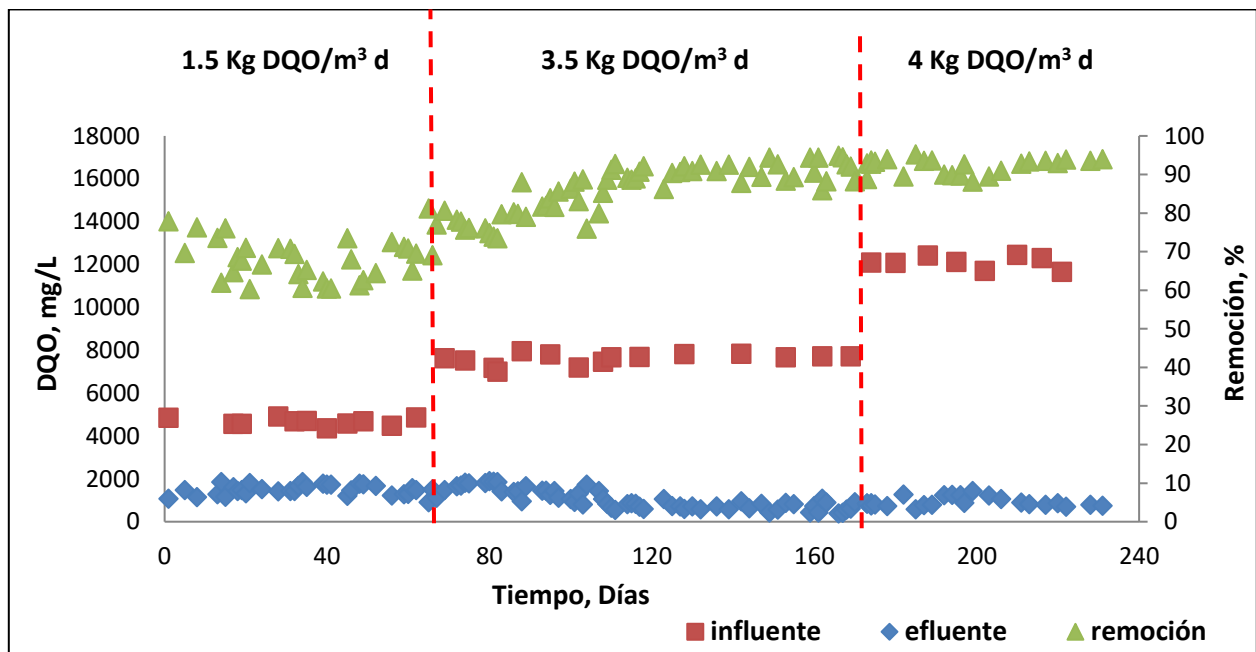


Figura 12. Resultado de DQO en biomasa fija

4.3.6 Monitoreo de N-NH₄ en reactor de biomasa granular

Para la biomasa granular (Figura 13), se comenzó con una concentración de 160 a 170 mg/L de N-H₄ en el influente, comenzando con una remoción por arriba del 50% llegando hasta un 80% , para la segunda fase la concentración se aumentó, teniendo resultados de 170 a 180 mg/L con una remoción inestable en esta fase ya que Durán *et al.*, 2015 menciona que concentraciones por arriba de 180 mg/L se consideran tóxicas por lo cual la remoción fue de un 70 a 80%; Para la tercera fase se obtuvieron resultados en el influente de hasta 200 mg/L, en esta fase de igual forma la remoción fue inestable, pero se logró un 80% de remoción. De acuerdo a España-Gamboa *et al.*, 2012 concentraciones mayores a 160 mg/L llegan a inestabilizar el proceso anaerobio,

mientras que para Cirne *et al.*, 2008 concentraciones alrededor de 200 mg/L, se puede considerar favorables.

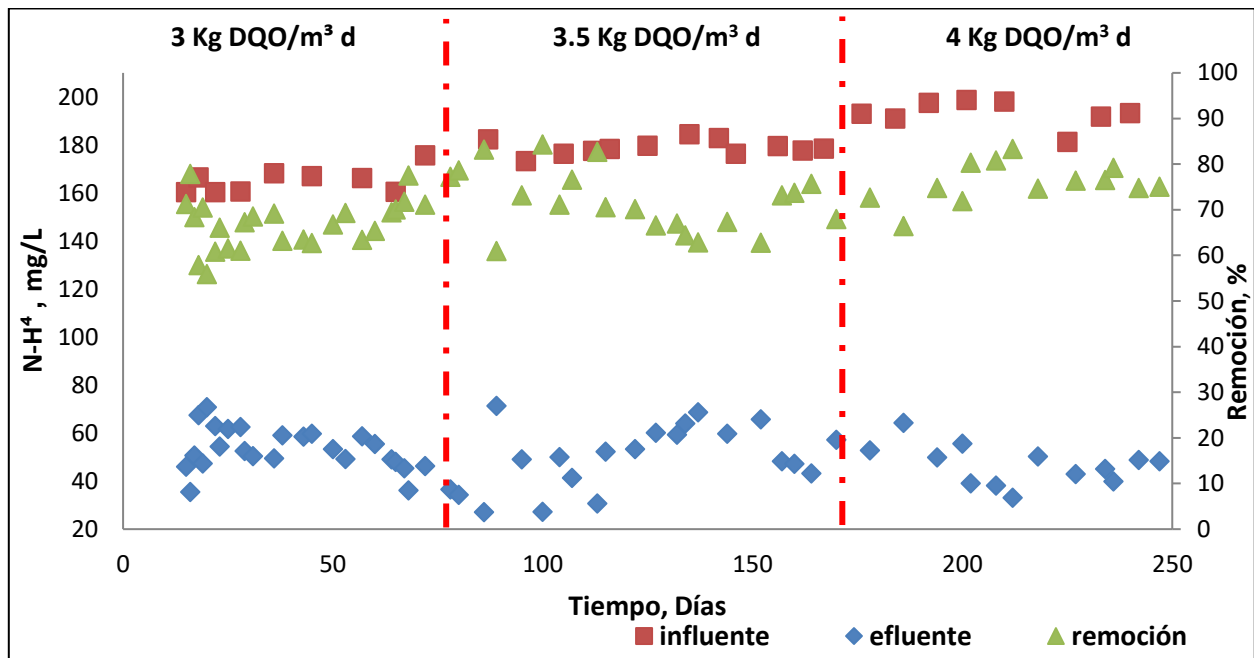


Figura 13. Resultados de $N-H^4$, en biomasa granular

4.3.7 Monitoreo de $N-NH_4$ en reactor de biomasa fija

En la Figura 14, se muestran los resultados de $N-NH_4$, al principio hubo una inestabilidad en el proceso ya que el porcentaje de remoción fue baja. Se comenzó a trabajar con una concentración de $N-H^4$ entre 120 a 130 mg/L por lo cual se consideró favorable de acuerdo a España-Gamboa *et al.*, 2012, obteniendo una remoción de un 50 a 60%. Para la segunda etapa la concentración de $N-H^4$ entre 140 a 155 mg/L y una remoción del 60 a 70% siendo la fase más estable.

Para la tercera fase la concentración fue de hasta 200 mg/L de $N-H^4$ considerándose tóxico de acuerdo a Durán *et al.*, 2015 al principio de la fase, la remoción bajó hasta un 65% pero se logró una remoción hasta un 82% por lo que no causó ningún tipo de problema para la degradación de $N-H^4$.

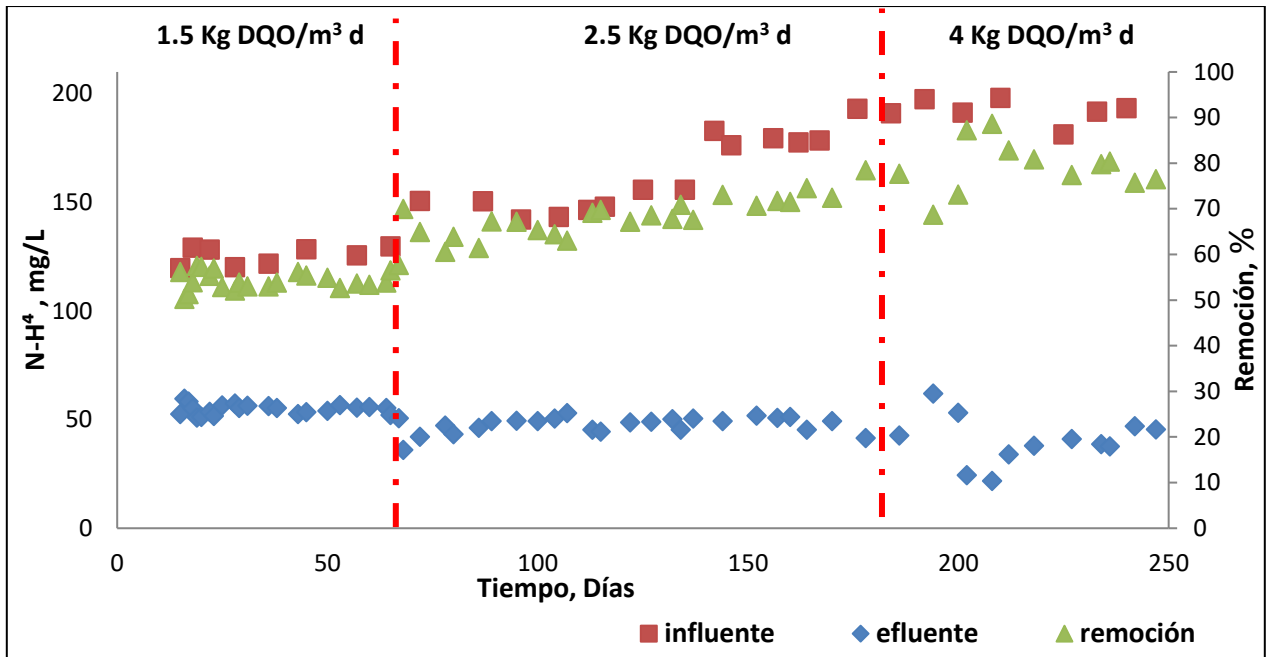


Figura 14. Resultados de N-NH₄, en biomasa fija

4.4 Composición de biogás

4.4.1 Composición del biogás en reactor de biomasa granular

En la Figura 17, se muestra la composición del biogás, en la primera fase se tomó una muestras en los días 42, 56 y 70 observando una producción de gas metano del 57%, 55% y 52% siendo similar con Cabrerías-Díaz *et al.*, 2017 que obtuvo un 52.3%.

Para la segunda fase se realizaron un total de 10 análisis donde los días 96, 117 y 132 fueron los de mayor producción teniendo un porcentaje de entre un 68% y 72% en los días 113, 125, 128 143, se obtuvo un resultado de entre 60% a 65% de producción de gas metano coincidiendo con Sosa *et al.*, 2012. Los días 78, 154 y 169 la producción de gas metano baja entre un 45% a 50% por lo cual no es un resultado óptimo debido a que la producción debe de estar por arriba de 50% aun asi esta fase fue la mayor producción de metano.

Para la tercera fase se alcanzó una producción mayor en el porcentaje de metano alcanzando hasta un 84% siendo similar a la producción de Jauregui-Jauregui, *et al.*, 2014 en el día 169 y 217 se obtuvo un resultado del 65% y 71% considerándose óptimo de acuerdo a Cruz-Salomón, *et al.*, 2017 para el día 235 cae drásticamente la producción de

metano teniendo un resultado del 42% siendo un resultado negativo para un proceso anaerobio.

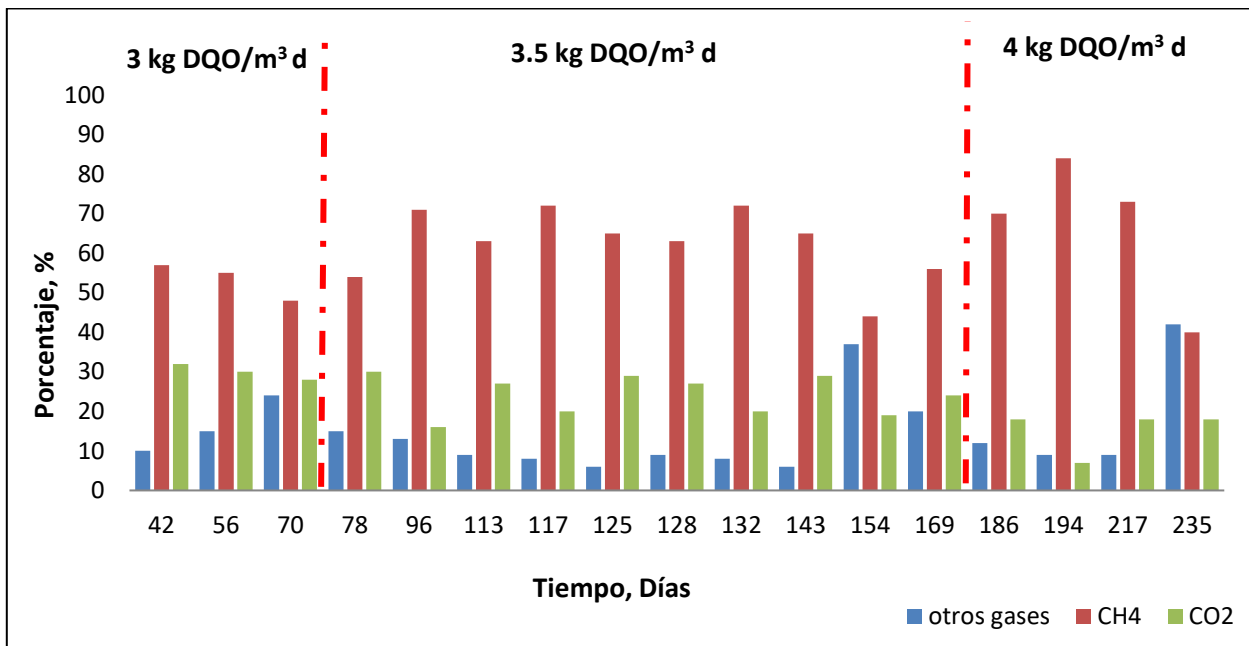


Figura 15. Porcentaje de gases en biomasa granular

4.4.2 Composición del biogás en reactor de biomasa fija

En la Figura 18, se observan los resultados de los diferentes tipos de gases generados. En el reactor de biomasa fija, el primer análisis se realizó el día 42 la producción de metano fue mínima con un porcentaje menor a 10% para el día 56 se obtuvo una producción del 15% ya para el día 70 con un resultado del 37% considerando como negativo.

Para la segunda fase se obtuvo un mayor porcentaje de gas de metano, en el día 125 teniendo una producción de hasta el 71% siendo el día de mayor producción así como en las 3 fases, teniendo resultados similares en la segunda fase con Rivera, 2002. En los días 78, 96, 113 117 se obtuvo resultados de entre 30% a 46% considerándose no favorables en un proceso anaerobio. A partir del día 128 hasta el 169 la producción aumento de entre un 50% hasta 60% considerándose una producción favorable para el proceso anaerobio. Para la tercera fase la producción de metano se mantuvo, teniendo resultado de entre un 55% a 60% por lo cual se estabilizo por completo el proceso

anaerobio de acuerdo a Cabrera-Díaz, *et al.*, 2017 con resultados finales de 68.1% de producción de metano.

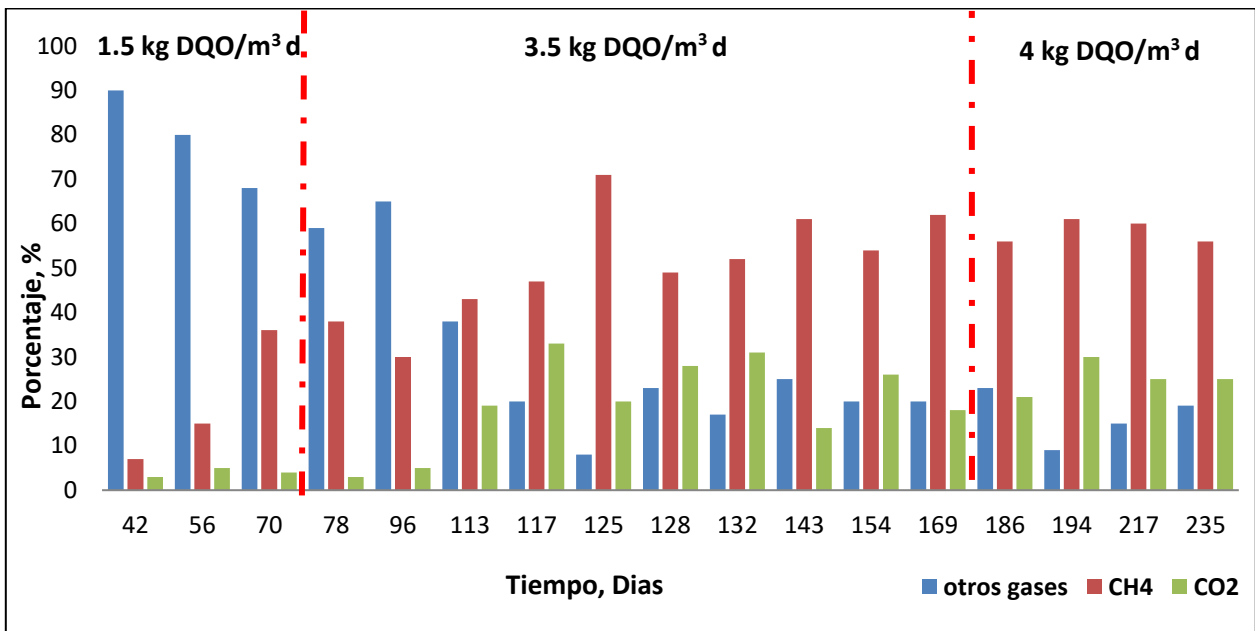


Figura 16. Porcentaje de gases en biomasa fija

4.5 Cuantificación de biogás

4.5.1 Cuantificación de la bioma granular

Para la biomasa granular (Figura 15) en la primera fase se generó biogás a partir del día 17 de 1 a 2 L por día, teniendo un total de 38 L en esta fase. Para la segunda fase la producción de biogás aumento, llegando a un total de 138 L, siendo constante y con una producción de 5 L diarios; Para la tercera fase la producción de biogás bajo a un total de 114 L, teniendo una producción baja y no continua. Para Jauregui-Jauregui *et al.*, 2014 y Hernandez-Martinez *et al.*, 2014 obtuvieron una producción de biogás de entre 6 a 10 L por día, lo cual no se logró pero si hubo una producción continua.

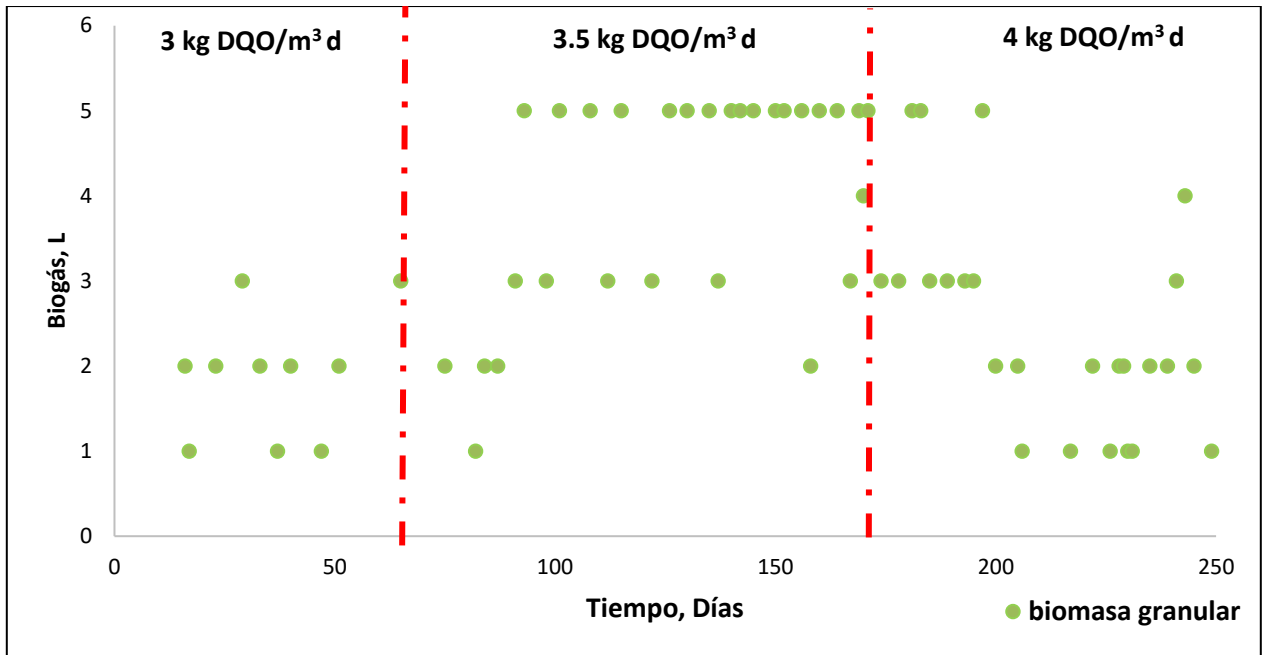


Figura 17. Cuantificación del biogás en el reactor de biomasa granular

4.5.2 Cuantificación de biomasa fija

En la figura 16, se muestra la producción del biogás generado, en la primera fase la producción de biogás comenzó a partir del día 17 de 1 a 2 L por día obteniendo un total de 23 L con una producción variable. Para la segunda fase la producción de biogás tuvo un aumento considerado teniendo hasta resultados de 5 L por día, como fueron los días 130, 148 y 152 L, también se obtuvieron resultados de 3 y 2 L por día teniendo un total de 69 L. Para la tercera fase la producción fue constante, pero no existió una producción de 5 L al día, generando un total de 78 L.

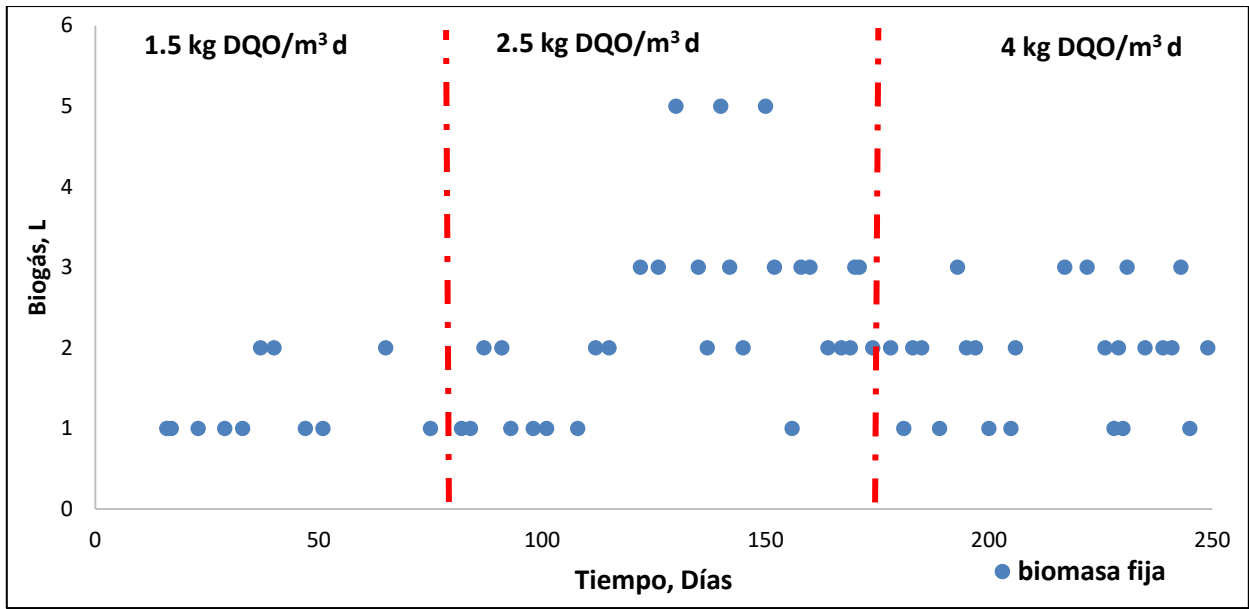


Figura 18. Cuantificación del biogás en el reactor de biomasa fija

5 Conclusiones

En la composición de biogás existió una gran diferencia desde la primera fase en ambos reactores, donde el reactor con biomasa granular presentó una mayor producción de gas metano, generando hasta un 50% mientras que el reactor de biomasa fija generó otros gases no deseados.

Para ambos reactores a partir de la segunda fase se logró una estabilidad en el proceso anaerobio con una producción de biogás constante y una remoción de la DQO del 90% siendo esta etapa como la mejor de todo el proyecto

Los parámetros de mayor importancia en un proceso anaerobio son el pH, los AGV, y la DQO, ya que son los que muestran una mayor inestabilidad, reflejándose en la producción de biogás.

El reactor de biomasa granular fue el que demostró una mayor estabilidad desde la primera fase de operación, llegando hasta un 90% en la remoción de DQO mientras que para el reactor de biomasa fija este resultado se obtuvo a partir de la segunda fase.

Es de gran importancia saber qué tipo de agua residual es la que habían tratado anteriormente cada inóculo, esto para comenzar con una COV adecuada y el proceso anaerobio trabaje de forma correcta, debido que la primera fase de aclimatación es la de mayor complejidad.

Para la tercera fase para ambos reactores llegaron a resultados similares en la remoción de DQO, con una COV equivalente, por lo cual tendría que ser necesario trabajar con 2 COV más altas y poder observar el comportamiento de ambos reactores.

6 Referencias

- Alvarez, T. P. E., y Alvarez, B. J. (2008). PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DE UN DIGESTOR ANAEROBIO TIPO HORIZONTAL. Tesis de ingeniería en control y automatización. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Análisis de agua - determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (SCFI). 2001. Norma Oficial Mexicana NOM-AA-036-SCFI, Diario Oficial de la Federación, México.
- Análisis de agua determinación de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas método de prueba parte 2 determinación del índice de la demanda química de oxígeno método de tubo sellado a pequeña escala. (SCFI). (2011). Norma Oficial Mexicana NOM-AA-030-/2 SCFI, Diario Oficial de la Federación, México.
- Análisis de agua medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba parte 1 método de reflujo abierto. (SCFI). (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-AA-030/1 -SCFI, Diario Oficial de la Federación, México.
- Appels, L., Baeyens, J., Degreéve, J., y Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 755-781. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- Arimi, M. M., Knodel, J., Kiprof, A., Namango, S. S., Zhang, Y., y Geissen, S.-U. (2015). Strategies for improvement of biohydrogen production from organic-rich wastewater: A review. *Biomass and Bioenergy*, 75: 101–118. <https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2Fj.biombioe.2015.02.011>
- Bermúdez, R. C, Rodríguez, S., Martínez, M. C., y Terry, A. I. (2003). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. *Tecnología Química* 23(2): 37-44
- Bermúdez-Savón, R. C., Hoyos-Hernández, J. A., y Rodríguez-Pérez, S. (2000). EVALUACION DE LA DISMINUCIÓN DE LA CARGA CONTAMINANTE DE LA VINAZA DE DESTILERÍA POR TRATAMIENTO ANAEROBIO. *Revista Internacional de*

- Biniyam, T. M. (2013). Sustainable production of hydrogen and chemical commodities from biodiesel waste crude glycerol and cellulose by biological and catalytic processes. Tesis de doctorado. Universitat Rovira i Virgili. Tarragona. España. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=84088&orden=1&info=link>
- Boe K. (2006). Online monitoring and control of the biogas process. Tesis de doctorado. Technical University of Denmark. Denmark. [http://www.scirp.org/\(S\(vtj3fa45qm1ean45vvffcz55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2039920](http://www.scirp.org/(S(vtj3fa45qm1ean45vvffcz55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2039920)
- Cabrera, D. A. y Díaz M. M. Á. (2013). Tratamiento de vinaza cubana en un reactor anaerobio empacado de flujo ascendente. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2): 41-49 http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S168003382013000200004&lng=es&tlng=es.
- Cabreras-Díaz, A., Urbano, Q. M., Pereda, R. I., Díaz, M. M. A., y Chávez, F. I. (2017). Digestión anaerobia de vinaza pura cubana en un sistema combinado UASB-filtro anaerobio. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38: 3-16. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300001
- Cardenas, C. G., y Robert, M. R., (2009). Evaluación de la eficiencia de reactores de lecho fijo utilizando aguas mieles residuales de trapiches artesanales. *Ciencias e Ingeniería Neogranadina*. 19: 25-38. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3223235.pdf>
- Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. (CIATEJ). (2015). Tratamiento de efluentes y aprovechamiento de residuos. La ciencia del tequila. *Logiprint Digital*. 2: 343–365. https://www.researchgate.net/publication/305993610_Tratamiento_de_Efluentes_y_Aprovechamiento_de_Residuos
- Cirne, D., van der Zew, F., Fernández, M., y Fernández, F. (2008). Control of sulphide during anaerobic treatment of S-containing wastewaters by adding limited amounts of oxygen or nitrate. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 7:93–105. DOI: 10.1007 / s11157-008-9128-9

- CONAGUA. (2015). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO, DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: Reactores anaerobios de flujo ascendente. México. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro28.pdf>
- CONAGUA. (2016). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO, DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: filtros anaerobios de flujo ascendente. México. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro29.pdf>
- CONAGUA. (2018). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: PROCESOS ANAEROBIOS. México.
- Consejo Regulador del TEQUILA. (2016). Estrategia de Sustentabilidad de la Cadena AgaveTequila.11p.https://www.crt.org.mx/images/Documentos/Estrategia_Sustentabilidad.pdf
- Constanza, C. L., Antonio, R. D. M., Bohórquez, M. J. A., y Aura, M. C. V. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. NOVA. 23:55-81. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1794-24702015000200007&script=sci_abstract&tlng=es
- CONSULTATIVE GROUP ON INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH (CGIAR); FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). (2008). Bio-fuels Research in the CGIAR: A Perspective from the Science Council. Rome, Italy: Science Council Secretariat. <http://www.fao.org/docrep/010/i0231e/i0231e00.htm>
- Cruz-salomón, A., Meza-gordillo, R., Rosales-Quintero, A., Ventura-Canseco, C., Lagunas-Rivera, S., y Carrasco-Cervantes J., (2016) biogas production from a native beverage vinzasse using a modified UASB bioreactor. FUEL.198:170-174. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.046>
- De Basurto, B. A. D. (2013). Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor anaerobio con residuos organicos generados en el Mercado Tiquipaya (Bolivia). Tesis de

maestría en ingeniería ambiental. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Prts. Barcelona. <http://hdl.handle.net/2099.1/20647>

Deublein D., y Steinhauser A. (2008). Biogas from waste and renewable resources: An Introduction. DOI: 10.1002 / 9783527621705

Durán, M., María F., Sanabria, G., Irma J., y Gutiérrez-Guzmán, N. (2015). EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE METANO EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VINAZAS PRETRATADAS CON OZONO. *Revista EIA*, (24), 167-177. Retrieved August 14, 2020, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S179412372015000200011&lng=en&tlng=es

España-Gambo, E. I., Mijagos-Cortes, J. Hernández-Zárate, G. Dominguez, J. y L. Alzate-Gaviria. (2012). Methane production by treating vinasses from hydrous ethanol using a modified UASB reactor. *Biotechnology for Biofuels*. 5:82 <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-82>

España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J., Hernández-Zarate, G., y Alzate-Gaviria, L. (2011). Vinasses: characterization and treatments. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 29(12), 1235–1250. <https://doi.org/10.1177/0734242X10387313>

Fernandez, J., Perez, M., y Romero, L. I. (2008). Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). *Bioresource Technology* 99:6075-6080. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.048>

Goel, R., Tokutomi, T., y Yasui, H. (2003). Anaerobic digestion of excess activated sludge with ozone pretreatment. *Water Science Technology*, 47:207–214. https://www.researchgate.net/publication/6247369_Anaerobic_Digestion_of_Excess_Activated_Sludge_with_Ozone_Pre-Treatment

Hernandez-Martinez, E., Puebla, H., Mendez-Acosta, H. O., y Alvarez-Ramirez, J. (2014) fractily in pH time series of continuous anaerobic bioreactors for tequila vinasses treatment. *Chemical Engineering Science* 109:17-25.

Hess, A., y Paz, M. (2017). operación de un reactor anaerobio de lecho dijo con flujo ascendente para remover azufre, nitrato y materia orgánica a través de la denitrificación

simultaneal autotrofa-heterotrofa. Tesis de ingeniero civil ambiental. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile. <http://hdl.handle.net/11673/22434>

Iñiguez, G., y Hernández, R. (2010). Estudio para la rehabilitación de una planta de tratamiento de vinazas tequileras mediante un floculante polimérico de poliacrilamida (PAM). *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(4): 299-311 http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992010000400005&lng=es&tlng=es.

Jauregui-Jauregui, J. A., Mendez-acosta, H: O., Gonzalez-Alvarez, V., Snell-Castro, R., Alcaraz-Gonzalez, V., y Godon, J.J. (2014). Anaerobic treatment of tequila vinasses under seasonal operating conditions: Start-up, normal operation and Star-up after a long stop and starvation period. *Bioresource Technology* 168 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.006>

Kalogo, Y., y Verstraete, W. (1999). Development of anaerobic sludge bed (ASB) reactor technologies for domestic wastewater treatment: motives and perspectives. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 15: 523-534. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1008950121308>

Lira-Rodriguez, M. L. (2013). Tratamiento de una vinaza tequilera empleando procesos fisicoquímicos y de oxidación avanzada. Tesis de ingeniero. Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas. Instituto Politécnico Nacional. México. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/17050/1/25-1-16653.pdf>

Lopez, V. C. M., Buitron, M. G., Garcia, A. H. y Francisco, J. C. C. (2017). Modelación Matemáticas de Biopelículas. Morgenroth, E. Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. IWA Publishing. 592.

Lopez, V. C. M., Buitron, M. G., Garcia, A. H. y Francisco, J. C. C. (2017). Reactores de biopelícula. Morgenroth, E. Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. IWA Publishing. 592.

Lopez, V. C. M., Buitron, M. G., Garcia, A. H., y Francisco, J. C. C. (2017). Desarrollo del tratamiento de aguas residuales. Henze, M., Van Loosdrecht, M.C. M., Ekama, G. A. y D. Brdjanovic. Tratamiento biológico de aguas residuales: principios, modelación y diseño. IWA Publishing. 592.

- López-Cabanes, J.M. (1989). Digestion anaerobia de lodos de depuradora. Etapas controlantes y cinética del proceso. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. San Vicente del Raspeig (Alicante), España.
- Lopez-Lopez, A. y Contreras-Ramos, S. M. (2015). Tratamiento de efluentes y aprovechamiento de residuos. Ciencia y tecnología del tequila. 2: 343-378. <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/453>
- López-López, A., Dávila. V. G., León, B. E., Villegas. G. E., y Gallardo, V. J. (2010). Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 9, 109-116. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9204-9>
- López-López, A., Davila-Vazquez, G., León-Becerril, E., Villegas-Garcia E., y Gallardo-Valdez, J. (2010). Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. *Rev Environ Sci Biotechnol* 9: 109–116. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9204-9>
- Manchado, M. C. (2010). Situación de los biocombustibles de 2° y 3° generación en américa latina y el caribe. Organización latinoamericana de energía (OLADE). Bogotá, Colombia. <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0155.pdf>
- Marino-Marmolejo, E. N., Corbalá-Robles, L., Cortez-Aguilar, R. C., Contreras-Ramos, S. M., Bolaños-Rosales, R. E., y Davila-Vazquez, G. (2015). Tequila vinasses acidogenesis in a UASB reactor with Clostridium predominance. *springerPlus*, 4, 419. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1193-2>
- Martí, O. N. (2006). Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process. Boca Raton, Florida USA. Universal-Publishers.
- Medrano, S. U. G. (2018). Modelado del comportamiento no isotérmico de un reactor anaeróbico. Tesis en ingeniero mecánico. Facultad de ingeniería, universidad nacional autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/14985/Tesis.pdf?sequence=1>
- Montalvo, S., y Guerrero, L. (2003). Tratamiento anaerobio de residuo. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

NORMA oficial mexicana NOM-001-semarnart-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NORMA Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales de alcantarillado urbano o municipal.

NORMA Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2012, Bebidas alcohólicas-Tequila-Especificaciones.

Ogejo, J. A., Wen, Z., Ignosh, J., Bendfeldt, E., y Collins, E. R. (2007). Biomethane technology. Virginia cooperative extensión 442-881.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2011. MANUAL DE BIOGAS. Santiago de Chile. <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

OZONO. Rev. EIA. 12(24): 167-177. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6069877>

Parés, R., y Juárez, A. (1997). Bioquímica de los microorganismos. Barcelona España: Reverte S.A. https://www.academia.edu/35895755/Bioquimica_de_Los_Microorganismos

Parra-Huertas, R. A. (2010). Digestión Anaerobia de Lactosuero: Efecto de Altas Cargas Puntuales. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 63: 5385-5394. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24956>

Pavlostathis, S. G. y Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: A critical review. *Critical Reviews in Environmental Control*, 21:5-6, 411-490. <http://dx.doi.org/10.1080/10643389109388424>

Peña, L. B. (2012). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL RASTRO MUNICIPAL DE CUERNAVA MEDIANTE UN SISTEMA ACOPLADO ANAEROBIO-AEROBIO CON AIREACIÓN INTERMITENTE. Tesis de maestro en ingeniería. Facultad de ingeniería campus Morelos, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5060/tesis.pdf?sequence=1>

- Reith, J.H., den-Uil H., van-Veen, H., de Laat W.T.A.M., Niessen, J.J., de Jong, E., Elbersen, H.W., Weusthuis, R., van-Dijken, J. P., y Raamsdonk, L. (2002). Co-Production of Bio-Ethanol, Electricity and Heat from Biomass Residues. The First European Conference on Agriculture & Renewable Energy. Amsterdam, The Netherlands.
- Retes, P. J. L. (2014). BIORREMEDIACIÓN DE VINAZAS DE LA INDUSTRIA TEQUILERA Y MEZCALERA MEDIANTE TRATAMIENTO FISCOQUIMICO Y BIOLOGICO. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Aguascalientes. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/11317/1089/387365.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rincón, S. A. (2007). Análisis y control de un reactor de lecho fijo anaerobio de flujo ascendente en un esquema de reacción en dos etapas. Tesis de maestría en automatización industrial. Facultad de ingeniería y arquitectura, departamento de electricidad, electrónica y computación Manizales, Colombia. <https://core.ac.uk/download/pdf/11052422.pdf>
- Ríos-Gutiérrez, M. P., Pelayo, O. C., Gonzalez, A. V., Corona, G. R. I., y Gutierrez, L. E. D. (2005). Tratamiento de vinazas tequileras con bacterias anaerobias. Guadalajara, Jalisco.
- Rivera, A., González, J., Castro, R., Guerrero, B., y Nieves, G. (2002). TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE DESTILERÍA EN UN FILTRO ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 18:131-137 <<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/25257>>.
- Robles-González, V., Galíndez-Mayer, J., Rinderknecht-Seijas, N., y Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of biotechnology*, 157(4), 524-546.
- Rodríguez, C. E., Gamboa, C. M. del M., Hernández H. F. (2005). Bacteriología General: Principios Y Prácticas de Laboratorio. MONTES DE OCA, Costa Rica: Editorial Universidad de Costa Rica.
- Sandoval, R. M. E. (2015). Tratamiento de vinazas provenientes de etanol en un reactor de lecho fluidizado inverso. Tesis Doctoral. Escuela técnica superior de ingenieros de

caminos, canales y puertos. Universidad politécnica de Madrid. Madrid.
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.40681>

Sosa, V. C. A. (2013). Aplicación de un tratamiento biológico a las aguas residuales provenientes de una destilería de alcohol de caña, utilizando un reactor UASB. Escuela Técnica superior de Ingenieros, Caminos, Canales y Puertos. Tesis de doctorado. Universidad politécnica de Madrid. Madrid. <http://oa.upm.es/14797/>

Sosa, V. C. A., Aurelio, H. L., y Eric, P. Hourbron. (2012). *Tratamiento de vinazas de alcohol de caña en un reactor UASB*. "Tecno ambiente: Revista profesional de tecnología y equipamiento de ingeniería ambiental", 22 (232); pp. 42-48. ISSN 1133-4665

Sosnowki, P. A., Wieczorek, S., y Ledakowicz, S. (2002). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and anaerobic fraction of MSWs. *ADVANCE environmental Research*, 7, 609-616.

Speece, R. E. (1996). "Anaerobic Biotechnology for industrial Waste Water", Archae Press, Tennessee, Estados Unidos.

Tejerina, W. A., Farfan, R. del C., y Cuevas, C. M. (2007). Efectos del amoniaco, sulfuro y taninos sobre la actividad anaerobico. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 11, 23-28. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/92915>

Terry, B. A., Boizán, M. F., y Almeida, D. Z. (2008). Consideraciones generales para el desarrollo de una estrategia de granulación en reactores uasb. *tecnología química*. 28:70-79. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=4455/445543755009>

Urbano, Q. M. (2017). Digestión anaerobia de vinaza pura cubana en sistema UASB-Filtro Anaerobio. Tesis de Ingeniería Ambiental. Universidad Tecnológica de la Habana. Facultad de Ingeniería Química. La Haba. Cuba.

Vadlani, PV., y Ramachandran, KB. (2008). Evaluation of UASB reactor performance during start-up operation using synthetic mixed-acid waste. *Bioresource Technol*, 99:8231–8236. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.03.011>

- Valenzuela, Z. A. G., y Marie, S. G. (2009). "la expansión tequilera y las mujeres en la industria: del símbolo al testimonio" Revista Sociedad Rural, Producción y Medio Ambiente. 9(18), 167-195. <https://biblat.unam.mx/en/revista/sociedades-rurales-produccion-y-medio-ambiente/articulo/la-expansion-tequilera-y-las-mujeres-en-la-industria-del-simbolo-al-testimonio>
- Wang, S., Fang, M., Weiwei, M., Guang, Z., y Xiaofei, L. (2018). Influence of Temperature on Biogas Production Efficiency and Microbial Community in a Two-Phase Anaerobic Digestion System. MDPI. 11:133. <https://doi.org/10.3390/w11010133>
- Wolmarans, B., y de Villiers G. H. (2002). Start-Up a UASB effluent treatment on distillery wastewater. Water Utilisation Division. DEpartament Chemical Engineering, University of Pretoria. 28:63-68. <https://doi.org/10.4314/wsa.v28i1.4869>
- Young, J, C. (1991). Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters. Water Science and Technology. 24(8): 133-155. <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0222>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES

Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

EL Jicarero, Jojutla, Morelos, 03 de Noviembre 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. Erick Gibran Chit Pantoja**, con el título del trabajo: **“Producción de biogás a partir de vinaza tequilera utilizando reactores anaerobios de biomasa granular y fija”**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

I.B.Q. María de los Ángeles Núñez Puente



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MARIA DE LOS ANGELES NUÑEZ PUENTE | Fecha:2020-11-03 18:43:50 | Firmante

BwyYW+B7dB46N4pTSnLVxOCyxG4Ze0VVlmsnhjK4YAENaJmzd5ThCz+Vn7ROhOJ2milbQhSF9V1aP8n9qSC8kFUiPqw8sMTjt3g7YqZDKyUFw4pwU/GwOC0Re7DuLbyCp1kKokukiFmqaa+A+7ITVEkbnjqZpCJ79E5BgJMZLE2vqtx1M2jfWdBMsbvdKYg5QUGmrub4uoYjibAopObZ0gd0x1Y9skuMgqKSxRBAWkxAjoe8H0nOGZ460n/SSan5mFLOybCnlq/QEjcejFZpaANKMHZa1SLcpBnfvMHv/MxIEESpOZYsUDR7eLCnNWIQtf8VfZXYSj/yjMNALinA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



x0ne1d

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ISrMBKKxRv7bmJyuv142bxBN5yE9nM23>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES

Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

EL Jicarero, Jojutla, Morelos, 03 de Noviembre 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. Erick Gibran Chit Pantoja**, con el título del trabajo: **“Producción de biogás a partir de vinaza tequilera utilizando reactores anaerobios de biomasa granular y fija”**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

Ing. Jorge Aurelio Manzo Espín



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JORGE AURELIO MANZO ESPIN | Fecha:2020-11-04 09:44:48 | Firmante

tImzAQ+iJErMh3Y4pVyw6x6kEWAYwAe2wZA/RuDqVZ+UWn5yFZBcOF7b2w9fAsDf5P6Hp+xtw/1jJUstjOQ/3Xe1zljC1wamCD0lr7R.Jixa/astLrPaFVnefa1ySqB8UDprEdN4oJjVSfvkJZ28WjGhPAiOt3aVELisQwP/q8oOHzznSejy9ngtNesz8goeGjuWgaiDQIg0ZuaxWkSm24MnNkY0RXL0S5/4sCBzYBdGFwDVLsUqfFoG14B50GMXBxtwatgy7U24CD4JToxU7tUxjL2CaMzmcR7R06TqzQN1Diog0v8dwNMPc+LmUpeVDNEn1xSU+Pp1A47uZsEpVKA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[Tdc6IE](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/2q8kyYrvSEzHrFiPP3NRUE1vRwyJ47hJ>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES

Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

EL Jicarero, Jojutla, Morelos, 03 de Noviembre 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. Erick Gibran Chit Pantoja**, con el título del trabajo: **“Producción de biogás a partir de vinaza tequilera utilizando reactores anaerobios de biomasa granular y fija”**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

Dra. Tania Gutiérrez Macías



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

TANIA GUTIERREZ MACIAS | Fecha:2020-11-03 11:39:04 | Firmante

cjg02YTKkXk4aB+pHppK7ZS75E+JMXj5Kn2CQHlg1wa89eMe+3Cg2U5IPAMCkJJ9aLsLTxjCdYEKsBaOTiCeaB1C3Likvc9hFBgtRrD4v+Ezm+BUIpHDWutdF+0JP9Hfrlh/Tk6xNupoZelHX0j/YcFTKshhj/rWf1BTTzccw7fq3zw5OnxsipEYU4iBr9zzppyOuBuyvZZxnrPH6Vm8TBjCLdtoQTQX0AUNQZ7UTebM7W4TKK9itU1JExZyjNuMg1RLe1R/SEEPsSBEB7nQoSD/zm45mOeNNMAI+DEesU34ZG6IEg9FOximxCG+cx4sm8uUdlU6oxW6W64g==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[jxkGIZ](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/0zAQwyRTGrCxsLKbj7NfQ4hbpeKaU2o0>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES

Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

EL Jicarero, Jojutla, Morelos, 03 de Noviembre 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. Erick Gibran Chit Pantoja**, con el título del trabajo: **“Producción de biogás a partir de vinaza tequilera utilizando reactores anaerobios de biomasa granular y fija”**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

Dr. Juan Manuel Rivas González



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JUAN MANUEL RIVAS GONZALEZ | Fecha:2020-11-03 11:57:20 | Firmante

DIKhlFWhdeK6yTv/zZlQ2eCMqwtshJINu0FVXnZV8d2pucN5ixbHkyVJV9AzqrxXm8Akg9GneNa4T9khZF94brZ74l8q+RxKLug3sWbreERBLCEX2gfpblHvo4dACBzZNYUUVKT
wcBVb6BskTU/rd5YLSpx03Zabp2Lu4Xg1islwa1jpa2DX2TiyrlJLkL7fhG064NALqsSyNp4bACnEnSRyXXa1edH/TnViaP1m+0kAAf2vDCBofv07Y6yU697fBYXRICORkUibHMB7Y
Ja3FYya+h8IUgJeTAEhHkyBVO3ic1Obw9J0pHg6N95ogFexS19u8zXulE5s9cdLJIEA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



OcYF8r

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/1DDKrWNZpkEuFXCCGEo6CUVspfDTixPB>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



DIRECCIÓN DE ESTUDIOS SUPERIORES

Escuela de Estudios Superiores del Jicarero

EL Jicarero, Jojutla, Morelos, 03 de Noviembre 2020

DRA. DULCE MARÍA ARIAS ATAIDE
DIRECTORA GENERAL DE SERVICIOS ESCOLARES
PRESENTE.

Por este conducto comunico a Usted, que he revisado el documento que presenta el Pasante de Licenciado en Ciencias Ambientales: **C. Erick Gibran Chit Pantoja**, con el título del trabajo: **“Producción de biogás a partir de vinaza tequilera utilizando reactores anaerobios de biomasa granular y fija”**.

En calidad de miembro de la comisión revisora, expreso la siguiente decisión:

VOTO A FAVOR: SI

VOTO EN CONTRA: _____

NECESITA ARREGLAR O ELIMINAR ALGO: _____

COMENTARIOS: _____

ATENTAMENTE

M. en C. Humberto Flores Bustamante



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

HUMBERTO FLORES BUSTAMANTE | Fecha:2020-11-04 10:34:33 | Firmante

kWmtmz/Th+Ji7sWqS97nY+bEgSkI+/9KgdadOqkX/hbbnca8iY9cwX4Q24RZdF6zAWn+ZnH77p6XfCdIByEWi0aACidzQUL2OcnXNoZtlbQf7DD1wf7GxYHAozOJdztJUgaqenpEZ+IANu02amWY6PbhmAUFxwAQ13wihKhVH8G0PybgIwe7eOagDBBtFQrl2fXwE95kSCgJh0dOxudS+Wx58rRG9B7rccNtdKXeh/S7zPTkhH8xB4CkNswAqanOdrsiqP8fhuTDHp6F8fHMExgtwcLzsyTiDTETwi/dv8GO8UoJdMD2vYL1VMLKLokHCjCR/LhzrE7fbyd0eQMx5A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[HcYMNO](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/HMzRrjfKZlemStK9o689gPV7kSjXbOGI>

