

Evaluación escala laboratorio de la producción de metano a partir del agua miel del café

Laboratory scale evaluation of the methane production from the coffee wastewater

Viviana Emilce Pinza Ch ¹.

Diana Carolina Morales P ².

¹ Egresada de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Nariño, San Juan de Pasto, Colombia, vivi-0781@hotmail.com

² Universidad de Nariño, Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, diana.morales.p@gmail.com

Resumen

Las aguas miel del café son efluentes del beneficio húmedo de café, su vertimiento directo al medio ocasiona impactos negativos principalmente en el recurso hídrico. El sector cafetero trabaja en reinsertar este subproducto al proceso productivo y como alternativa, esta investigación evaluó a escala laboratorio la producción de metano a partir de las aguas miel del café (AMC). Las AMC resultan ser biodegradables debido a sus propiedades fisicoquímicas, su transformación a metano resulta al ser sometidas a tratamiento biológico mediante digestión anaerobia. El montaje experimental corresponde a un Biodigestor de flujo semicontinuo, en el cual se da seguimiento a la aclimatación y arranque del proceso anaerobio, la mezcla monitoreada correspondió a AMC y lodos de laguna anaerobia como inóculo. Se realizó seguimiento diario a las variables de monitoreo: alcalinidad, pH, temperatura, ácidos grasos volátiles (AGV) y producción de metano. De acuerdo a los resultados, se concluye que en el beneficio de café, el agua de primer lavado concentra la mayor cantidad de sólidos, correspondientes a los componentes del mucílago de café, también, el contenido orgánico poseído por las AMC es biodegradable y son aguas ácidas, característica asociada a la concentración de AGV, por tanto, fue necesario acondicionar su pH con una sustancia alcalinizante, igualmente, se determinó que la producción de metano dependió en primer orden del comportamiento de los AGV, seguido de la capacidad neutralizante otorgada por la alcalinidad del medio, seguido de la variación de pH y finalmente del comportamiento de la temperatura.

Palabras clave: Anaerobio, biogás, metanogénesis, mucílago.

Abstract

The coffee wastewater are effluents from the humid coffee benefit, their direct discharge to the environment causes negative impacts mainly in the water resource. The coffee sector works to reinsert this by-product into the production process and, as an alternative, this research evaluated on a laboratory scale the production of methane from coffee honey waters (AMC). AMC turns out to be biodegradable due to its physicochemical properties, its transformation to methane results when subjected to biological treatment by anaerobic digestion. The experimental assembly corresponds to a semi-continuous flow Biodigester, in which the acclimation and start of the anaerobic process is monitored, the monitored mixture corresponded to AMC and anaerobic lagoon sludge as inoculum. Daily monitoring of the monitoring variables was carried out: alkalinity, pH, temperature, volatile fatty acids (VFA) and methane production. According to the results, it is concluded that in the benefit, the water of first wash concentrates the greater amount of solids, corresponding to the components of the mucilage of coffee, also, that the organic content possessed by the AMC is biodegradable and that they are waters acid, characteristic associated to the concentration of AGV, therefore, it was necessary to condition its pH with an alkalizing substance, also, it was determined that the production of methane depended in first order on the behavior of the AGV, followed by the neutralizing capacity granted by the alkalinity of the medium, followed by the pH variation and finally the behavior of the temperature.

Keywords: Anaerobic, biogas, methanogenesis, mucilage.

Introducción

Las aguas miel del café (AMC) son efluentes del proceso de despulpado y lavado del café, generados en gran cantidad, (4.7 l/Kg Café Pergamino Seco (c.p.s)) Morales (2016), el vertimiento puntual de estas aguas residuales a cuerpos de agua provoca deterioro a los ecosistemas, Puerta & Rodríguez (1997), por ser las AMC ácidas y contener materia orgánica, Montero *et al.*, (2009). En los últimos años, estos subproductos son objeto de investigación para la generación de energías renovables, Cerdá (2018). El sector cafetero tiene la misión de generar alternativas que aseguren el bienestar del caficultor colombiano, inmerso a ello, la Política de Producción Más Limpia colombiana orienta a este sector a reducir los impactos negativos que se presentan en el ciclo de producción del café, Cenicafé (2016).

Las AMC son de rápida biodegradación debido a la gran concentración de compuestos orgánicos que conforman el mucílago, Cenicafé (2011), una de las capas que forman el grano de café cereza, esta capa de mucílago es viscosa, compuesta por pectina, ácidos volátiles como acético, láctico, propiónico y carbohidratos, Quintero & Ríos (2011), el alto contenido orgánico de las AMC llega a cifras de 70.400 mg O₂/L en términos de demanda química de oxígeno y registra una acidez de 3 unidades en la escala de pH, Morales & Mejía (2015).

Mediante la relación entre los valores de demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO₅) de la AMC, Von Sperling, (2012) sustenta que este tipo de aguas residuales deben tratarse por procesos biológicos. El tratamiento biológico a estos efluentes generalmente se realiza a través del proceso de digestión anaerobia, un proceso que permite adquirir subproductos de valor agregado, como el biogás uno de ellos, Parra *et al.* (2014) este biogás es una mezcla de otros gases, principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S) en poca proporción, Balseca & Cabrera (2011), sin embargo, es la presencia mayoritaria de metano la que convierte a este biogás en combustible, FAO (2011).

La digestión anaerobia es el proceso que en ausencia de oxígeno y acción de microorganismos degrada los compuestos orgánicos, el desarrollo de este proceso se explica brevemente en cuatro etapas:

Hidrólisis - etapa 1. La materia orgánica biodegradable está conformada por compuestos orgánicos complejos como grasas, proteínas, carbohidratos y celulosa, los microorganismos los desdoblan enzimáticamente transformándolos en aminoácidos, azúcares menores y ácidos grasos de cadena larga, Chernicharo (2007).

Acidogénesis - etapa 2. Los productos solubles provenientes de la hidrólisis son metabolizados nuevamente por los microorganismos acidogénicos en compuestos más simples como ácidos acético, propiónico y butírico, acetona, dióxido de carbono e hidrógeno, Chernicharo (2007).

Acetogénesis - etapa 3. Los microorganismos acetogénicos oxidan compuestos orgánicos intermedios como el propionato y el butirato en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono, como sustrato apropiado para los microorganismos metanogénicos, Chernicharo (2007).

Metanogénesis (Formación de metano)- etapa 4. Es la etapa más sensible de la digestión anaerobia, el acetato es el sustrato de consumo más importante para los microorganismos metanogénicos, quienes tienen crecimiento inferior a los microorganismos hidrolíticos y acidogénicos. Es la etapa final de transformación de compuestos orgánicos complejos en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), Chernicharo (2007).

Condiciones ambientales de la digestión anaerobia. La digestión anaerobia es susceptible al control de condiciones ambientales, puesto que existe interacción con microorganismos, Chernicharo (2007), a continuación, se argumenta los principales requisitos ambientales oportunos para el desarrollo de la digestión anaerobia.

La nutrición de la comunidad microbiológica anaerobia es muy importante, Chernicharo (1997) propone una relación nutricional óptima entre la DQO, el nitrógeno y el fósforo igual a 1000:5:1 respectivamente.

Controlar la capacidad de un agua residual para neutralizar ácidos y controlar acidez es importante para mantener a los microorganismos en su ambiente ideal, el pH óptimo para su desarrollo corresponde al rango de 6.8 a 7.4, siendo el pH neutro el ideal, FAO (2011). El control de esta capacidad en el agua se logra a través de la alcalinidad que es la propiedad que soporta la acidificación sin disminuir el pH, Goyenola (2007), propiedad se recomienda mantener en un

rango entre 1500 y 7500mg/L CaCO₃ durante periodo de arranque, Castillo *et al.* (2007) siendo primordial verificar siempre su estado, Pérez & Torres (2011).

Aguas residuales como las AMC poseen nivel de acidez correspondientes a 3 unidades de pH, Morales (2016), por lo que autores como Casanova (2017), recomiendan la adición de sustancias alcalinizantes que proporcionan neutralizar el pH de las aguas y proporcionan resistencia a cambios repentinos de pH, esta propiedad atribuida a la adición de la sustancia alcalinizante se conoce como capacidad tampón o buffer, Casanova (2017). Por otra parte, los ácidos grasos volátiles AGV (Acético, Propiónico y Butírico) producidos en la etapa de acidogénesis, son precursores de la metanogénesis y un desequilibrio cinético entre su producción y consumo causa descenso de pH y posteriormente acidificación en el sistema anaerobio, Rojas (2006), igualmente, la digestión anaerobia operando con un pH menor a 6.5 produce biogás con bajo contenido de metano, Chernicharo (2007).

También, la temperatura es el factor que ha de afectar el crecimiento de los microorganismos, existen tres rangos asociados al crecimiento microbiológico y la velocidad metabólica, el rango psicrófilico entre 4 y 15°C, el rango mesófilo entre 20 y 40°C y el rango termófilo entre 45 y 70°C, Chernicharo (2007), siendo los microorganismos más activos en un rango mesófilo entre 25 y 40 °C, Puebla (2012). La variación de temperatura no debe exceder los 0,6 y 1,2°C/día, FAO (2011).

Metodología

El montaje experimental se realizó en el laboratorio de Calidad de Aguas de la Universidad de Nariño (coordenadas 1°14'03"LN y 77°17'07"LO), con 13°C de temperatura. Las AMC, materia prima de esta investigación fueron provenientes de la finca El Guayacán, ubicada en la vereda San Rafael en el Municipio de San Lorenzo, al nororiente del Departamento de Nariño, la finca se encuentra a 2150 m.s.n.m. y una temperatura promedio de 17°C.

El objetivo de la presente investigación fue evaluar a escala laboratorio la producción de metano a partir de las AMC, el montaje fue evaluado en etapa de arranque, la Figura 1 muestra el diseño y la ruta metodológica adaptada para cumplir el objetivo de la presente investigación.

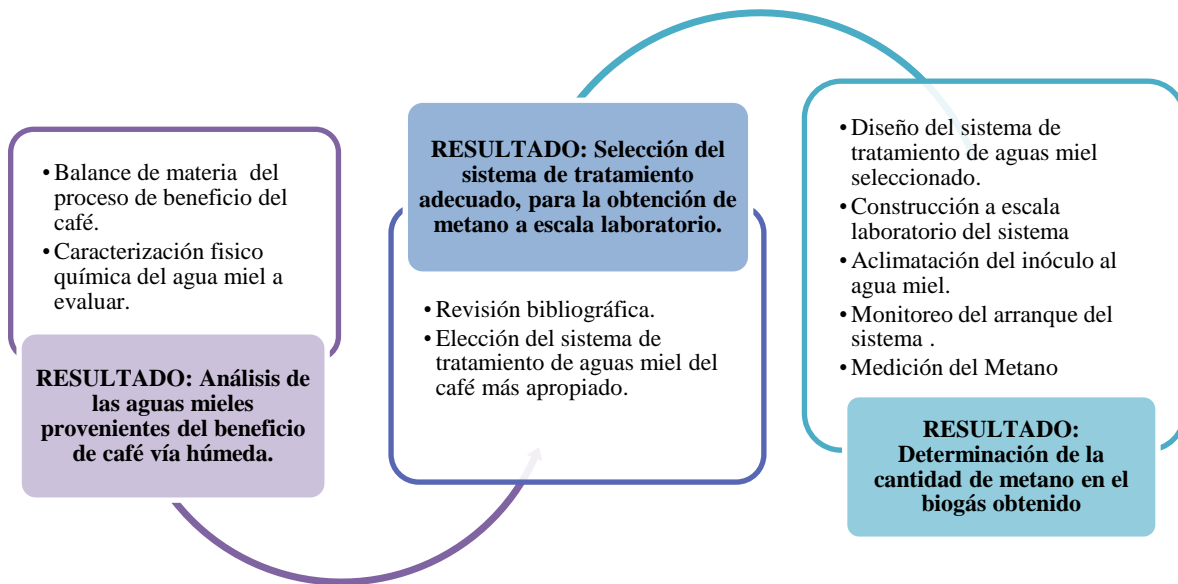


Figura . Ruta metodológica de la presente investigación.

Análisis de las aguas mieles provenientes del beneficio de café vía húmeda. Inicialmente, se realizó un balance de materia sugerido por Morales (2016) para conocer la cantidad de aguas miel generadas en el proceso de lavado tradicional del café, se realizó un esquema de balance de materia con porcentajes correspondientes a: peso entrada café cereza, peso café despulpado, cantidad de pulpa, volumen de agua en primer lavado, peso del café seco y humedad pérdida.

Se identificó las propiedades fisicoquímicas de las AMC con ayuda del Laboratorio Especializado de la Universidad de Nariño, con el fin de conocer el índice de contaminación de las AMC correspondientes a DQO, también, se determinó valores de alcalinidad, presencia de fósforo y nitrógeno. La identificación de datos se realiza con métodos estandarizados, empleados en laboratorios especializados.

Von Sperling, (2012) sugiere el cálculo de la relación entre los valores de DQO y DBO₅ para priorizar el tipo de tratamiento de estas aguas residuales, en vista al tipo de tratamiento empleado, en cuanto a requerimientos nutricionales, Chernicharo (2007) recomienda tener en cuenta la relación DQO:N:P correspondiente a 1000:5:1 para mejorar el desarrollo de la comunidad microbiológica.

Selección del sistema de tratamiento adecuado, para la obtención de metano a escala laboratorio. La selección del sistema de tratamiento para transformación de las AMC en metano se realizó mediante la metodología propuesta por Bernal *et al.*, (2018), inicialmente, se realizó una revisión del estado del arte de otras experiencias en la obtención de subproductos como el biogás.

Posteriormente, los sistemas de tratamiento sobresalientes en el éxito de tratar este tipo de aguas residuales y obtención de subproductos, fueron considerados en una Tabla de ponderación recomendado por Morales (2016), esta Tabla relacionó cada sistema de tratamiento sobresaliente con aspectos relacionados al diseño y montaje del mismo como fueron: área de construcción, carga orgánica volumétrica, caudal de manejo, tiempo de retención hidráulica, control de las etapas del tratamiento y adaptación a las características físicas de las aguas miel, estos aspectos fueron resultado igualmente de la revisión al estado del arte que se realizó.

La Tabla 1 indica el desarrollo de la ponderación, asignando valores del 1 al 3, donde 1 indicó menor ventaja y 3 la mayor ventaja, con base al aspecto relacionado, finalmente, se realizó una suma horizontal de los valores asignados, siendo el sistema seleccionado el de mayor ponderación.

Tabla . Ponderación para selección del sistema de tratamiento.

Sistemas de tratamiento a considerar	Aspectos tenidos en cuenta para el diseño y montaje				Suma
	A	B	C	... (n)	
Tecnología 1	—————→				
Tecnología 2	—————→				
Tecnología 3	—————→				

Diseño y Montaje del nuevo sistema de tratamiento. El diseño se realizó teniendo en cuenta las recomendaciones propuestas por Balseca & Cabrera (2011) y Rodríguez (2003), quienes consideraron principalmente la aclimatación del nuevo sistema de tratamiento y el tiempo de retención hidráulica prolongados. El montaje se realizó a escala laboratorio, igualmente, se realiza pruebas de fugaz de líquidos y gases al sistema de tratamiento.

Aclimatación del nuevo sistema de tratamiento. El proceso de aclimatación del nuevo sistema de tratamiento se realizó mediante las metodologías propuestas por Casanova (2017) Al ser un nuevo sistema de tratamiento fue importante adquirir un inóculo, el conjunto de microorganismos encargados del metabolismo de las AMC, estos fueron lodos provenientes de la sedimentación de la laguna anaerobia de la empresa Frigorífico Jongovito S.A Frigovito S.A ubicada en el Municipio de Pasto, la laguna trata aguas residuales de matadero con 600 mg/L de DQO aproximadamente operando a 13°C temperatura promedio de Pasto.

Los lodos fueron sometidos a un proceso de aclimatación en condiciones anaerobias utilizando AMC como sustrato. El sistema fue encerrado dentro de una estructura tipo invernadero, como una medida para mantener la temperatura en el rango de 25 a 40°C para el proceso de tratamiento, Puebla (2012).

Debido a algunas características de las AMC que proporcionaban desventaja al tratamiento, estas propiedades fueron reajustadas con ayuda de sustancias alcalinizantes como bicarbonato de sodio (NaHCO_3) según recomendaciones de Casanova (2017).

Posteriormente, se realizó la alimentación del sistema con las AMC y los lodos adquiridos en un 90% dejando un 10% para almacenamiento de biogás, la proporción de los lodos fue de 30% (inóculo), aceptable por Casanova (2017). La mezcla fue dejada en reposo por una semana según recomienda Casanova (2017).

Arranque del sistema de tratamiento (reactor anaerobio). El arranque de un nuevo sistema de tratamiento implica hacer seguimiento al comportamiento de variables de control, Casanova (2017). Las variables de control que facilitaron el desarrollo del proceso de tratamiento fueron: temperatura, pH, producción de AGV, alcalinidad y producción de metano, estas variables se siguieron diariamente con la ayuda de técnicas de titulación para el registro de la alcalinidad y producción de AGV mediante guías empleadas en el laboratorio de la Universidad Autónoma de Nariño.

El registro de pH se realizó mediante el método normalizado de la APHA-AWWA-WPFC, por inmersión del electrodo de pH en la muestra, mediante la técnica de medida potenciométrica utilizando un pHmetro de sobremesa “Probador impermeable Hanna”, dotado de un electrodo de vidrio de diafragma cerámico y sistema de referencia que también facilitó la medición de

temperatura. La Tabla 2 muestra la frecuencia de seguimiento a las variables de control, método y unidades de medición.

Tabla . Frecuencia de seguimiento de los parámetros de monitoreo.

Parámetro	Unidades de medición	Técnica o equipo de medición	Frecuencia de medición
pH	1-14	Probador impermeable Hanna pHep®4	Diario
Temperatura	°C		Diario
ÁGV	meq/L	Titulación	Diario
Alcalinidad	mlCaCO ₃ /l	Titulación	Diario

Determinación de metano presente en el biogás generado. Para la captación del biogás generado se adhiere a la manguera una válvula cheque que impide el retorno del biogás al reactor. La cuantificación del metano generado se realiza con la ayuda del dispositivo Gas Leak Detector SPD203 con un rango de error $\pm 2\%$, este equipo detecta fugaz de gas metano por medio de un sensor electroquímico por contacto directo, otorgando el valor en unidades de partes por millón.

Los datos registrados fueron analizados con el método estadístico de correlación, mediante el coeficiente de Spearman con ayuda del software Statgraphics, versión actualizada. El análisis permitió conocer la relación existente entre la producción de metano y el comportamiento de las variables de control: temperatura, pH, alcalinidad y AGV.

Resultados y discusión.

Análisis de las propiedades de fisicoquímicas de las aguas miel de café provenientes de la finca El Guayacán, Municipio de San Lorenzo, Nariño. El balance de materia mostrado en la Figura 2, indicó que de los tres lavados que se realizan en total en la finca El Guayacán, las AMC generadas en el primer lavado se componen de 91,5% de agua y 8,5% de mucílago, valor menor al reportado por Quintero & Ríos (2011) donde el promedio en peso de mucílago es

10,4% siendo así, que su variación está debida a las condiciones climáticas de la finca, en especial la altitud, Pabón (2012).

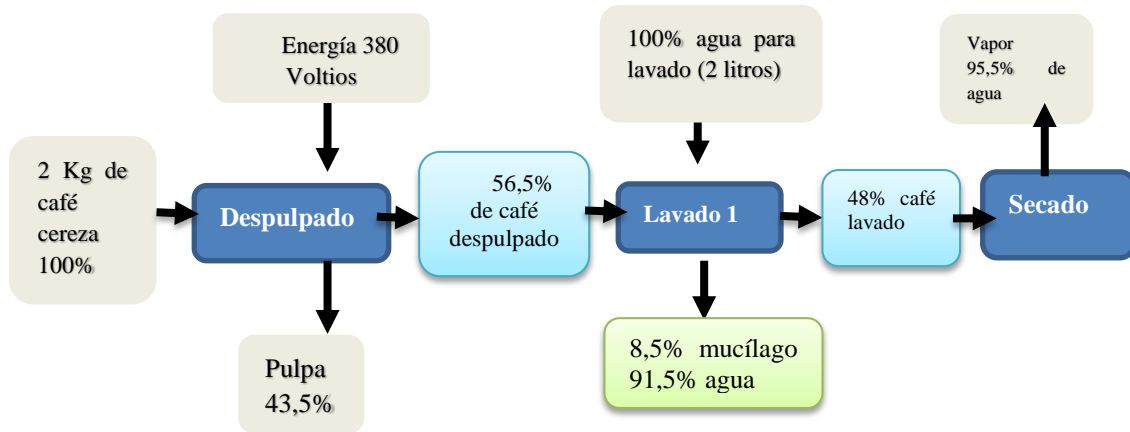


Figura . Balance de Materia en el beneficio húmedo del café.

La Figura 3 indica los efluentes del AMC de los tres lavados, las AMC de primer lavado muestran a simple vista la mayor concentración de sólidos.



Figura . Aguas miel de café resultado de tres lavadas.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expide la Resolución 631 de 2015, norma colombiana en vertimiento puntual de aguas residuales a cuerpos de agua y alcantarillado, las características fisicoquímicas de las AMC de primer lavado sobrepasaron los valores límite máximo de vertimiento estipulados en el artículo 9 de esta norma, razón por la que se debe otorgar un tratamiento para reducir los índices de contaminación de estas aguas residuales (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación con los valores límite máximo de vertimiento exigidos en la norma colombiana.

Parámetro	Valores límite máximo permisibles(Beneficio de café Resolución 631/2015 Art. 9)	Resultados investigación	Cumple
pH	5,00 – 9,00	3,3	NO
Demanda química de Oxígeno (DQO)	650 mg/L O ₂	35.295,75mg/L O ₂	NO
Sólidos suspendidos totales (SST)	400 mg/L	3.850mg/L	NO
Fósforo total (P) mg/L	Análisis y reporte	<23,12 mg P-PO ₄ / L	-
Nitrógeno (N) mg/L	Análisis y reporte	211,53 mg N/L	-

Las AMC se clasificaron como aguas residuales ácidas, con un pH de 3.3 unidades. Según Puebla (2012) el mucílago fermentado tiene un pH entre 3.7 y 4.1 y las aguas de primer lavado son vertidas con un pH promedio de 3.7, Morales (2016), debido a la acidificación del mucílago durante su fermentación natural, Puebla (2012).

En términos de DBO₅ y DQO, las AMC de primer lavado concentran más cantidad de mucílago, Morales (2016). La relación DQO/ DBO₅ propuesta por Von Sperling (2012) determina la biodegradabilidad de una fracción si es menor a 2,5, siendo lo más apropiado someter dicha fracción a tratamiento biológico.

La Tabla 4 muestra valores de DQO y DBO₅ determinados en las AMC de primer lavado de algunas fincas de Nariño. Claramente se observa que las AMC son aguas residuales que deben someterse a tratamiento biológico según la relación DQO/ DBO₅, optándose por el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 4. Caracterización de DBO₅ y DQO de AMC de primer lavado en fincas cafeteras, Morales (2016).

Finca Nariñense	DQO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	DQO/DBO ₅ Von Sperling, (2012)
El Placer	41099	24414	1,68
La Casa	95699	43459	2,2
El Vergel	17912	9511	1,8
El Guayacán	24233	22275	1,08

En cuanto al requerimiento nutricional implicado en el éxito del proceso de digestión anaerobia, la proporción de nutrientes sugerida por Chernicharo (2007) relación DQO:N:P igual a 1000:5:1 mostrada en la Tabla 5. Las AMC indicaron solamente carencia de fósforo, siendo compensada con los miligramos faltantes, Chernicharo (2007)

Tabla 5. Comparación propiedades nutricionales del AMC y relación sugerida por Chernicharo (2007).

Resultados de AMC evaluadas			Requerimientos nutricionales ideales según Chernicharo (2007). DQO:N:P Relación 1000:5:1		
DQO	N	P	DQO	N	P
35295,75 mg/L O ₂	211,53 mg N/L	23,12 mg P-PO ₄ /L	35295,75 mg/L O ₂	<u>176,48</u> mg N/L	<u>35,29</u> mg P- PO ₄ /L

4.2 Selección del sistema de tratamiento escala laboratorio para obtención de metano.

Siendo el proceso de digestión anaerobia el más adecuado para el tratamiento de las AMC y su posterior conversión a metano, Lorenzo & Obaya (2005), la revisión al estado del arte resaltó 3 sistemas de tratamiento anaerobio: Reactor anaerobio Flujo Pistón (RAP), Sistema Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) en fases separadas y Biodigestor de flujo semicontinuo. La Tabla 6 muestra la ponderación asignada a cada sistema de tratamiento anaerobio de acuerdo a aspectos que otorgaban ventaja, que también fueron tenidos en cuenta en otras investigaciones, Puebla (2012), Morales (2016) y Casanova (2017).

Tabla 6. Selección del Sistema de tratamiento anaerobio, Morales (2016)

Sistemas de tratamiento a considerar	Aspectos a evaluar (parámetros tenidos en cuenta para el diseño real del sistema)						Suma
	Área de construcción	Caudal de fácil manejo	Carga orgánica volumétrica (kgDQO/m ³ /)	Tiempo de retención hidráulico	Control de las etapas anaerobias	Fácil operación	
1. Biodigestor de flujo semicontinuo	2	3	1	3	1	3	13
2. Sistema Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) en fases separadas	1	1	1	1	3	1	8
3. Reactor anaerobio Flujo Pistón (RAP)	1	2	2	1	2	2	10

Finalmente, se eligió el Biodigestor de flujo semicontinuo, un sistema de fácil manipulación, seguimiento y operación, no contó con sistema de agitación lo que pudo incurrir en una incorrecta mezcla interna, Espinoza & Palma, (2009). Su montaje se realizó en plástico PVC, con 6.63 litros de volumen útil, se adicionó un conducto de salida para evitar reboses y un conducto de direccionamiento de biogás y llaves de paso para regulación de cargas y toma de muestras como lo muestra la Figura 4.

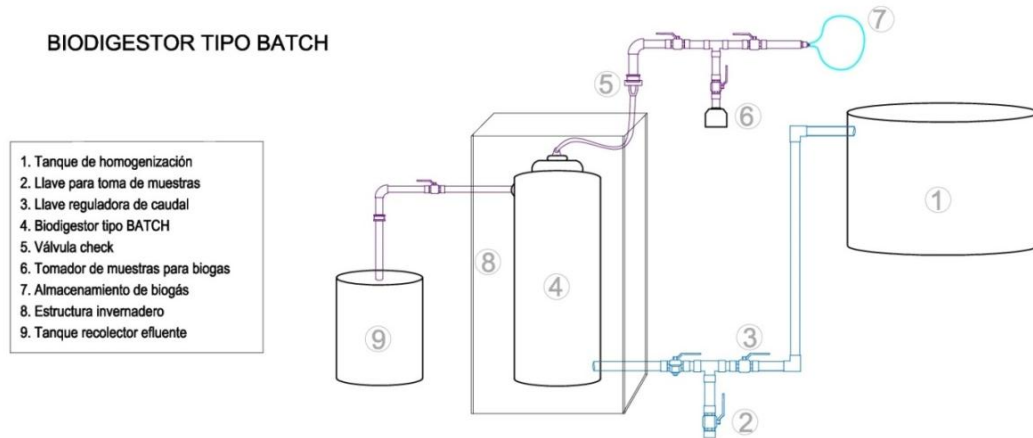


Figura . Montaje Experimental.

Aclimatación del inóculo. Durante la aclimatación, los lodos anaerobios mantuvieron su aspecto de granulación, característica favorable del desarrollo de la digestión anaerobia, Rodríguez (2003), esto favoreció al nuevo sistema a soportar choques hidráulicos durante las cargas semicontinuas y que las asociaciones multicelulares acopladas en el gránulo aprovechen mejor los nutrientes del AMC (Rodríguez, 2003).

Con la gran cantidad de ácido acético producido en la acidogenesis y al ser este un ácido débil, Narasaki (1979), se corre el riesgo de tener la presencia de iones hidrógeno libres. Se confirmó que las AMC son ácidas, siendo su pH registrado de 3.3 unidades, por lo que fue necesario reajustar su pH hacia la neutralidad, Rodríguez (2003), siendo necesario agregar 16gr de NaHCO_3 por cada dos litros de AMC, logrando alcanzar un pH entre 6.9 y 7.1, Torres & Pérez, (2008) antes de iniciar la aclimatación.

Con la adición de NaHCO_3 , Casanova (2017), una sal de fácil disociación, que posee una base conjugada llamada ión carbonato, reacciona con los iones hidrógeno libres para conducir a la

formación de ácido carbónico, la importancia de este fenómeno es que evita dejar iones hidrógeno libres que conduzcan a la disminución de pH, esto garantizó la capacidad tampón necesaria para neutralizar los AGV, Casanova, (2017). Igualmente, Cajigas *et al.*, (2005). revelaron que el NaHCO_3 otorga mayor eficiencia de remoción de DQO a diferencia de la cal hidratada.

En la Figura se muestra que en los días siguientes durante la aclimatación, se presentó incremento del pH en un rango de 6,88 a 7,75, aún favorable para la comunidad microbológica, Rojas (2006), esto debido a la rápida disociación de los ácidos presentes.

La variación del pH hacia la basicidad no es nocivo para el proceso Orobio *et al.*, (2014), e incluso, hace que el tiempo de adaptación a la biomasa de las AMC sea menor, Parra *et al.*, (2014) y no afecta la producción de metano, incluso, Veecken *et al.*, (2000) encontró mayor producción de metano con pH entre 6,5 y 7,7. Por el contrario un descenso de pH si incide en un biogás con baja concentración de metano, Parra *et al.* (2014).

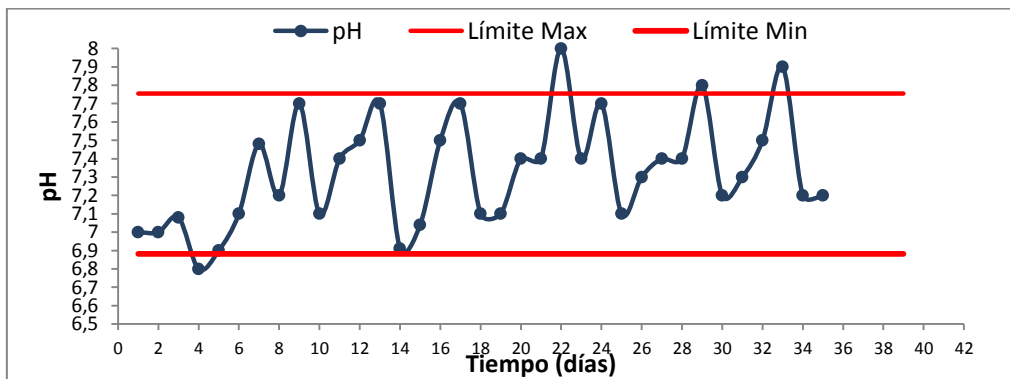


Figura . Seguimiento al comportamiento del pH.

En cuanto al comportamiento de la temperatura, la Figura muestra que el sistema anaerobio se desarrolló en un rango mesofilo recomendado por Puebla (2012) favorable para el desarrollo exitoso de las comunidades microbológicas. Algunas leves variaciones, debidas a la interrupción de la fuente de calor proporcionada al sistema, no provocaron cambios físicos en el aspecto del lodo y las AMC.

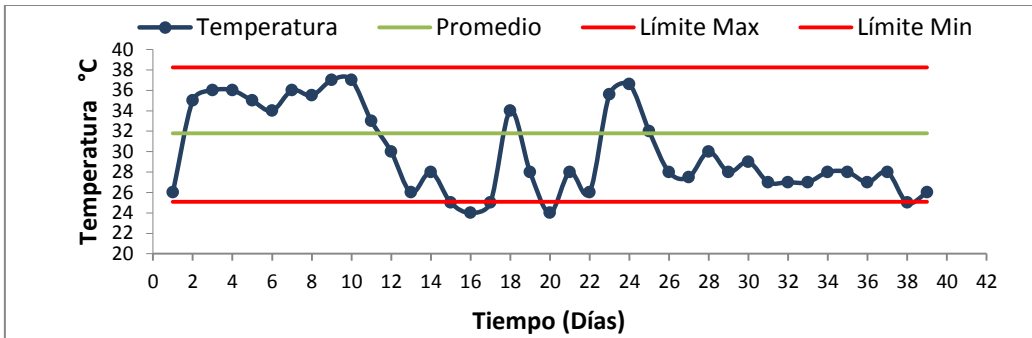


Figura . Seguimiento al comportamiento de la temperatura.

La Figura muestra la remoción de la DQO inicial durante los primeros 18 días de monitoreo, correspondientes al 37%. Se desconoce el tiempo exacto en el que se logró la aclimatación del inóculo, debido a los escasos muestreos de DQO. Sin embargo, se afirma que la aclimatación del inóculo es favorable, al evidenciar que los microorganismos anaerobios removieron DQO en los primeros días, Casanova (2017).

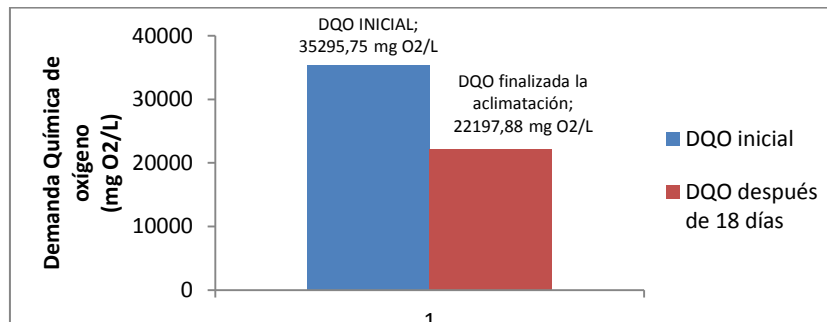


Figura . DQO removida pasados 18 días.

Igualmente, durante el tiempo de monitoreo se evidenció temperatura dentro del rango mesófilo y pH en el rango óptimo recomendado por la mayoría de autores (rango 6.8 a 7.7) (Celis & Castañeda, 2009).

Determinación de la cantidad de metano en el biogás obtenido. A lo largo de todo el registro, la producción de metano fue variable, esta producción fue dependiente del comportamiento de las variables de control monitoreadas (temperatura, pH, alcalinidad y ácidos grasos volátiles).

El análisis de correlación de Spearman realizado, indicó, de manera ascendente el orden de dependencia de cada variable así: comportamiento de los AGV, seguido de la capacidad neutralizante otorgada por la alcalinidad del medio, seguido de la variación de pH y finalmente, el comportamiento de la temperatura como se muestra en la Figura .

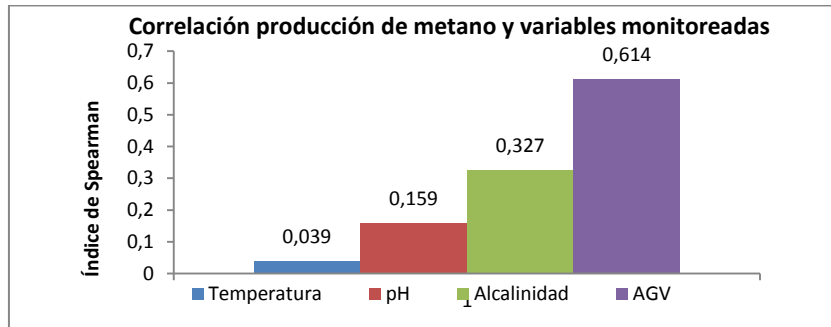


Figura . Dependencia de la producción de metano respecto al comportamiento de las variables.

Como se evidencia, el incremento de los AGV afectó la producción de metano. Principalmente, el ácido acético al ser de fácil disociación, separa su ión hidrógeno, concentrándolo en mayor proporción, afectando la supervivencia de los microorganismos responsables de la metanogénesis, ya que en cuanto a pH estos microorganismos son los más sensibles a estos cambios.

La Figura indica que la producción de AGV se mantuvo dentro del rango aceptable por Bote, (2013) (100-300meq/l) en estado de arranque y la presencia de los AGV durante el transcurso de los días no causó acidificación del sistema anaerobio.

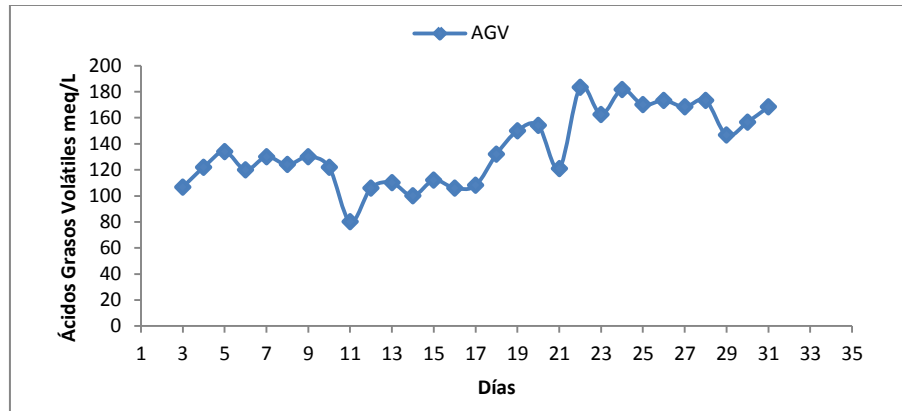


Figura . Seguimiento al Comportamiento de los AGV.

Igualmente, la alcalinidad en segunda posición, es la responsable de controlar la producción y acumulación de los iones hidrógeno libres, responsables de causar acidez, Parra *et al.*, (2014).

Después de la primera dosificación con bicarbonato de sodio, se mantiene un incremento de iones carbonato durante 11 días, incrementándose el pH y posteriormente el efecto oscila entre altos y bajos hasta el día 29, donde se presenta una disminución de la alcalinidad bicarbonática debido a la producción excesiva de AGV.

Como medida de control, en los días siguientes, se tuvieron dosificaciones nuevas de alcalinizante al AMC adicional agregada, posterior al día 29 los AGV se produjeron en mayor concentración, neutralizados con los iones carbonato libres.

Después del día 29, nuevamente la alcalinidad continua incrementándose y se observa que los valores presentados fueron altos, Cajigas *et al.*, (2005), el incremento se atribuye a dos posibles causas: producción de AGV poco representativa o superación del límite del equilibrio neutralizante.

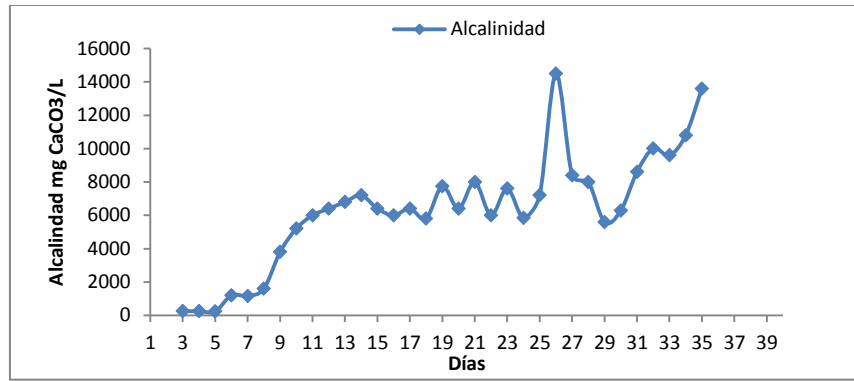


Figura . Seguimiento al Comportamiento de la Alcalinidad.

La Figura muestra la producción de metano durante el estado de aclimatación y arranque se incrementa levemente. Los mayores incrementos en la producción de metano corresponden a los días 18, 21 y 23 donde recientemente un día anterior se había adicionado AMC con reajuste de su pH.

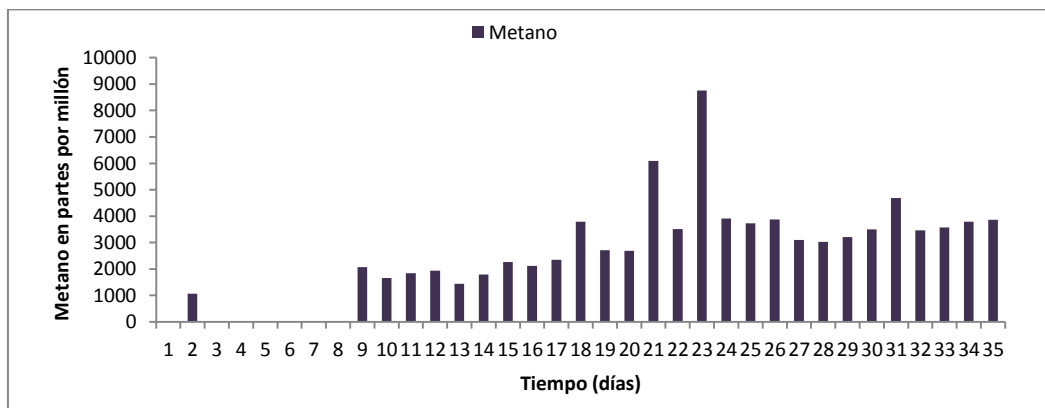


Figura . Seguimiento a la producción de metano en partes por millón.

La producción de metano promedio fue de 2999,66 ppm correspondiente al 6 % según el sistema de cuantificación del dispositivo GAS LEAK DETECTOR, promedio que aún no le atribuye una capacidad calorífica al biogás generado en estado de arranque, debido a su escasa concentración de metano, Jensen, & Batstone. (2011), siendo que el porcentaje adecuado de concentración de metano para combustión debe ser mayor al 45% FAO (2011).

Sin embargo, la producción de metano fue similar a la presentada en la investigación de Acarley (2018) donde la producción más alta de metano se produjo del día 19 al 38. También, se

asemeja a la tasa de producción en etapa de arranque evaluada por Rondón & Quintero (2012) donde obtuvo en promedio 2770,8mg/L de metano.

Como adicional, el porcentaje de DQO removido hasta el día 18 corresponde al 37% del cual entre el 20 y 25% fue transformado en metano, Gallipoliti *et al.*, (2009), día en el que la producción de metano correspondió a 3914 ppm. Finalmente, la viabilidad de dar continuidad al sistema se visualiza en la rápida remoción de la DQO presentada en los primeros días, además, el comportamiento de las variables de control (temperatura, pH, Alcalinidad y AGV) se acoplaron a los rangos respaldados por autores en el desarrollo exitoso de la digestión anaerobia durante la etapa de arranque, por lo cual, se espera dar continuidad al arranque y para superar el porcentaje de metano adecuado para obtener una capacidad calorífica.

Conclusiones

Las AMC evaluadas presentaron gran concentración de contenido orgánico, adicionalmente su fracción biodegradable es significativa, demostrando que son fuente de aprovechamiento energético alternativo gracias al desarrollo de la digestión anaerobia.

Las AMC son ácidas, presentan niveles de pH bajos asociados a la concentración de AGV, por lo tanto, para ser sometidas a un proceso de digestión anaerobia, es necesario acondicionar su pH con una sustancia alcalinizante.

En el proceso de beneficio húmedo de café, el agua de primer lavado concentra la mayor cantidad de sólidos, correspondientes al contenido orgánico que componen al mucílago de café.

El Biodigestor de flujo semicontinuo como montaje experimental que desarrolló el proceso evaluado, permitió realizar un seguimiento detallado de las variables monitoreadas, además, de adecuar las condiciones ambientales para el desarrollo de las comunidades microbianas.

Con base a la correlación bivariada realizada, la producción de metano si dependió del comportamiento de las variables monitoreadas, en primer orden del comportamiento de los AGV, seguido de la capacidad neutralizante otorgada por la alcalinidad del medio, seguido de la variación de pH y finalmente el comportamiento de la temperatura.

La producción de metano promedio a partir de las AMC fue de 2999,66 ppm correspondiente al 6 % en estado de arranque, similar en otras investigaciones, por tanto es una fuente viable de generación de metano siendo que además de visualizar la rápida remoción de la DQO en los primeros días, también, fueron aguas que acoplaron el comportamiento de las variables de control a los rangos respaldados por varios autores durante la etapa de arranque de un sistema anaerobio nuevo. Siendo una vez más que se comprueba que las AMC son materia prima potencial para generar energía.

Recomendaciones

Se recomienda adherir internamente un sistema de agitación lenta al Biodigestor de flujo semicontinuo que trate AMC, para garantizar la disolución completa de las sustancias amortiguadoras y favorecer la activación de la comunidad microbiana presente.

Se recomienda cuantificar el volumen del biogás generado en estado de aclimatación y arranque de un sistema nuevo, ya que por ser volúmenes mínimos se requiere realizar la medición con métodos sensibles.

Se recomienda investigar los efectos que tiene la presencia excesiva de macro y micronutrientes, como fue en este caso la presencia de nitrógeno y fósforo adicional agregado en el desarrollo de la digestión anaerobia de las AMC.

Se recomienda investigar el potencial bioquímico de las AMC para que este valor no sea subestimado con datos de otras investigaciones.

Para posteriores investigaciones similares se recomienda llevar el seguimiento de las proporciones de los diferentes ácidos que componen a los AGV, esto ayuda a conocer la concentración de los mismos y controlar mejor su neutralización.

Se recomienda evaluar la producción de metano a partir de las AMC diluidas y reducir la toxicidad metanogénica.

Referencias Bibliográficas

Acarley, F. E. (2018). Evaluación de la Producción de metano a partir de las aguas miel del beneficio húmedo del café mediante digestión anaerobia. Recuperado de <https://docplayer.es/115094387-Universidad-nacional-agraria-la-molina.html>

Balseca y Cabrera. (2011). Producción de biogás a partir de aguas mieles y pulpa de café. Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream.pdf>

Bernal, D. P., Cardona, D. A., Galvis, A., & Peña, M. (2003). Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. *Seminario internacional de métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales*, 19-27. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/M_Pena2/publication/.pdf

Bote , P. A. (2013). Estudios de los efectos del pH extremo por la adición de NaOH sobre la producción y la calidad del biogás y otros parámetros de la digestión anaerobia urbana. Recuperado de <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/trabajos-fin-de-master/pdf>

Cajigas, A., Pérez, A., & Torres, P. (2005) Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca. *Scientia et Technica*, 11(27). Recuperado de <https://www.redalyc.org/html/849/84911698045/>

Casanova, M. A. (2017). Evaluación de un digestor anaerobio de fases separadas para el tratamiento de lactosuero de la microempresa “Lácteos La Delicia La Frontera”. Recuperado de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/7720-0505593.pdf>

Castillo, E. F., Sandoval, C. J., Carreño, M., & Mendoza, M. V. (2007). Caracterización microbiológica de lodos anaerobios utilizados en el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. *Scientia et technica*, 1(35). Recuperado de <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5503>

Celis Quintero, L. C., & Castañeda Beltrán, W. R. (2009). Influencia de la variación temporal de fenoles y materia orgánica sobre la capacidad de degradación de la biota bacteriana en un

reactor anaerobio de flujo a pistón (RAP). Recuperado de <http://repository.lasalle.edu.co/handle/10185/14028>

Cenicafé. (2011). Experiencias recientes en el uso de los subproductos del café. Recuperado de http://www.repic.ch/files/6613/7527/8746/rk_kaffeeabfaelle_35_rodriguez.pdf

Cenicafé. (2016). Beneficio del café. Recuperado de http://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/beneficio

Cerdá, E. (2018). Energía obtenida a partir de biomasa. Recuperado de Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de [https://www.researchgate.net/profile/Emilio Cerda/publication_pdf](https://www.researchgate.net/profile/Emilio_Cerda/publication_pdf)

Chernicharo, C. D. L. (2007). Biological Wastewater Treatment Series: Anaerobic Reactors. Federal University of Minas Gerais, Brazil.

Chernicharo, C. A. (1997). Anaerobic Reactors. Recuperado de Department of sanitary and environmental engineering. Recuperado de <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402116.pdf>

Espinoza Guerrero, A. J., & Palma Paredes, P. G. (2010). Diseño y Construcción de un Reactor Batch para la Obtención por Transesterificación de Biodiesel a Partir de Aceite de Cocina Reciclado (Bachelor's thesis). Recuperado de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/248>

FAO Food and Agriculture Organization - (2011). Manual del Biogás. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Gallipoliti, V. A., Martina, P. C., & Juan-Aeberhard, R. (2009) Análisis energético de la producción de biogás en un reactor tipo Batch cargado con virutas de aserrín y restos orgánico. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 181-185

Goyenola, G. (2007). Determinación de la Alcalinidad Total. Recuperado de <http://imasd.fcien.edu.uy/difusion/educamb/propuestas/alcalinidad.pdf>

Jensen, & Batstone. (2011). Assessing the role of biochemical methane potential tests in determining anaerobic degradability rate and extent. *Water Science & Technology*. wst. 64(4), 880-886. Recuperado de <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/64/4/880/16935>

Lorenzo-Acosta, Y., & Obaya-Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39, 35-48. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>

Ministerio de Ambiente (2015) Resolución 631 de 2015. Recuperado de https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

Montero, M., Sandí, M., & José, A. (2009). La Contaminación de las Aguas Miel en Costa Rica. (1840-1910). *Revista de Ciencias Ambientales*, 37(1), 30-35.

Morales, C., & Mejía, C. (2015). Evaluación del desempeño de un Biodigestor para el tratamiento de la mezcla agua-mucílago de café obtenidas por desmucilagador mecánico. Recuperado de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/>

Morales, D. (2016). Selección de estrategias sostenibles para reducir la contaminación generada en el beneficio de café. Santiago de Cali, Colombia: Universidad del Valle.

Pabón, Caicedo (2012) Cambio climático en Colombiana. *Academia Colombiana*. 36 (139) 261-268

Orobio, B. A. P., Lozada, P. T., Rebellón, L. F. M., Cleves, L. M. C., Franco, C. V., López, W. A. T., & Andrade, J. A. O. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2). Recuperado de <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/421>.

Puebla, Y. G. (2012). "Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del Café". Recuperado de http://oa.upm.es/yans_guardia_puebla.pdf

Puerta, G., & Rodríguez, N. (1997). Impacto biológico de los productos de beneficio del café. Recuperado de Cenicafé: <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/67/1/pdf>

Quintero, & Ríos. (2011). Composición química del mucílago de café, según el tiempo de fermentación y refrigeración. Recuperado de <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/.pdf>

Rodríguez, J. (2003). Arranque y operación de reactores anaerobios. Recuperado de <http://www.ingenieroambiental.com/4014/arranque.pdf>

Rojas, O. (2006). Relación Alcalinidad y Ácidos grasos volátiles. Recuperado de <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/000866/000866d.pdf>

Roldón, & Quintero. (2012). Estudio preliminar de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del mucílago de café utilizando estiércol de cerdo como inóculo. Recuperado de Universidad Industrial de Santander: <http://tangara.uis.edu.co/tesis/2012/pdf>

Pérez, A., & Torres, P. (2011). Índices de alcalinidad para el control del tratamiento anaerobio de aguas residuales fácilmente acidificables. *Ingeniería y Competitividad*, 10(2), 41-52. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323482002>

Veeken, A., Kalyuzhnyi, S., Scharff, H., & Hamelers, B. (2000). Effect of pH and VFA on hydrolysis of organic solid waste. *Journal of environmental engineering*, 126(12), 1076-1081.

Von Sperling, M. (2012). Principios del Tratamiento biológico de aguas residuales (1 ed.). San Juan Pasto: Universidad de Nariño.