

**ESTUDIO PRELIMINAR DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE GALLINAZA DE JAULA CON MELAZA, LODO RESIDUAL Y ACEITE DE OLIVA COMO CO-SUSTRATOS**

**NAURYS TATIANA GARCÍA QUIJANO.  
LUIS ENRIQUE LAMBIS BENITEZ.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICA.  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.  
BUCARAMANGA.  
2013.**

**ESTUDIO PRELIMINAR DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE GALLINAZA DE JAULA CON MELAZA, LODO RESIDUAL Y ACEITE DE OLIVA COMO CO-SUSTRATOS.**

**NAURYS TATIANA GARCÍA QUIJANO  
LUIS ENRIQUE LAMBIS BENITEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de:  
Ingeniero químico.**

**DIRECTOR.**

**Humberto Escalante Hernández.**

**Ing. químico, M. Sc., PhD.**

**CODIRECTORA.**

**Liliana Castro Molano.**

**Ing. química, PhD**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.**

**FACULTAD INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS.**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA.**

**BUCARAMANGA.**

**2013.**

## AGRADECIMIENTOS

Primero al Universo, por la entropía y el destiempo, Por agitar el suelo y obligarnos a saltar, a reinventar el camino derribando muros.

Al profesor Humberto Escalante, por creer y por estar, por su orientación, por ser un maestro generoso en enseñanzas, calidad humana y tiempo.

A la profesora Liliana Castro por prestar su hombro, por su respaldo y pasión.

A Deisy, Gustavo, José, Laura y Metaminino, por ser el mejor equipo del mundo. Siempre.

A los colaboradores del camino, Guillermo Acero, Natalia Bedoya, Andrea Sierra, don Eduardo, don Wilson y Rihanna.

Dedicatoria.

Yo conozco una mujer fuerte, ella espanta dragones y me ama, ese amor es lo mejor que tengo. Juanita, gracias. Cada meta en mi camino, es para ti.

Mi papá sabe un montón de cosas, incluso donde vive el hombre caimán. Gracias por tanto, aquí dejo esto, ojalá sonrías.

Mi hermano menor es tan grande que a veces, él es el mayor, verlo crecer es un regalo. Fernando celebremos la vida.

Mi mejor amiga es tocaya del año nuevo en un país rarísimo y lejano. Llevo en mi maleta tantas cosas tuyas que le debo un montón de abrazos incómodos. Naurys, esto es nuestro. Gracias totales.

A mis amigos, una lista corta, pero repleta de cosas lindas. Sin ustedes no hay camino.

Luis.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Gallinaza.....	17
1.2 Digestión anaerobia y Co-digestión anaerobia.....	18
1.2.1 Etapas de la DA.....	19
1.2.2 Variables del proceso de DA.....	21
2. METODOLOGÍA.....	25
2.1 Materiales y métodos.....	25
2.1.1 Sustrato.....	25
2.1.2 Inóculo.....	26
2.1.3 Co-sustratos.....	26
2.1.4 Viabilidad de la DA de GJ a distintas RIS.....	27
2.1.5 Selección del mejor Co-sustrato.....	28
2.1.6 Viabilidad de la Co-DA de GJ.....	29
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	31
3.1 Caracterización fisicoquímica del sustrato y el inóculo.....	31
3.2 Viabilidad de la DA de GJ.....	32
3.3 Viabilidad de la Co-DA de GJ.....	38
CONCLUSIONES.....	42
RECOMENDACIONES.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	44
ANEXOS.....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la DA.....	21
Figura 2. Metodología experimental para el desarrollo de DA y Co-DA a partir de GJ .....	25
Figura 3. Consumo de ART durante la DA de GJ y EB .....	32
Figura 4. Evaluación de AGV durante la DA de GJ.....	32
Figura 5. Variación de pH (a) y relación AGV/AT (b) durante la DA de GJ .....	33
Figura 6. Producción de biogás para DA y EB a RIS de 0,5, 1 y 1,5.....	34
Figura 7. Rendimientos de la Co-DA de GJ con los diferentes co-sustratos .....	35
Figura 8. Concentración Inicial y final del Nitrógeno amoniacal para la Co-DA de GJ con los diferentes co-sustratos .....	37
Figura 9. Evolución de consumo de ART y AGV durante la Co-DA de MC:GJ 2:98.....	38
Figura 10. Consumo de ART (a) y AGV (b) durante la DA y Co-DA .....	38
Figura 11. Comportamiento del pH durante la DA y la Co-DA .....	39
Figura 12. Variación de la relación AGV/AT durante la DA y Co-DA.....	39
Figura 13. Producción de biogás en la Co-DA de GJ con MC.....	40

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de operación para la DA a distintas RIS .....	27
Tabla 2. Variables de respuesta de la DA de GJ .....	28
Tabla 3. Relaciones de mezcla GJ: co-sustrato.....	29
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la GJ y EB.....	31
Tabla 5. Rendimientos para RIS 0,5; 1 y 1,5.....	34
Tabla 6. Caracterización co-sustratos .....	35
Tabla 7. Variables de respuesta y estabilidad de la Co-DA de GJ con diferentes co-sustratos .....	36
Tabla 8. Concentraciones iniciales y finales de nitrógeno amoniacal para DA y Co-DA....	41

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Protocolo para la recolección de muestras de gallinaza de jaula .....	52
Anexo B. Caracterización fisicoquímica de la gallinaza de jaula.....	53
Anexo C. Caracterización fisicoquímica del estiércol bovino .....	55
Anexo D. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART) .....	56
Anexo E. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT) .....	58
Anexo F. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas.....	60
Anexo G. Método de desplazamiento alcalino .....	61
Anexo H. Determinación del N-Amoniacal .....	63
Anexo I. Registro fotográfico .....	64

## NOMENCLATURA

AGV	Ácidos grasos volátiles (mg/L).
AO	Aceite de Oliva.
ART	Azúcares reductores totales (mg/mL).
AT	Alcalinidad Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L).
Co-DA	Co-digestión anaerobia.
DA	Digestión anaerobia.
DNS	Dinitrosalisílico.
EB	Estiércol Bovino.
GJ	Gallinaza de Jaula.
GP	Gallinaza de Piso.
LR	Lodo Residual.
MC	Melaza de Caña.
RIS	Relación inóculo - sustrato.
ST	Sólidos totales (mg/L).
SV	Sólidos volátiles (mg/L).
VNTP	Volumen a condiciones estándar.
Y <sub>P/S</sub>	Rendimiento de producción de biogás (m <sup>3</sup> biogás/ Kg SV).

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO PRELIMINAR DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CO-DIGESTIÓN ANAEROBIA DE GALLINAZA DE JAULA CON MELAZA, LODO RESIDUAL Y ACEITE DE OLIVA COMO CO-SUSTRATOS.\*

**AUTORES:** NAURYS TATIANA GARCÍA QUIJANO, LUIS ENRIQUE LAMBIS BENITEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Gallinaza, biogás, co-sustrato, rendimiento, inhibición.

**CONTENIDO:** La gallinaza de jaula (GJ), es el residuo más representativo de la explotación avícola. En el presente estudio, se investigó la implementación de la digestión anaerobia (DA) como tecnología para el aprovechamiento energético de la GJ. La concentración elevada de nitrógeno en la gallinaza y su posterior degradación en forma de iones de amonio, hacen la DA sensible a inhibición y por ende a la disminución en el rendimiento de producción de biogás. Por lo tanto, se evaluó la producción de biogás mediante la Co-digestión anaerobia (Co-DA) de GJ, con aceite de oliva (AO), melaza de caña de azúcar (MC) y lodo residual (LR) a diferentes relaciones volumétricas, para disminuir la inhibición y aumentar el rendimiento. Se llevaron a cabo ensayos de biodegradación anaerobia en batch a 39°C. Durante la experimentación, se monitoreo el consumo de azúcares reductores totales, la concentración de ácidos grasos volátiles, la estabilidad del proceso y concentración de nitrógeno. Para la Co-DA de Gallina de Jaula con MC en relación volumétrica 2:98 (MC:GJ) se obtuvo una reducción del 58% en la concentración de nitrógeno amoniacal, así como un mejor comportamiento en la estabilidad del proceso, aumentando la producción de biogás desde 0,49 a 0,60 m<sup>3</sup>/kg SV de sustrato

---

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela ingeniería Química. Director Humberto Escalante Ing. Químico Ph.D. Codirectora Liliana Castro Ing. Química Ph.D

## ABSTRACT

**TITLE:** PRELIMINARY STUDY OF BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC CO-DIGESTION OF POULTRY MANURE WITH MOLASSES, RESIDUAL SLUDGE AND OLIVE OIL AS CO-SUBSTRATE. \*

**AUTHORS:** NAURYS QUIJANO TATIANA GARCIA, LUIS ENRIQUE BENITEZ LAMBIS \*\*

**KEYWORDS:** Poultry Manure, biogas, co-substrate, yield inhibition.

**CONTENT:** Poultry Manure (PM), is the most representative residue from poultry production. In the current study, we investigate the implementation of anaerobic digestion (AD) as a technology to the energetic use of PM. The elevated concentration of Nitrogen in the manure and its posterior degradation in ammonia ions, make from AD sensitive to inhibition and so to the decrease in the yield in the biogas production. Therefore, we evaluated the biogas production through PM's Anaerobic Co-Digestion (A-CoD), with olive oil (OO), sugar cane molasses (SCM) and residual sludge (RS) in different volumetric relations, to decrease the inhibition and boost the yield. We carry out anaerobic biodegradation essays in Batch 39°C. During the experiment, we monitored the consumption of total reducers sugars, concentration of Volatile fatty acids, stability of the process and nitrogen concentration. For poultry's manure A-CoD with SCM in volumetric relation 2:98 (SCM:PM) we obtained a reduction of 58% in the concentration of ammonia nitrogen, as well as a better behavior in the stability of the process, increasing biogas's production from 0,49 to 0,60 m<sup>3</sup>/kg SV of substrate.

---

\* Thesis

\*\* Faculty of Engineering physic-chemical. School of Chemical Engineering. Director Humberto Escalante Chemical Engineer Ph.D. Co-directora Liliana Castro Chemical Engineer Ph.D.

## INTRODUCCIÓN

La industria avícola colombiana representa un aporte del 28% del PIB pecuario de la nación (Rivera *et al.*, 2011), con una producción de 636.345 toneladas de huevo y 1.112.260 toneladas de pollo (FENAVI, 2013). El departamento de Santander contribuye con cerca del 25% del total nacional (Revista Semana, 2011).

La explotación avícola genera residuos tipo: gallinaza, pollinaza, aves muertas y cáscaras de huevo. Por su alta carga orgánica, la incorrecta disposición de estos residuos involucran un impacto negativo sobre el medio ambiente (Rosales *et al.*, 2007). La gallinaza varía dependiendo del tipo de alimentación y alojamiento de las aves; está formada principalmente por deyecciones con altos porcentajes de humedad que suelen someterse a secado para su estabilización y disposición como abono (Estrada, 2005)

La composición fisicoquímica de la biomasa, la constituyen como una fuente de combustible verde destacada, considerando la gran cantidad de energía que almacena (Mckendry, 2002; Skoulou *et al.*, 2007). Bajo esta perspectiva el uso de la gallinaza como biomasa, evaluando su potencial como fuente energética, resuelve el problema de su estabilización como residuo orgánico, al tiempo que disminuye los gastos de producción asociados a requerimientos energéticos.

La selección de un tipo específico de biomasa y su aprovechamiento energético mediante una tecnología en particular, se efectúa teniendo en cuenta su disponibilidad y características fisicoquímicas (Castro, 2012). Un ave criada para la producción de huevo produce en promedio 0,0804 kg de gallinaza en masa seca/día, es decir, una granja de crianza y producción genera aproximadamente 127,7 m<sup>3</sup> de gallinaza por día (Sierra, 2013).

Los porcentajes elevados de humedad y la alta disponibilidad de materia orgánica presentes en la gallinaza, direccionan a la digestión anaerobia (DA) como la tecnología de aprovechamiento energético más adecuada. En la DA la materia orgánica se descompone, por la acción de un consorcio microbiano, para producir

biogás (Bruni *et al.*, 2010). La DA permite la disminución del impacto ambiental, la estabilización del residuo orgánico y su aprovechamiento energético para producir biogás a bajo costo (Pérez *et al.*, 2009). Se han reportado producciones de biogás en el rango de 0,30- 0,55 m<sup>3</sup>/kg SV de sustrato para procesos de DA con gallinaza de jaula (GJ) (Callaghan *et al.*, 2002).

No obstante, las concentraciones elevadas de nitrógeno en la gallinaza y su posterior degradación en forma de iones de amonio, hacen la DA sensible a inhibición y por ende a disminución en el rendimiento de producción de biogás (Mata, 2003; Kumar, 2008). Salminen *et al.* (2002), reportaron producciones de metano entre 0,52 – 0,55 m<sup>3</sup>/kg SV de sustrato para la DA de GJ, sin embargo el sistema se inhibió al aumentar la carga orgánica.

El efecto inhibitorio se puede reducir mediante la mezcla de dos o más co-sustratos dando lugar a una co-digestión anaerobia (Co-DA) (Chen *et al.*, 2008). Li *et al.* (2013), plantearon una Co-DA de hojas y tallos del maíz con gallinaza, obteniendo un aumento en el rendimiento del 12%. Wang *et al.* (2012), investigaron la Co-DA de una mezcla de 40% estiércol bovino, 40% gallinaza y 20% paja de trigo, que arrojó una producción de biogás de 581 L/Kg SV, aumentando un 46% la producción de biogás obtenida con gallinaza sola.

Por tanto el objetivo de este estudio, fue evaluar la producción de biogás a partir de gallinaza mediante DA, analizando la estabilidad del proceso, variables de operación y el uso de distintos co-sustratos (melaza de caña, lodo residual, aceite de oliva) como estrategia para aumentar el rendimiento de producción.

### **1.1 Gallinaza.**

La gallinaza es el residuo orgánico resultante de la explotación avícola de gallinas ponedoras y reproductoras, constituido por las deposiciones sólidas y líquidas de las aves (deyecciones) (Rosales, 2007). La gallinaza de piso (GP) está constituida por deyecciones y cama (material absorbente como viruta, pasto seco o cascarillas) que permanecen en el galpón durante el ciclo de producción. La gallinaza de jaula

(GJ) está conformada por deyecciones, plumas, residuos de alimentos y huevos rotos (Estrada, 2005).

Los porcentajes de humedad en la GJ, oscilan entre 56-75% (Escalante *et al.*, 2010), lo que la hace un combustible atractivo para aplicaciones termoquímicas; además, su alto contenido de sólidos volátiles posibilita su aprovechamiento energético mediante bioprocesos. La GJ contiene nitrógeno, fósforo y potasio, que permiten su uso en la producción de fertilizantes orgánicos, compostaje o suplemento proteico (Whitmore 2007, Gao *et al.*, 2010, Huang *et al.*, 2011, Alcoser *et al.*, 2006). Sin embargo altas concentraciones de nutrientes en un área, pueden generar contaminación de suelos (Estrada, 2005; UNIDO, 1998). Por otro lado, la descomposición de las formas de nitrógeno (70% ácido úrico, 30% proteína) presente en la gallinaza, producen compuestos amoniacales (Palatsi, 2009) asociados a fuertes olores. En este sentido dada su alta carga orgánica y la volatilización de compuestos nitrogenados y sulfurados presentes en ella (Tiquia *et al.*, 2002), la GJ debe ser estabilizada luego de su generación, ya que su incorrecta disposición implica un impacto negativo a nivel ambiental.

## **1.2 Digestión anaerobia y Co-digestión anaerobia**

La DA es una reacción bioquímica compleja, que se lleva a cabo en un entorno libre de oxígeno por varios tipos de microorganismos (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991). Durante la DA se produce una mezcla compuesta principalmente de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), conocida como biogás. El metano se puede utilizar para producir energía, sustituyendo los combustibles fósiles y por lo tanto reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además de la DA, se obtiene un subproducto, compuesto de restos de materia orgánica degradada. Este subproducto puede ser estabilizado, para convertirlo en fertilizante.

La DA se implementa para convertir gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y química, en subproductos útiles. Sin embargo hay ciertos residuos cuyo potencial de producción de biogás es bajo,

debido al poco contenido de materia orgánica y a escasa biodegradabilidad. Por lo tanto, es necesario mezclar el residuo (sustrato) desprovisto de estas propiedades con otro, llamado co-sustrato (Proceso de co-digestión).

En la Co-DA se aprovecha la sinergia de las mezclas, y se compensan carencias de cada uno de los sustratos por separado, evitando la inhibición y obteniendo una elevada producción de biogás y valorización de residuos (Mata *et al.*, 2000). La Co-DA se ha centrado en mejorar la relación C/N, ya que la inhibición de la metanogénesis por el amoníaco, es uno de los problemas habituales durante la DA de residuos con alto contenido de nitrógeno, como lodos de agua residuales y estiércoles (Mata *et al.*, 2011).

Fang *et al.* (2010), investigaron la producción de biogás a partir de melaza desazucarada de remolacha en Co-DA con estiércol bovino (EB), reportando un rendimiento medio de metano de 190 mL CH<sub>4</sub>/g SV, superior a los 120 mL CH<sub>4</sub>/g SV obtenidos con DA. Pastor *et al.* (2013), evaluaron la Co-DA de lodos PTAR con aceite usado, resultando un aumento del 11% en los SV removidos, comparado con la DA, e incrementando la producción de biogás un 23,5%.

La Co-DA se contempla como una solución al problema de la inhibición. En el caso de la GJ diferentes investigadores han concluido que la principal desventaja es la acumulación de sustancias inhibitoras durante el proceso de DA (Liu *et al.*, 2012). Por lo tanto la Co-DA de la GJ se ha investigado con otros tipos de residuos, como EB (Güngör-Demirci *et al.*, 2004), los desechos de cerdo (Magbanua *et al.*, 2001), estiércol digerido anaeróbicamente (Bujoczek *et al.*, 2000), lodos residuales de PTAR (Borowski *et al.*, 2013), y agua residual en la extracción de aceite de oliva (Gelegenis *et al.*, 2007), mejorando la producción de biogás.

### **1.2.1 Etapas de la DA**

La DA se lleva a cabo en cuatro etapas: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis (Figura 1).

## **Hidrólisis**

La hidrólisis es la descomposición de sustrato orgánico en productos más pequeños que posteriormente son absorbidos y degradados por las bacterias (Morgenroth *et al.*, 2002). Durante la hidrólisis los lípidos, proteínas e hidratos de carbono se despolimerizan a glicerol y ácidos grasos de cadena larga, a aminoácidos y monosacáridos respectivamente.

Los sólidos volátiles (SV), son una medida de la cantidad de materia orgánica disponible para degradación. En el transcurso de la DA, la concentración de SV disminuye con el tiempo, evidenciando que el proceso de degradación transcurre con estabilidad hidrolítica.

## **Acidogénesis**

En esta segunda fase los productos solubles de la hidrólisis son transformados en ácidos grasos volátiles (AGV) de cadena corta y alcoholes por acción de una amplia gama de microorganismos (Angelidaki *et al.*, 2011). Los ácidos grasos más importantes que se forman son: ácido acético, propiónico y butírico. Sólo el ácido acético formado, da origen al 70% de la producción de metano.

## **Acetogénesis**

En la Acetogénesis se sintetiza acetato por la reducción de CO<sub>2</sub> y ácidos orgánicos. En el proceso actúan microorganismos homoacetanogénicos, que consumen H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, y producen acetato. Además compiten con las bacterias metanogénicas por sustratos como el hidrógeno, formiato, y metanol. (Angelidaki *et al.*, 2011).

## **Metanogénesis**

En la última fase el acetato, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> se transforman en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, por acción de las bacterias metanogénicas. Se conocen tres vías principales para la formación de metano en ambientes anaeróbicos (Deppenmeier, 2002, Liu *et al.*, 2008.): la *Metanogénesis acetoclástica*, donde el acetato se divide en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, influyendo en el pH del sistema; la *metanogénesis hidrogenotrófica* donde el dióxido de carbono se reduce a CH<sub>4</sub>, controlando el potencial redox del proceso (Castillo *et al.*, 2007); y la metanogénesis metilotrófica donde compuestos metilados (metanol, metilaminas, sulfuro de dimetilo, etc) se convierten en CH<sub>4</sub>. La metanogénesis es a

menudo considerada el paso limitante en la DA, debido a las bajas tasas de crecimiento y susceptibilidad a las sustancias inhibitoras (Chen *et al.*, 2008).

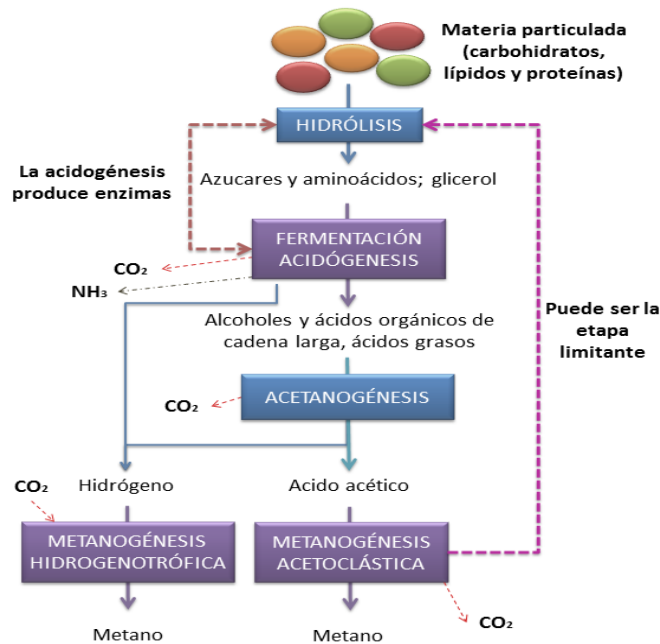


Figura 1. Etapas de la DA.

Fuente. Angelidaki *et al.*, 2011.

### 1.2.2 Variables del proceso de DA

Diferentes factores influyen sobre la DA, principalmente las características del sustrato y las condiciones de operación del proceso. El sustrato puede contener inhibidores o desarrollar compuestos tóxicos durante la digestión, que influyen directamente en el comportamiento de los microorganismos, disminuyendo así, el rendimiento del proceso.

### Relación Inóculo/Sustrato (RIS)

La RIS expresa la relación del contenido de SV del inóculo sobre SV adicionados del sustrato. Diferentes autores han demostrado que la producción de metano se reduce cuando la RIS disminuye (Zeng *et al.*, 2010; Neves *et al.*, 2004). Raposo *et al.* (2009) evidencian cómo las constantes cinéticas aparentes para la degradación

de SV y producción de metano, disminuyen significativamente al reducir la RIS desde 3 hasta 0,5; lo cual indica un fenómeno de inhibición por sustrato. Esta saturación puede generar que los niveles de AGV se eleven, provocando un efecto de inhibición en los microorganismos anaerobios (Raposo *et al.*, 2006). Un valor óptimo de RIS en el proceso de DA asegura la presencia de los tres grupos de bacterias necesarios para la biodegradación de la materia orgánica (Eskicioglu y Ghorbani, 2011).

### **Temperatura**

La DA se puede llevar a cabo en tres intervalos de temperatura: a menos de 30° C (proceso psicofílico); 30-40 °C (proceso mesofílico) y de 50-60 °C (proceso termofílico). No obstante, los microorganismos anaerobios son más activos en intervalos de temperaturas mesofílico y termofílico. En el rango termofílico se asegura la destrucción de patógenos. Sin embargo, se presenta inhibición por algunos compuestos como amonio (Campos, 2001; Hansen *et al.*, 1998). Donoso *et al.* (2009), comprobaron que la DA está fuertemente influenciada por la temperatura, en especial en la etapa de acidogénesis, en donde se presenta inhibición por acumulación de AGV a altas temperaturas. Por lo tanto es recomendable llevar a cabo la DA en el rango mesofílico (con temperatura controlada).

### **pH**

Se ha demostrado que el intervalo óptimo de pH para obtener máxima producción de biogás en la digestión anaerobia es 6,5 a 8 (Poh y Chong, 2009). El valor óptimo de pH varía con el sustrato y la técnica de digestión. Valores de pH inferiores a 4 y superiores a 9,5 puede llevar a un desequilibrio en el proceso. Debido a que la actividad de la población metanogénica es altamente vulnerable a los cambios de pH, comparada con las demás poblaciones presentes en el consorcio (Nielsen *et al.*, 2007).

### **Azúcares Reductores Totales (ART)**

El rendimiento de la etapa hidrolítica de la DA puede ser expresado por la cinética de consumo de ART. La alta concentración inicial de ART favorece el arranque del

proceso y promueve el buen funcionamiento del reactor durante el proceso de DA. Los ART son compuestos solubles que son fácilmente metabolizados por los microorganismos, permitiendo llevar a cabo las etapas de la DA (Madigan *et al.*, 2006).

### **Ácidos Grasos Volátiles (AGV)**

Los AGV son el resultado de la fase de acidogénesis y son principalmente ácido acético, propiónico y butírico (Pandey *et al.*, 2011). La inhibición de microorganismos metanogénicos se presenta por cambios en los factores ambientales o nutrientes, provocando la acumulación de AGV; ocasionando una disminución en los valores de pH (Mshandete *et al.*, 2004; Vavilin *et al.*, 2008)

### **Alcalinidad Total (AT)**

Es la capacidad del sistema para soportar y amortiguar la presencia de ácidos sin disminuir su pH. Esto ocurre por el efecto buffer generado por la presencia de iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>), carbonato (CO<sub>3</sub><sup>=</sup>) y bicarbonato (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Valores típicos de alcalinidad para estos procesos están entre 1500 y 7500 mg CaCO<sub>3</sub>/L (Castillo, *et al.*, 2007; Charles *et al.*, 2009).

### **Relación Carbono – Nitrógeno (C/N)**

La relación carbono-nitrógeno (C/N) es un indicador importante para el control de sistemas de tratamiento biológico (Wang *et al.*, 2012). Si es demasiado baja, los microorganismos no podrán metabolizar la materia orgánica, y si es demasiado alta, hay un exceso de nitrógeno que se acumula en forma amoniacal e inhibe el proceso (Hansen *et al.*, 1998). Para una degradación óptima la relación debe estar entre 25/1 y 30/1 (Wang *et al.*, 2012).

### **Toxicidad e inhibición**

Los inhibidores más frecuentes en DA son: el amonio libre, los ácidos grasos de cadena larga y el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) (Mata *et al.*, 2000). Los pesticidas, desinfectantes o antibióticos presentes en algunos residuos, pueden llegar a afectar el proceso según su concentración. Los metales pesados también son inhibidores, o tóxicos a altas concentraciones.

La concentración de amoníaco libre depende principalmente de tres parámetros: la concentración de amoniaco total, la temperatura y el pH. El aumento de estos dos últimos favorece el aumento en la concentración de amoníaco libre y por tanto la inhibición. Chen *et al.* (2008) presentan un amplio rango de concentraciones inhibitorias de nitrógeno amoniacal total, que oscila entre 1,7 y 14 g/L. La interacción entre el amoníaco libre, los ácidos grasos, y el pH puede conducir a un “estado estacionario inhibido”, en el cual el proceso se mantiene estable pero con una baja tasa de producción de metano (Angelidaki *et al.*, 1993).

## 2. METODOLOGÍA

La estrategia metodológica desarrollada, se configuró en etapas orientadas a evaluar la producción de biogás a partir de GJ. Un resumen de la metodología seguida, se expone en la figura 2.

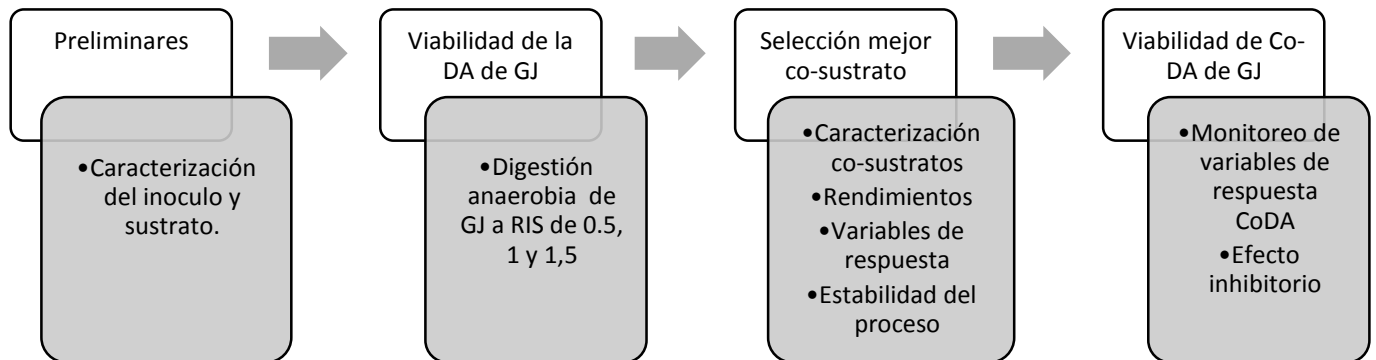


Figura 2. Metodología experimental para el desarrollo de DA y Co-DA a partir de GJ

Durante la primera etapa, se evaluó la viabilidad de la DA a distintas RIS, con el fin de determinar rendimientos y seleccionar la RIS adecuada para el proceso. En la segunda etapa, se estudió la Co-DA utilizando distintos co-sustratos, para establecer cuál de ellos representaba un aumento significativo en el rendimiento con respecto a la DA. Durante la etapa tres, se monitorearon las variables de respuestas características de la Co-DA, utilizando el co-sustrato seleccionado en la etapa anterior, con el objetivo de determinar la estabilidad del proceso. Para las dos últimas etapas se evaluó comparativamente el efecto inhibitorio por nitrógeno amoniacal en los procesos de DA y Co-DA.

### 2.1 Materiales y métodos

#### 2.1.1 Sustrato

La gallinaza de jaula (GJ) se recolectó en la granja avícola Bellavista Horizontes, ubicada en el municipio de Los Santos -Santander. El protocolo ejecutado para el muestreo se presenta en el anexo A. Se realizó una caracterización fisicoquímica a la GJ, evaluando: pH, concentración de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV),

alcalinidad (AT), concentración de AGV, concentración de amonio, humedad, y relación de carbono/nitrógeno (C/N).

### **2.1.2 Inóculo**

Se seleccionó como inóculo para la DA de GJ, el consorcio microbiano presente en el estiércol bovino (EB). El EB se recolectó en los establos del frigorífico Vijagual, Rionegro-Santander. Con el fin de contar con una fuente de inóculo homogénea y potencializada, una carga de 18 litros de EB se introdujo en un bioreactor de 23 litros con agitación intermitente cada 30 minutos, a temperatura ambiente. Se realizó una caracterización fisicoquímica al EB evaluando: pH, concentración de SV suspendidos, concentración de amonio, humedad, y densidad.

### **2.1.3 Co-sustratos**

Los co-sustratos evaluados para el proceso de Co-DA fueron: melaza de caña (MC), Lodo residual rico en albumina (LR) y aceite de oliva (AO). La selección de estos co-sustratos en específico respondió a un análisis de factores como la disponibilidad de los mismos y sus características como fuente de carbono. La MC es un efluente de la industria azucarera rico en glucosa, sacarosa, fructuosa y nutrientes minerales (PARK et al, 2010). La muestra de MC se obtuvo de un expendio de suministros agroindustriales. La muestra de LR se recolectó en la planta de tratamiento de aguas residuales producto de la clasificación de huevo, de la granja bellavista vista horizonte, se escogió como co-sustrato dado que al igual que la GJ, constituye un residuo de la industria avícola bastante disponible. Dada su estructura molecular los lípidos presentan altos rendimientos teóricos de producción de biogás (Angelidaki et al, 2011). Se selecciono el aceite de oliva (AO) como el tercer co-sustrato con el fin de comparar con estudios anteriores. La muestra usada se obtuvo de un establecimiento comercial. A los co-sustratos se les realizó un análisis fisicoquímico determinando: pH, ST, SV, ART, AGV, y nitrógeno amoniacal

#### 2.1.4 Viabilidad de la DA de GJ a distintas RIS

Se dispuso de un montaje experimental para DA en discontinuo. Se utilizaron como biodigestores botellas de vidrio de 50 mL, gaseadas con N<sub>2</sub> para garantizar condiciones de anaerobiosis. Por un periodo de 8 días, se evaluó el efecto de la RIS como variable. En cada biodigestor, se adicionó cierta cantidad de GJ a una cantidad constante de inóculo (EB), posteriormente se selló con tapón de butilo y agrafe de aluminio. Se variaron las cantidades de GJ expresadas en g SV, para obtener RIS de 0,5, 1 y 1,5. El rango de RIS seleccionado respondió a trabajos de investigación en DA, que sugerían intervalos similares para que una evaluación que abarcara los niveles de experimentación bajo, medio y alto (Castro, 2010, Raposo *et al.*, 2006). La Tabla 1 resume las condiciones de operación del montaje experimental para la selección de la RIS en un proceso de DA entre GJ y EB.

Tabla 1. Condiciones de operación para la DA a distintas RIS

Parámetro	RIS 0.5	RIS 1	RIS 1.5
Temperatura (°C)	39		
Vol. Reactor (L)	0,05		
Agitación	Intermitente		
Cantidad de EB (L)	0,016		
Cantidad de GJ (L)	0,025	0,020	0,012

La experimentación se realizó por triplicado. Se efectuó un experimento blanco, con una cantidad fija de inóculo y volumen de operación completado con agua destilada; con el fin de evaluar el comportamiento de la producción de biogás por la adición de GJ.

Para la selección de la RIS más adecuada para la DA, se tuvo en cuenta el rendimiento de producción de biogás ( $Y_{P/S}$ ), expresado en m<sup>3</sup> biogás/ kg de SV de GJ, que representara un mejor aprovechamiento del sustrato.

Durante el tiempo de operación, se cuantificaron las variables: ART, AGV, AGV/AT, pH y volumen de biogás producido, con el objetivo de monitorear la evolución y estabilidad del proceso de DA. La tabla 2 presenta las variables de respuesta del proceso, la periodicidad de medición y el método usado para realizarla.

Tabla 2. Variables de respuesta de la DA de GJ

Variable monitoreada	Unidad	Periodicidad	Método
ART	mg/mL	Cada 2 días	Colorimétrico usando ácido 3-5 dinitrosalicílico (DNS) Anexo D
AGV	mg/L	Cada 2 días	Titulación Anexo E
AT	mgCaCO <sub>3</sub> /L	Cada 2 días	Titulación Anexo E
SV	g/L	Cada 2 días	Gravimétrico Anexo F
pH	---	Cada 2 días	Potenciométrico/NTC 5167
Volumen de metano	mL	Diario	Desplazamiento alcalino Anexo G

### 2.1.5 Selección del mejor Co-sustrato

Durante esta etapa, se evaluó la interacción de la GJ con tres co-sustratos distintos: MC, LR y AO. El montaje experimental siguió el mismo patrón que para la DA, utilizando la RIS seleccionada en la etapa anterior a las condiciones de operación ya especificadas. Se mezcló cada tipo de co-sustrato en distintas proporciones volumétricas con la GJ (Tabla 3).

La tabla 3 registra las relaciones volumétricas usadas para cada mezcla y expresa dicha proporción en términos de SV.

Tabla 3. Relaciones de mezcla GJ: co-sustrato

Relación co-sustrato: GJ (Vol.)	Relación en SV co-sustrato: GJ		
	AO	MC	LR
2:98	13:87	3:97	1:99
5:95	27:73	6:94	2:98
10:90	61:39	17:83	5:95

Se decidió utilizar relaciones volumétricas para las mezclas de GJ y co-sustrato, dado a que las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de los co-sustratos, hacían imposible agregar la misma cantidad de sólidos volátiles en mezcla con la gallinaza. Sin embargo, al adicionar la misma carga orgánica de mezcla para establecer una RIS, se hizo comparable el desempeño de los co-sustratos en interacción con la GJ, en términos de los rendimientos. Para establecer la RIS, se agregó la misma cantidad de carga orgánica de mezcla GJ y co-sustrato a una cantidad fija de inóculo. Paralelamente se configuró una DA (control) de GJ y EB, con el fin de comparar su comportamiento con el de las Co-DA de GJ.

Durante 20 días, se cuantificó diariamente la producción de biogás del control y las co-digestiones. Adicionalmente en el día cero y final, se midieron las variables: pH, AGV, ART, AGV/AT y concentración de amonio.

Se seleccionó el mejor co-sustrato teniendo en cuenta el  $Y_{P/S}$  y estabilidad del proceso. Para las Co-DA, el cálculo  $Y_{P/S}$ , corresponde a la división del volumen acumulado de biogás a condiciones estándar al final del tiempo de operación entre la cantidad de mezcla GJ y co-sustrato adicionada.

### 2.1.6 Viabilidad de la Co-DA de GJ

Seleccionado el co-sustrato con mejor desempeño de rendimiento, se articuló un montaje experimental a 30 días, con la intención de evaluar la evolución y estabilidad del proceso de Co-DA. Las condiciones de operación fueron las mismas que en las etapas anteriores. Se monitorearon las variables de respuesta características de este tipo de biodegradación (tabla 2) (Angelidaki *et al.*, 2011). El monitoreo se realizó tanto para DA (control) y Co-DA.

Adicionalmente se analizó el efecto inhibitorio del nitrógeno amoniacal en la DA. Específicamente se cuantificó la concentración inicial y final de amonio, tanto para DA como para la Co-DA, en el tiempo de operación dado, estableciendo así un paralelo entre el comportamiento de dichas concentraciones para ambos procesos. La medición de las concentraciones de amonio se realizó con un electrodo selectivo, siguiendo los parámetros de los standard methods (APHA, 2001). El procedimiento realizado se detalla en el anexo H.

Los resultados experimentales fueron analizados con el software *R 3.0*. El test de Fisher's fue usado para verificar diferencias estadísticas. Valores de  $p$  inferiores a 0,05 indican que existe diferencia significativa entre los valores experimentales.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 Caracterización fisicoquímica del sustrato y el inóculo

La tabla 4 presenta la caracterización fisicoquímica del sustrato y el inóculo utilizado en la DA.

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica de la GJ y EB

Parámetro	Unidades	GJ	EB
pH	----	7,86	7,7
AGV	mg/L	6720	8640
AT	mg CaCO <sub>3</sub>	4050	8400
Sólidos totales	g/L	145,5	114,55
SV	g/L	118	85,80
Humedad	%	77,7	86,20
Densidad	g/mL	1,048	1,0246
Relación C/N	----	12,9	---
Carbono orgánico oxidable total	%	28,73	13,83

Tanto la materia orgánica disponible para la degradación, que se presenta en altas concentraciones de SV y ST, como el porcentaje de carbono orgánico oxidable total, permiten identificar en la GJ una fuente de carbono atractiva para DA. De igual forma, los altos porcentajes de humedad constituyen un medio fluido apropiado para el desarrollo microbiano (Kumar, 2008; Jewell *et al.*, 1977). Si bien la relación C/N de 12,9, es desfavorablemente baja para DA (Wang *et al.*, 2012); el uso de un inóculo adecuado y la adición de otra fuente de carbono pueden amortiguar el efecto inhibitorio.

La concentración de AGV en el EB es ligeramente superior al límite de inhibición de 8000 mg/L (Cirne *et al.*, 2007). Sin embargo, se reporta una alcalinidad elevada que actúa como amortiguador de efectos inhibitorios asociados a los AGV.

Tanto para la GJ como para el EB, el pH se encuentra en el rango de operación para el desarrollo de DA reportado en la literatura (Raposo *et al.*, 2006).

### 3.2 Viabilidad de la DA de GJ

La figura 3, describe el consumo de ART, para diferentes RIS; durante la DA de GJ y EB

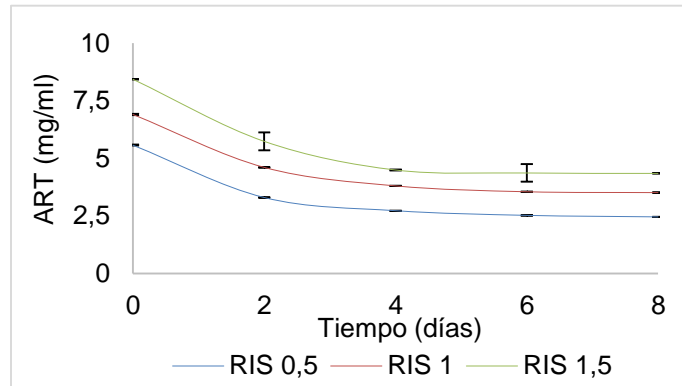


Figura 3. Consumo de ART durante la DA de GJ y EB

El comportamiento decreciente en las curvas, demarca el consumo de ART en el tiempo característico de la DA (Batstone *et al.*, 2002). La velocidad de consumo es mayor en los primeros dos días para luego estabilizarse en un valor de concentración con el tiempo; lo que denota estabilidad durante la etapa hidrolítica (Mandigan *et al.*, 2006). La concentración de azúcar en el arranque aumenta con la RIS y los porcentajes de consumo oscilan entre el 48 y 55%.

La figura 4 muestra la evolución de los AGV durante el tiempo de operación de la DA.

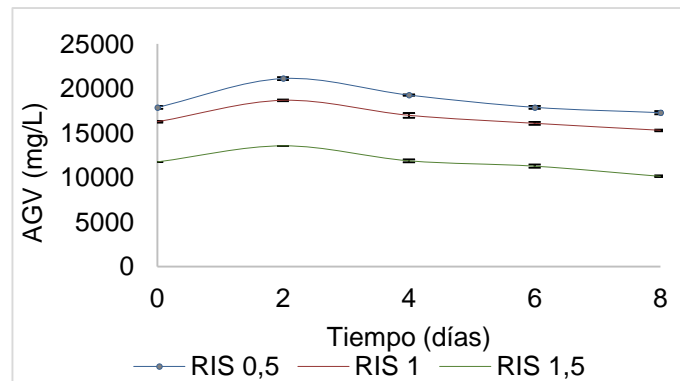


Figura 4. Evaluación de AGV durante la DA de GJ

Las curvas registran un pico de concentración máxima de AGV alrededor del segundo día, que luego disminuye; comportamiento esperado en DA (Cirne *et al.*, 2007). La disposición de las curvas permite observar, que al aumentar la RIS, las

concentraciones globales de AGV disminuyen, lo que favorece la DA. Si bien las curvas oscilan entre 10000 y 20000 mg/L, la elevada alcalinidad (13250 – 18250 mg CaCO<sub>3</sub>/L) del sistema contribuye a amortiguar el efecto inhibitor de los AGV. Las concentraciones de AGV registradas pueden deberse a la baja relación C/N del sistema. Comportamientos similares fueron reportados en estudios anteriores (Xie *et al.*, 2012; Gelegenis *et al.*, 2007).

La figura 5 muestra la estabilidad de la DA mediante el comportamiento del pH y la relación AGV/AT durante el tiempo de operación.

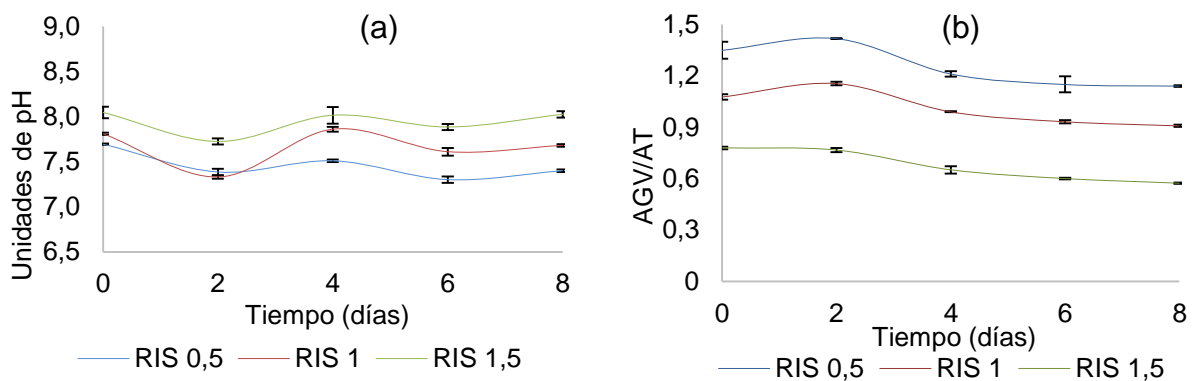


Figura 5. Variación de pH (a) y relación AGV/AT (b) durante la DA de GJ

La formación de AGV durante el arranque de la DA, incide en una disminución del pH, como se observa en la figura 5a. El pH logra estabilizarse, para las tres RIS, en un intervalo de operación aceptable, para el desarrollo de la actividad microbiana característica de la DA (Yadvoka *et al.*, 2004).

Los procesos anaerobios suelen estabilizarse en relaciones AGV/AT, en el intervalo 0,1-0,8 mg CaCO<sub>3</sub>/L. En la figura 5b, conforme aumenta la RIS, las curvas se aproximan más al intervalo de estabilidad. La RIS 1 y 0,5 presentan relaciones fuera del intervalo; comportamiento acorde con las altas concentraciones de AGV y amonio asociadas a la GJ.

La figura 6, describe la producción de biogás por DA de GJ y EB para las distintas RIS.

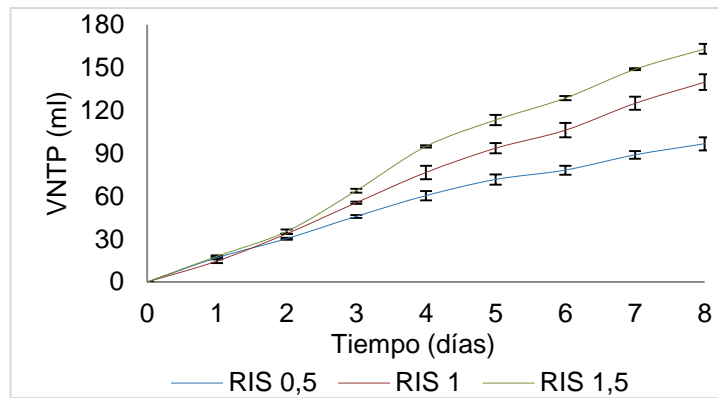


Figura 6. Producción de biogás para DA y EB a RIS de 0,5, 1 y 1,5

En la figura 6 se observa una producción regular de biogás para las diferentes RIS. Luego de un arranque de producción similar en las tres curvas, se presentan diferencias significativas en la producción a partir del tercer día. Las producciones de biogás acumuladas al final del tiempo de operación para la RIS de 0,5; 1 y 1,5 son: 96,67 mL, 139,86 mL y 163,1 mL respectivamente.

La producción de biogás disminuye con las RIS, es decir, a mayor carga orgánica adicionada, menores volúmenes de biogás se obtienen al final de la DA; tendencia reportada en estudios de DA de sustratos sólidos orgánicos (Raposo *et al.*, 2006).

En la tabla 5 se resumen los volúmenes acumulados de producción y los rendimientos ( $Y_{P/S}$ ), obtenidos para cada RIS.

Tabla 5. Rendimientos para RIS 0,5; 1 y 1,5

RIS	Vol. Acumulado de metano (L)	$Y_{P/S}$ (m <sup>3</sup> de Biogás/kg SV de sustrato)
0,5	0,097	0,035
1	0,140	0,102
1,5	0,163	0,180

Los rendimientos obtenidos variando la RIS son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%. Se obtuvieron rendimientos menores que los reportados por Salminen *et al.* (2002), para un proceso de DA de GJ. Si bien la variables monitoreadas demarcaron estabilidad en el proceso de DA, los bajos rendimientos obtenidos, evidencian una tendencia reportada en la literatura como estabilidad inhibida (Angelidaki *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2008).

La selección de la RIS se efectuó considerando no sólo la producción de biogás y la estabilidad de las variables de respuesta, sino también el mejor aprovechamiento

del sustrato. En este sentido, aunque la RIS de 1,5 reportó los mejores rendimientos, la RIS de 1 implicó el uso de una cantidad más significativa de gallinaza. Por lo que se seleccionó ésta RIS para la siguiente etapa del estudio, donde se buscó aumentar los rendimientos de biogás mediante un proceso de Co-DA, utilizando AO, MC y LR, para aportar una fuente de carbono, y diluir las concentraciones de compuestos inhibidores.

### 3.3 Selección del mejor co-sustrato

La tabla 6, presenta la caracterización fisicoquímica de los co-sustratos estudiados

Tabla 6. Caracterización co-sustratos

Co-sustrato	SV (g SV /L)	AGV (mg/L)	AGV/AT	pH
Aceite de Oliva (AO)	795,9	1500	nd	6,2
Melaza de caña de azúcar (MC)	141,3	8520	1,39	5,4
Lodo residual (LR)	30,78	1065	0,97	6,7

Las concentraciones de AGV y los SV reportados son propicios para el arranque del proceso de biodegradación anaerobia.

La figura 7 muestra los rendimientos de producción de biogás obtenidos para cada relación volumétrica (co-sustrato: GJ) de los diferentes co-sustratos comparados con la DA de GJ (Control).

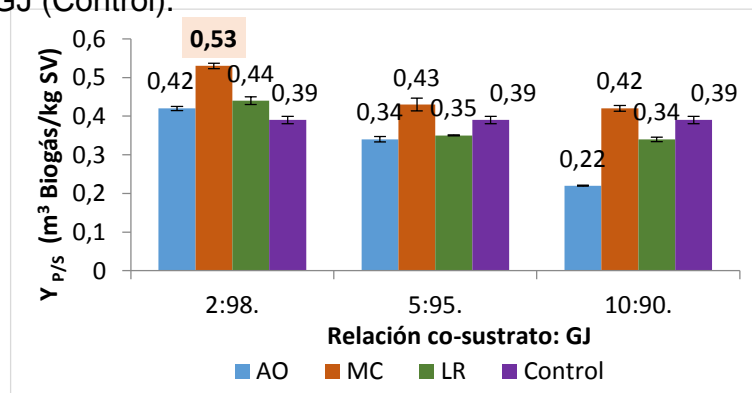


Figura 7. Rendimientos de la Co-DA de GJ con los diferentes co-sustratos

Al aumentar la relación co-sustrato:GJ disminuye el rendimiento en los procesos. En la Co-DA con LR y AO sólo la relación 2:98 presentan un rendimiento superior al control. Sin embargo la MC presenta valores superiores al control para todas las relaciones. En procesos de DA con lípidos se presenta inhibición con concentración

superiores al 28% SVAO/mezcla (Fernández *et al.*, 2005), esto explica el rendimiento obtenido en la Co-DA, teniendo en cuenta que la relación 2:95 representa 27 % SV de AO.

Los rendimientos obtenidos variando los co-sustratos y sus respectivas relaciones volumétricas con la GJ, presentan diferencias estadísticas significativas con un nivel de confianza del 95%

La tabla 7, presenta los valores de ART, AGV y rendimiento, para los distintos co-sustratos y relaciones volumétricas.

Tabla 7. Variables de respuesta y estabilidad de la Co-DA de GJ con diferentes co-sustratos

	VARIABLES DE RESPUESTA EN LAS ETAPAS DE LA Co-DA de GJ					ESTABILIDAD DE LA Co-DA de GJ			
	Hidrolítica		Acidogénica		Metanogénica	pH		AGV/AT	
	ART(mg/mL)		AGV (mg/L)		Y <sub>P/S</sub> (m <sup>3</sup> de Biogás/kg SV de sustrato)				
	t=0	t=20	t=0	t=20		t=0	t=20	t=0	t=20
<b>Control 0:100</b>	6,9	3,05	16240	10920	0,39	7,8	8	1,28	0,9
<b>AO:GJ 2:98</b>	6,7	3,07	13440	10680	0,42	7,6	8	1,13	0,85
<b>AO:GJ 5:95</b>	10,54	8,93	12840	10080	0,34	7,6	8	1,1	0,82
<b>AO:GJ 10:90</b>	15,87	13,23	14520	12240	0,22	7,5	7,8	1,33	1
<b>MC:GJ 2:98</b>	9,47	3,24	12320	8020	0,53	7,6	7,9	0,85	0,69
<b>MC:GJ 5:95</b>	10,2	6,77	14400	9080	0,44	7,7	8	1,17	0,55
<b>MC:GJ 10:90</b>	10,37	7,23	14760	7920	0,42	7,6	8,1	1,2	0,46
<b>LR:GJ 2:98</b>	5,08	3,9	13800	10440	0,43	7,8	8	1,25	0,84
<b>LR:GJ 5:95</b>	5,68	5,22	14280	9960	0,35	7,6	8	1,26	0,85
<b>LR:GJ 10:90</b>	6,11	5,61	11160	9720	0,34	7,7	8	0,99	0,83

El mayor rendimiento de biogás, con respecto al control, se presenta en la Co-DA con MC 2:98. Para esta relación, no sólo se reporta un mejor desempeño hidrolítico, evidenciado en un consumo de ART 10% mayor que el registrado para el control, sino también concentraciones más bajas de AGV e intervalos de pH y relación AGV/AT más cercanos a los rangos de no inhibición reportados en la literatura. En este sentido tanto las variables de respuesta como las de estabilidad del proceso, describen un mejor comportamiento para la Co-DA con MC:GJ 2:98.

Uno de los inconvenientes del proceso anaerobio, empleando como sustrato GJ es la presencia de iones amonios, producidos durante la degradación anaerobia de ácido úrico y proteínas (Salminen *et al.*, 2002; Abouelenien *et al.*, 2010). En la Figura 8 se muestra la variación de la concentración de nitrógeno amoniacal para la Co-DA de GJ con los diferentes co-sustratos.

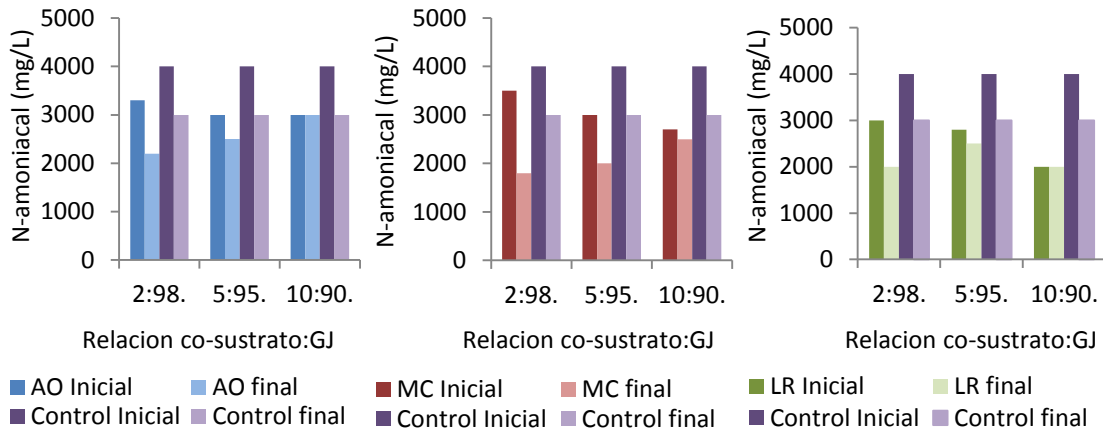


Figura 8. Concentración Inicial y final del Nitrógeno amoniacal para la Co-DA de GJ con los diferentes co-sustratos

La concentración de nitrógeno amoniacal se mantuvo en los intervalos de 2000 mg/L a 4000 mg/L. Según la literatura, valores superiores a 1700 mg/L de nitrógeno amoniacal representan inhibición para el proceso (Chen *et al.*, 2008). Sin embargo, dicha concentración puede variar de acuerdo al inóculo empleado y las condiciones de operación a las cuales se realiza la DA.

Los experimentos llevados a cabo mediante Co-DA presentan valores más bajos de amoníaco, debido a que durante este proceso, los compuestos inhibitorios se diluyen favoreciendo la evolución de la digestión. Lo anterior, se corrobora con los resultados discutidos anteriormente. De igual forma, el control presentó un porcentaje de reducción de nitrógeno amoniacal del 25% en contraste con el 33 %, 48% y 33% , registrado para las co-digestiones con AO, MC, y LR (relación volumétrica 2:98, que reportó los mayores rendimientos en cada caso) respectivamente. Lo anterior indica, que durante el proceso, no se presentó una acumulación de nitrógeno amoniacal, y por ende no se inhibió el crecimiento de los

consorcios microbianos. La mayor reducción se alcanzó para la Co-DA de GJ con melaza, lo cual es razonable, dado que este fue el experimento que alcanzó la mayor producción de biogás.

### 3.3 Viabilidad de la Co-DA de GJ.

La figura 9 muestra el comportamiento de los ART y AGV durante 30 días de operación.

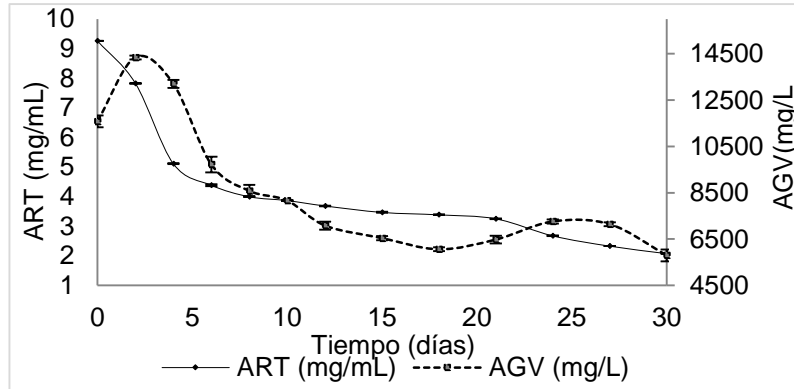


Figura 9. Evolución de consumo de ART y AGV durante la Co-DA de MC:GJ 2:98

El porcentaje de consumo de azúcares es de más del 77% y la tendencia decreciente exhibe un comportamiento acorde con el metabolismo de los microorganismos facultativos hidrolíticos (Angelidaki *et al.*, 2011). El comportamiento de los AGV es coherente con la variación de los ART, teniendo en cuenta que las etapas hidrolítica y acidogénica son simultáneas. La concentración de AGV tiende a aumentar durante los primeros días

En la figura 10 se presenta el consumo de ART Y AGV para la DA y Co-DA de la GJ.

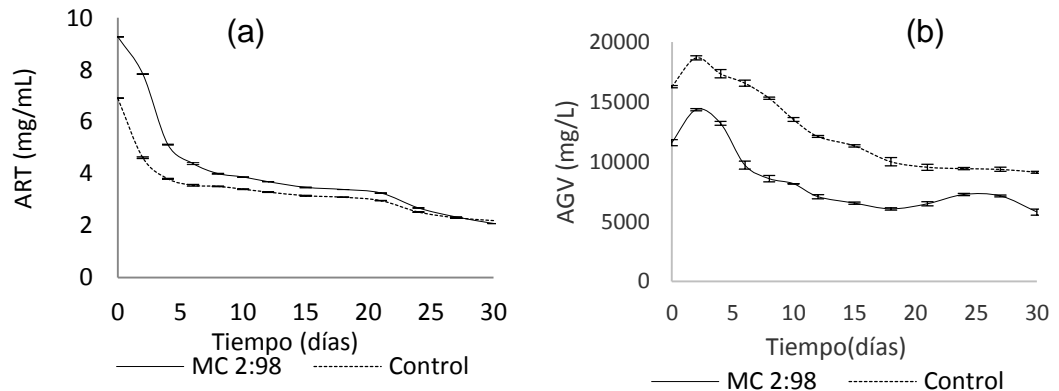


Figura 10. Consumo de ART (a) y AGV (b) durante la DA y Co-DA

La figura 10.a muestra un mejor desempeño hidrolítico para la Co-DA, con un consumo de ART del 77%, superior al 68% de consumo reportado para DA.

En la figura 10.b se observa que a partir del segundo día la DA presenta un Consumo del 50% de los AGV y la Co-Da uno del 60%. Los rangos de concentración de AGV oscilan entre 5000 y 14500 mg/L. La curva de Co-DA exhibe un intervalo de concentraciones más favorable para la acción microbiana. Los resultados obtenidos son comparables con los reportados por Niu *et al.* (2013), que mostraron producción de biogás estable con valores de AGV entre 5000 y 16000 mg/L para la DA de GJ.

La figura 11 describe el comportamiento del pH durante la DA y la Co-DA

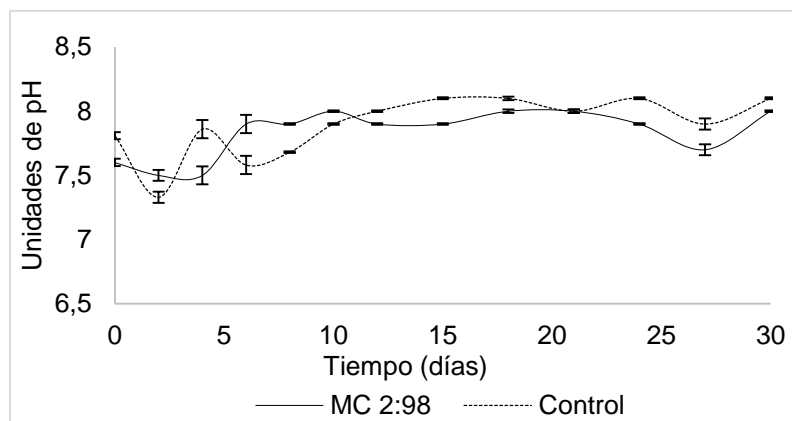


Figura 11. Comportamiento del pH durante la DA y la Co-DA. Se observa que durante la Co-DA, el sistema se estabiliza en un rango de 7,6- 8 de pH permitiendo el desarrollo de la actividad microbiana (Poh y Chong, 2009).

En la figura 12 se reporta el comportamiento de la relación AGV/AT.

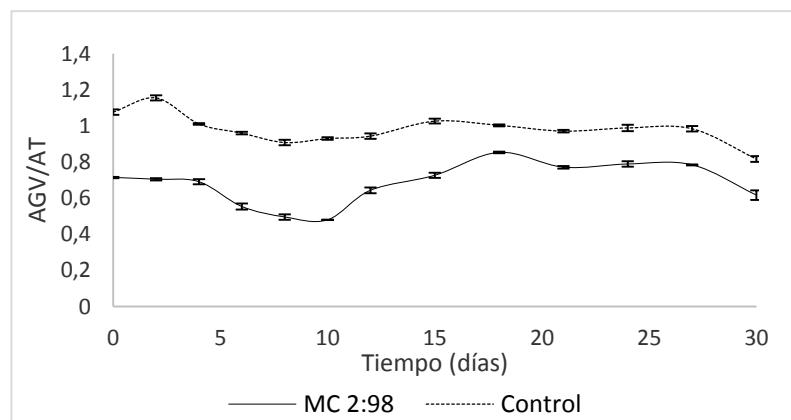


Figura 12. Variación de la relación AGV/AT durante la DA y Co-DA

La relación AGV/AT durante la Co-DA de GJ con MC está entre 0,5 y 0,8. Valores inferiores a los reportados para la DA de GJ, debido a la conversión de ácidos grasos en acetato (castro, 2012). El rango óptimo para la DA es menor que 0,4 según Callaghan *et al.* (2002) valores altos en la AT ejercieron un efecto tampón sobre el bioproceso, soportando y amortiguando la presencia de ácidos sin disminuir su pH, favoreciendo el desarrollo de los microorganismos metanogénicos. (Charles *et al.*, 2009).

En la Figura 12 se expone la producción de metano para la Co-DA de GJ con MC y la DA de GJ (control).

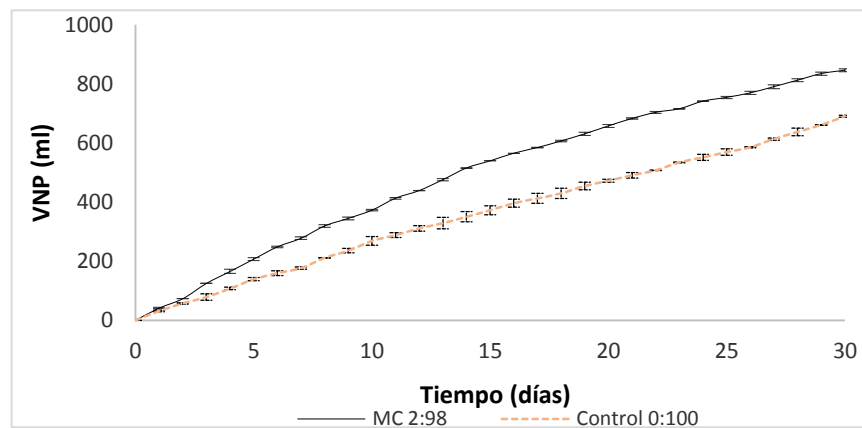


Figura 13. Producción de biogás en la Co-DA de GJ con MC

Los volúmenes de biogás reportados, en la figura 13, para la DA (control) y la Co-DA, presentan diferencias estadísticas significativas con un nivel de confianza del 95%; lo que indica que agregar MC al proceso, representa un aumento del rendimiento, estadísticamente significativo.

Las curvas ascendentes expresan una producción regular de biogás durante el proceso de DA. A partir del cuarto día la diferencia entre el control y el proceso de Co-DA es evidente. El máximo de producción es de 846,3 mL, mientras que en el control es 690,5 mL. El rendimiento de la Co-DA y el control fueron respectivamente de 0,60 y 0,49 m<sup>3</sup> biogás/kg SV, Presentándose un aumento del 23 % en el rendimiento, lo cual refleja la gran sinergia que se estableció entre los dos sustratos. En otras investigaciones se han reportado valores inferiores en la Co-DA de GJ.

Gelegenis *et al.*, (2007) obtuvieron un incremento del 10 % usando alpechín al 25 % V/V.

El aumento en el rendimiento puede analizarse a partir del comportamiento de las concentraciones de nitrógeno amoniacal en el tiempo de operación. La tabla 8, reporta las concentraciones de amonio, final e inicial, de los procesos de DA y Co-DA.

Tabla 8. Concentraciones iniciales y finales de nitrógeno amoniacal para DA y Co-DA

	NITROGENO AMONIACAL DÍA 0 (mg/L)	NITROGENO AMONIACAL DÍA 30 (mg/L)	PORCENTAJE DE REDUCCION (%)
DA (control)	4000	2500	37
Co-DA (MC :GJ 2: 98)	3600	1500	58

Los porcentajes de reducción obtenidos, corroboran que para una disminución en las concentraciones amoniacaes el sistema responde con aumentos significativos en la producción de biogás. En este sentido la Co-DA constituye una estrategia para mejorar el rendimiento y estabilidad de sistemas de biodegradabilidad anaerobia.

## CONCLUSIONES

La digestión anaerobia de gallinaza de jaula es una alternativa viable para la valoración energética de este residuo, mediante el uso de estiércol bovino como inóculo. El proceso reporta estabilidad en las variables de respuesta pero registra bajos rendimientos debido a efectos inhibitorios asociados a compuestos amoniacales.

La adición de co-sustratos disminuye la concentración de compuestos inhibidores favoreciendo la estabilidad del proceso. La co-digestión anaerobia de la gallinaza de jaula con aceite de oliva, melaza de caña de azúcar y lodo residual en relación 2:98, redujo la concentración de nitrógeno amoniacal en 33%, 48% y 33% respectivamente, superando el 25% reportado para la digestión anaerobia.

El uso de co-sustratos en relación volumétrica 2:98 (co-sustrato:Gallinaza) con la gallinaza de jaula mejoró los rendimientos de producción de biogás, siendo la melaza de caña de azúcar el co-sustrato que presentó el aumento más significativo. Reportando un incremento en la producción de biogás de 0,49 a 0,60 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/Kg sólidos volátiles de sustrato para 30 días de operación.

La co-digestión anaerobia de la gallinaza de jaula con melaza de caña de azúcar, durante 30 días de operación, mejoró la estabilidad y el rendimiento del proceso de digestión anaerobia.

## **RECOMENDACIONES**

Estudiar la co-digestión de gallinaza de jaula con melaza de caña, en operación continua, con agitación y temperatura ambiente; para establecer los parámetros de diseño que permitan su aplicación tecnológica a nivel industrial, como alternativa energética de bajo costo.

## BIBLIOGRAFÍA

ABOUELENIEN F., FUJIWARA W., NAMBA Y., KOSSEVA M., NISHIO N., NAKASHIMADA Y. *Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle*. *Bioresource Technology*, 101, 2010, 6368-6373.

ALCOSER H, MURGUÍA-CÓRDOVA J, MURGUÍA C. *Efectos de solarización y enmiendas orgánicas contra el nematodo del nudo Meloidogyne incognita bajo condiciones de vivero*. *Revista Científica Universal*, 11, 2006, 13-22.

ANGELIDAKI I., AHRING B. *Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia*. *Applied Microbiology Biotechnology*, 38, 1993, 560–564.

ANGELIDAKI I., ELLEGAARD L., *Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109, 2003, 95–105.

ANGELIDAKI I., KARAKASHEV D., BATSTONE D., PLUGGE C., STAMS A. *Biomethanation and Its Potential*. *Methods in Enzymology*, 494, 2011, 327-351.

ANGELIDAKI I., SANDERS W. *Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3, 2004, 117–129.

APHA-AWWA-WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. American Public Health Association, Washington, DC., 2001

BATSTONE D., KELLER J., ANGELIDAKI I., KALYUZHNYI S., PAVLOSTATHIS S., ROZZI A., SANDERS W., SIEGRIST H., VAVILIN V. *The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1)*. *Water Science and Technology*, 45 , 2002, 65–73.

BOROWSKI S., WEATHERLEY L. *Co-digestion of solid poultry manure with municipal sewage sludge*. *Bioresource Technology*, 142, 2013, 345–352.

- BRUNI E., JENSEN P., ANGELIDAKI I. *Steam treatment of digested biofibers for increasing biogas production*. *Bioresource Technology*, 101, 2010, 7668-7671.
- BUJOCZEK G., OLESZKIEWICZ J., SPARLING R., CENKOWSKI S. *High Solid Anaerobic Digestion of Chicken Manure*. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76, 2000, 51-60.
- BULOCK J; KRISTLANSEN B. *Anaerobic digestion*. *Basic Biotechnology*. Editor Hawakes F. y Hawakes D. Editorial Academic press, Inglaterra, 1989, 337-358.
- CALLAGHANA F., WASEA D., THAYANITHYA K., FORSTERB C. *Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure*. *Biomass and Bioenergy*, 27, 2002, 71–77.
- CAMPOS A. *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante la codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. Universidad de Lleida, Lleida, 2001.
- CASTILLO E., VERGARA M., CRISTANCHO D., ARENAS L., MARTINEZ A., HERNANDEZ M., LUNA H., CASTILLOS J., SANDOVAL C., *Digestión anaerobia una alternativa para el tratamiento de residuos sólidos urbanos*. 2007, 13-21.
- CASTRO L. *Proceso Integral para la digestión anaerobia del bagazo de fique*. *Trabajo de investigación*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.
- CHARLES, W. WALKER, L. CORD-RUWISCH, R. *Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste*. *Bioresource Technology*, 100, 2009, 2329–2335.
- CHEN Y., CHENG J., CREAMER K. *Inhibition of anaerobic digestion process: A review*. *Bioresource Technology*, 99, 2008, 4044–4064.
- CIRNE D., PALOUMET X., BJÖRNSSONA L., ALVES M., MATTIASSON B. *Anaerobic digestion of lipid-rich waste—Effects of lipid concentration*. *Renewable Energy*, 32, 2007, 965–975.

DEPPENMEIER, U. *The unique biochemistry of methanogenesis. Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology*, 71, 2002, 223–283.

DONOSO-BRAVO A., RETAMAL C. , CARBALLA M., RUIZ-FILIPPI G., CHAMY R. *Influence of temperature on the hydrolysis, acidogenesis and methanogenesis in mesophilic anaerobic digestion: parameter identification and modeling application. Water Science and technology.*, 60, 2009, 9–17.

ESCALANTE H., ORDUZ J., ZAPATA H., CARDONA M., DUARTE M., Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2010, 94.

ESKICIOGLU C., GHORBANI M. *Effect of inoculum/substrate ratio on mesophilic anaerobic digestion of bioethanol plant whole stillage in batch mode. Process Biochemistry*, 46, 2011, 1682–1687.

ESTRADA M. *Manejo y Procesamiento de la gallinaza. Revista Lasallista de Investigación*, 2, 2005, 43-48.

FANG C., BOE K., ANGELIDAKI I. *Anaerobic co-digestion of desugared molasses with cow manure; focusing on sodium and potassium inhibition. Bioresource Technology*, 102, 2011, 1005–1011.

FENAVI. Estadísticas Fenavi. 2013. Disponible en: <http://www.fenavi.org/>

FERNÁNDEZ A, SÁNCHEZ A, FONT X. Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. *Biochemical Engineering Journal*, 26, 2005, 22–28.

GAO M., LI B., YU A., LIANG F., YANG L., SUN Y. *The effect of aeration rate on forced-aeration composting of chicken manure and sawdust. Bioresource Technology*, 101, 2010, 1899–1903.

GELEGENIS J., GEORGAKAKIS D., ANGELIDAKI I., CHRISTOPOULOU N., GOUMENAKI M. *Optimization of biogas production from olive-oil mill wastewater, by codigesting with diluted poultry-manure*. Applied Energy, 84, 2007, 646–663.

GÜNGÖR-DEMIRCI G., DEMIRER G. *Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure*. Bioresource Technology, 93, 2004, 109–117.

HANSEN K., ANGELIDAKI I., AHRING B. *Anaerobic digestion of swine manure: inhibition by ammonia*. Water Research, 32, 1998, 5-12.

HUANG G., WANG X., HAN L. *Rapid estimation of nutrients in chicken manure during plant-field composting using physicochemical properties*. Bioresource Technology, 102, 2011, 1455–1461.

JEWELL W., LOEHR R. Energy recovery from animal wastes: anaerobic digestion, pyrolysis, hydrogenation. In: Animal Wastes. Applied Science Publishers Ltd., England, 1977, 273-294.

KUMAR S. *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. Principles and Applications*. Editorial Blackwell Publishing, Estados Unidos, 2008, 1-25.

LI Y., ZHANG R., CHEN C., LIU G., HE Y., LIU X. *Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions*. Bioresource Technology, 149, 2013, 406–412.

LIU C., YUAN X., ZENG G., LI W., LI J. *Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*. Bioresource Technology, 99, 2008, 882–888.

LIU Z., ZHOU X., ZHANG Y., ZHU H. *Enhanced anaerobic treatment of CSTR-digested effluent from chicken manure: The effect of ammonia inhibition*. Waste Management, 32, 2012, 137–143.

- MADIGAN M., MARTINKO J., PARKER J., BROCK. *Biología de los microorganismos*. Pearson Prentice Hall, 10, 2006, p. 151-168.
- MAGBANUA B., ADAMS T., PHILLIP J. *Anaerobic codigestion of hog and poultry waste*. *Bioresource Technology*, 76, 2001, 165-168.
- MATA-ALVAREZ J. *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. Editorial IWA, España, 2003, 1-30.
- MATA-ALVAREZ J., DOSTA J., MACÉ S., ASTALS S. *Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling*. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, 1–13.
- MATA-ALVAREZ J., MACÉ S., LLABRÉS P. *Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives*. *Bioresource Technology*, 74, 2000, 3-16.
- McKENDRY P. *Energy Production from Biomass (Part 1): Overview of biomass*. *Bioresource Technology*, 83, 2002, 37-46.
- MORGENROTH E., KOMMEDAL R., HARREMOËS P. *Processes and modeling of hydrolysis of particulate organic matter in aerobic wastewater treatment – a review*. *Water Science and Technology*, 45, 2002, 25–40.
- MSHANDETE A., KIVAISI A., RUBINDAMAYUGI M., MATTIASSON BO. *Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes*. *Bioresource Technology*, 95, 2004, 19–24.
- NEVES L., OLIVEIRA R., ALVES M. *Co-digestion of cow manure, food waste and intermittent input of fat*. *Bioresource Technology*, 100, 2009, 1957–1962.
- NIELSEN H., UELLEND AHL H., AHRING B. *Regulation and optimization of the biogas process: propionate as a key parameter*. *Biotechnology and Bioengineering*, 31, 2007, 820–830.

NIU Q., QIAO W., QIANG H., HOJO T., LI Y. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: Stability, inhibition and recovery. *Bioresource Technology*, 137, 2013, 358–367.

PALATSI J, LAURENI M, ANDRÉS M.V, FLOTATS X , NIELSEN H., ANGELIDAKI I. *Strategies for recovering inhibition caused by long chain fatty acids on anaerobic thermophilic biogas reactors*. *Bioresource Technolgy*, 100, 2009, 4588–4596.

PANDEY P., NDEGWA P., SOUPIR M., ALLDREDGE R., PITTS M. *Efficacies of inocula on the startup of anaerobic reactors treating dairy manure under stirred and unstirred conditions*. *Biomass and bioenergy*, 35, 2011, 2705- 2720.

PASTOR L., RUIZ L., PASCUAL A., RUIZ B. *Co-digestion of used oils and urban landfill leachates with sewage sludge and the effect on the biogas production*. *Applied Energy*, 107, 2013, 438–445.

PAVLOSTATHIS S.G., GIRALDO-GÓMEZ E. *Kinetics of anaerobic treatment*. *Water Science & Technology*, 24, 35–59.

PÉREZ M., VILLEGAS R. *Procedimiento para de manejo de residuos orgánicos avícolas*. Universidad de Antioquia, Medellin, 2009.

POH.P, CHONG. M. *Development of anaerobic digestion methods for palm oil*. *Bioresource Technology*, 100, 2009, 1–9.

RAPOSO F., BANKS C., SIEGERT I., HEAVEN S., BORJA R. *Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests*. *Process Biochemistry*, 41, 2006, 1444–1450.

RAPOSO F., BORJA F., MARTÍN M., MARTÍN A., RINCÓN B. *Influence of inoculum–substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation*. *Chemical Engineering Journal*, 149, 2009, 70–77.

REVISTA SEMANA. *El sector con más alas*, 2011. Disponible en: <http://www.semana.com/especiales/articulo/el-sector-mas-alas/246808-3>.

RIVERA H., MALAVER J., PEÑA K., MALAVER N., MALAVER M. *Perdurabilidad empresarial: el caso del sector avícola en Colombia*. Editorial Universidad del Rosario, 2012, 6-8.

ROSALES N., BERMÚDEZ J., MORONTA R., MORALES E. *Gallinaza: un residual avícola como fuente alternativa para producción de biomasa microalgal*. Revista Colombiana de Biotecnología, 9, 2007, 41-48.

SALMINEN E., RINTALA J. *Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading*. Water Research, 36, 2002, 3175–3182.

SIERRA A. *Obtención de biogás a partir de gallinaza producida en la granja Bellavista-Horizontes a servicio de incubadora Santander s.a*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 2013.

SKOULOU V., ZABANIOTOU A. *Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production Renewable and Sustainable*. Energy Reviews, 11, 2007, 1698–1719.

TIQUIA S., TAM NORA. *Characterization and composting of poultry litter in forced-aeration piles*. Process Biochemistry, 37, 2002, 869–880.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANISATION (UNIDO), INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER (IFDC). *Fertilizer manual*. Kluwer Academic Publishers. 1979, 84-89.

VAVILIN V., FERNANDEZ B., PALATSI J., FLOTATS X. *Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview*. Waste Management, 28, 2008, 939–951.

WANG X., GAIHE Y., FENG Y., REN G., HAN X. *Optimizing feeding composition and carbon–nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic co-digestion of dairy, chicken manure and wheat straw*. *Bioresource Technology*, 120, 2012, 78–83.

WHITMORE A. P. Determination of the mineralization of nitrogen from composted chicken manure as affected by temperature. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 77, 2007, 225-232.

XIE S., WUB G., LAWLOR P., FROST J., ZHAN X. *Methane production from anaerobic co-digestion of the separated solid fraction of pig manure with dried grass silage*. *Bioresource Technology*, 104, 2012, 289–297.

YADVIKA., SANTOSH., SREEKRISHNAN T., KOHLI S., RANA V. *Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques -a review*. *Bioresource Technology*, 95, 2004, 1–10.

ZENG S., YUANA X., SHIA X., QIUA Y. *Effect of inoculum/substrate ratio on methane yield and orthophosphate release from anaerobic digestion of Microcystis spp.* *Journal of Hazardous Materials*, 178, 2010, 89–93.

## ANEXOS

### Anexo A. Protocolo para la recolección de muestras de gallinaza de jaula

#### **Materiales:**

- Bolsa plástica con cierre hermético.
- Cinta de enmascarar.
- Espátula.
- Recipientes plásticos de dos litros.
- Guantes de látex.
- Marcadores permanentes.
- Nevera de Icopor.
- Tapa bocas.

#### **Procedimiento**

Para la toma de muestras de gallinaza se deben realizar antes de ser llevada a la planta de abonos; preferiblemente en la jornada de la mañana.

1. Con la espátula tomar las muestras de gallinaza hasta llenar la totalidad de las bolsas y cerrar inmediatamente.
2. Rotular las bolsas con las muestras con lugar y fecha de la toma de muestra.
3. Trasladar las muestras hasta el laboratorio en las cabas.
4. En el laboratorio envasar las muestras en recipientes plásticos y refrigerar.

Anexo B. Caracterización fisicoquímica de la gallinaza de jaula

<b>Análisis de Control de Calidad</b>		Muestreo	2013-04-09
		Recepción	2013-04-09
		Análisis	2013-04-18
No. CCF	<b>15423</b>	Orden de T. #	<b>48388</b>

EMPRESA	Incubadora Santander S.A.	IDENTIFICACION	Estiercol
DIRECCION	Cra 28 No 53-58	DESCRIPCION	Estiercol
CIUDAD	Bucaramanga	CARACTERISTICAS	Producto húmedo color café oscuro
NIT	890200474-5	OTROS DATOS	Granja Caloto
		Procedencia:	BUCARAMANGA    SANTANDER

**REPORTE EN BASE SECA**

**METODOS ANALITICOS**

N_TOTAL	2.23	% P/P
Carbono Total	28.73	% P/P
Hidrogeno Total	4.31	% P/P
Oxigeno Total	31.78	% P/P

SUMA DE NITROGENOS
Ver Nota
Ver Nota
Ver Nota

NOTA: Analisis Relacionados: I BC 46 Fibra detergente neutro gravimetria; I BC 47 Fibra detergente acida gravimetria; I BC

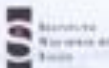
*Diana Rocio Garcia Millan*  
Jefe Control de Calidad; T.P. 15165

*Felipe Calderón Sáenz*  
Director General; T.P. 3186

	<b>LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	<b>Código:</b> F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	<b>Versión:</b> 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>Fecha:</b> 2012/01/16 <b>Página:</b> 1 de 2	



\*Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 8409 de 2011, en los parámetros pH, DBO, DQO, EST, Amonio, SLM, grises y azules en aguas, aceites, lodos y efluentes en aguas, metales pesados en aguas y lodos de muestras procedidas y compostadas\*



\*Autorización del Ministerio de la Protección Ambiental, mediante la resolución 2034 de 2010, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano\*

<b>Informe de resultados No.</b>	12-360	<b>Fecha de emisión:</b>	Julio 27 de 2012
<b>Cliente:</b>	INCUBADORA DE SANTANDER S.A		
<b>Dirección del cliente:</b>	Km 5 Vía Palenque Café Madrid		
<b>Solicitud de servicio No.</b>	12-343	<b>No. de muestras:</b>	01
<b>Fecha de recepción de las muestras:</b>	Junio 26 de 2012		
<b>Muestras recibidas por:</b>	Johanna Riveros		
<b>Fecha de análisis:</b>	Junio 26 de 2012 - Julio 27 de 2012		

### 1. ANALISIS FISICOQUIMICO


<b>Codificación de la Muestra:</b>	12-343-01	<b>Tipo de muestra:</b>	Puntual
<b>Identificación de la muestra:</b>	Galpón 8 Edad 102 semanas		
<b>Matriz de la muestra:</b>	Gallinaza		
<b>Muestreo realizado por:</b>	El Cliente		
<b>Lugar y punto de muestreo:</b>	Granja Bellavista / Galpón 8		
<b>Fecha del muestreo:</b>	Junio 26 de 2012		

PARAMETRO	RESULTADO	NTC 5167	MÉTODOS/ NORMA
pH (Unidades de pH)	7,85	4-9	Potenciométrico/ NTC 5167
Humedad (%)	77,7	20-35%	Gravimétrico/ NTC 5167
Cenizas (%)	7,28	Máximo 60%	Gravimétrico/ NTC 5167
Nitrógeno (%N)	1,7	>1%	Kjeldhal-Titrimétrico/ NTC 5167
Fósforo (%P)	0,45	>1%	Espectrofotométrico/NTC 5167
Sodio (%Na)	0,098	---	Absorción Atómica/ NTC 5167
Potasio (%K <sub>2</sub> O)	1,21	>1%	Absorción Atómica/ NTC 5167
Calcio (%CaO)	4,94	---	Absorción Atómica/ NTC 5167
Magnesio (%MgO)	0,20	---	Absorción Atómica/ NTC 5167
Hierro (%Fe)	0,028	---	Absorción Atómica/ NTC 5167
Cobre (%Cu)	0,001	---	Absorción Atómica/ NTC 5167
Cinc (%Zn)	0,010	---	Absorción Atómica/ NTC 5167
Manganeso (%Mn)	0,002	---	Absorción Atómica/ NTC 5167
Azufre (%S)	0,092	---	Espectrofotométrico/ NTC 5167
Pérdidas por Volatilización (%)	14,6	---	Gravimétrico/ NTC 5167
Boro (%B)	<L.D	---	Espectrofotométrico/ NTC 5167

\* La suma de estos parámetros debe ser 100

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222  
 Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009  
 Página web: <http://ciencias.us.edu.co/icc/> E-mail: [laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co](mailto:laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co)  
 Bucaramanga - Colombia

## Anexo C. Caracterización fisicoquímica del estiércol bovino

	<b>LABORATORIO QUIMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES</b>	Código: F-PA-02	
	<b>POST-ANALITICO</b>	Versión: 05	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	Fecha: 2012/01/16 Página 1 de 2	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1659 de 2011, en los parámetros pH, DBO<sub>5</sub>, DQO, SST, fenoles, SAAM, grasas y aceites en aguas, metales totales y disueltos en aguas, metales totales en suelos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 5534 de 2010, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-13-101	Fecha de emisión:	Marzo 20 de 2013
Cliente:	INCUBADORA DE SANTANDER S.A		
Dirección del cliente:	Km 5 Vía Palenque Café Madrid		
Solicitud de servicio No.	13-071	No. de muestras:	01
Fecha de recepción de las muestras:	Febrero 28 de 2013		
Muestras recibidas por:	Johanán Riveros		
Fecha de análisis:	Febrero 28 de 2013 – Marzo 20 de 2013		

### 1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	13-071-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	Muestra de Estiércol de Bovino		
Matriz de la muestra:	Estiércol de Bovino		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	No Suministrado / No Suministrado		
Fecha del muestreo:	Febrero 28 de 2013		

PARAMETRO	RESULTADO		METODO/ NORMA
pH (Unidades de pH)	8,45	4- 9	Potenciométrico/ NTC 5167
Humedad (%)	86,20	20-35%	Gravimétrico/ NTC 5167
Cenizas (%)	2,68	Máximo 60%	Gravimétrico/ NTC 5167
Carbono Orgánico Oxidable Total (%C)	13,83	Mínimo 15%	Titrimétrico/ NTC 5167
Nitrógeno (%N)	0,24	>1%	Kjeldhal-Titrimétrico/ NTC 5167
Fósforo (%P)	0,11	>1%	Espectrofotométrico/NTC 5167
Calcio (g Ca/Kg)	32,26	----	Absorción Atómica/ NTC 5167
Cobre (mg Cu/Kg )	49,05	----	Absorción Atómica/ NTC 5167
Magnesio (g M /Kg)	19,06	----	Absorción Atómica/ NTC 5167
Potasio (g K/ Kg)	87,42	>1%	Absorción Atómica/ NTC 5167
Sodio (gNa/Kg)	87,52	----	Absorción Atómica/ NTC 5167
Hierro (g Fe/Kg)	5,60	----	Absorción Atómica/ NTC 5167
Zinc (gZn/Kg)	6,69	----	Absorción Atómica/ NTC 5167
Manganeso (g Mn/Kg)	1,69	----	Absorción Atómica/ NTC 5167
Azufre (%S)	3,23	----	Espectrofotométrico/ NTC 5167
Pérdidas por Volatilización (%)	5,35	----	Gravimétrico/ NTC 5167
Sólidos Suspendidos Totales (mg/Kg)	3339	----	Filtración con Membrana /Gravimétrico

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222

Conmutador: (7) 6344000 Ext. 2465. Telefax: (7) 6349009

Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: [labquimco@gmail.com](mailto:labquimco@gmail.com);

[laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co](mailto:laboratorioquimicodeconsultas@uis.edu.co)

Bucaramanga - Colombia

Anexo D. Determinación de la concentración de azúcares reductores totales (ART)  
El método DNS o del ácido 3-5 dinitrosalicílico es un método colorimétrico, desarrollado para la cuantificación de azúcares reductores.

**Materiales y Reactivos:**

- Agua destilada.
- DNS.
- Hielo.
- Micropipeta.
- Tubos de ensayo.
- Espectrofotómetro.

**Reactivo DNS**

- Mezclar y disolver en 250 ml de agua destilada 8 g de NaOH y 150 g de tartrato sodio potasio.
- Se agregan 5 g de ácido dinitrosalicílico.
- Aforar a 500 mL con agua destilada.
- Almacenar a temperatura ambiente y proteger de la luz.

**Procedimiento**

1. Tomar una muestra aproximadamente de 10 mL en tubos falcon de 15 mL.
2. Centrifugar las muestras por 15 minutos a 10000 rpm.
3. Llevar el sobrenadante a otro falcon.
4. Medir 4 ml del sobrenadante y llevarlo a un tubo de ensayo.
5. Agregar 2 mL de agua destilada al sobrenadante y luego 4 mL de DNS.
6. Dejar en baño con agua en ebullición durante 5 minutos.
7. Detener la reacción en un baño de hielo.
8. Agregar 4 mL de agua destilada, y dejar reposando durante 15 minutos.
9. Calibrar el equipo usado un blanco obtenido en el procedimiento anterior pero agregando agua destilada en lugar de muestra.

10. Leer la densidad óptica a 540 nm de la muestra. Usando la curva estándar de glucosa hallar las concentraciones de ART.

### **Curva estándar de glucosa**

Se preparan las muestras de glucosa con concentraciones conocidas, se aplica el método DNS y se lee su absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 540 nm.

Con los datos obtenidos se traza un gráfico lineal de la concentración de glucosa (azúcar reductor) como una función de absorción, y así se determina la ecuación que relaciona las dos cantidades.

## Anexo E. Determinación de la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT)

### **Materiales:**

- Vaso de precipitado de 100 ml.
- Probeta de 25 ml.
- Centrífuga.
- pH-metro.
- Agitador magnético.
- Plancha de agitación magnética.
- 2 Balones esmerilados de fondo redondo o plano.
- Condensador.
- Plancha de calentamiento.
- 2 Buretas.
- Soporte de plancha.
- Soporte universal.
- Pinzas con nuez.
- Solución de NaOH al 0,1 N.
- Solución de HCl al 0,1 N.

### **Procedimiento**

1. Tomar una muestra aproximadamente de 40 mL en tubos falcom de 50 mL.
2. Centrifugar las muestras por 30 minutos a 5000 rpm.
3. Llevar el sobrenadante a frascos plásticos, medir pH y registrar el valor.
4. Medir 5 ml del sobrenadante y llevarlo a un vaso de precipitado de 100 ml.
5. Medir en una probeta 25 ml de agua destilada y agregarla a los 5 ml de sobrenadante.

6. Titular con una solución previamente preparada de HCl 0,1 N hasta alcanzar un pH de 3 y registrar volumen (V1), manteniendo agitación continúa.
7. Llevar la muestra a un balón esmerilado, adaptarlo al condensador.
8. Calentar hasta ebullición y mantener por 2 minutos.
9. Titular con una solución previamente preparada de NaOH 0,1 N hasta alcanzar un pH de 6,5, registrar el volumen (V2).

### Cálculos

$$\text{Alcalinidad Total (AT)} = \frac{V1 * N_{\text{HCl}} * 50000}{5} \quad \left[ \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]$$

$$\text{AGVT} = \frac{V2 * N_{\text{NaOH}} * 60000}{5} \quad \left[ \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right]$$

$N_{\text{HCL}}$  = Concentración de ácido clorhídrico (Normalidad).

$N_{\text{NaOH}}$  = Concentración de hidróxido de sodio (Normalidad).

V1 = Volumen de HCL para llevar la muestra a pH 3 (mL).

V2 = Volumen de NaOH para llevar la muestra a pH 6,5 (mL).

## Anexo F. Determinación de sólidos totales fijos y volátiles en muestras sólidas y semisólidas.

Este método se aplica a la determinación de sólidos totales y fracciones volátiles en muestras sólidas y semisólidas como lodos aislados en procesos de tratamientos de aguas limpias y residuales entre otros.

### **Materiales:**

- Placas de evaporación.
- Horno de mufla para operar a  $550 \pm 50^\circ\text{C}$ .
- Desecador provisto de un descante que contiene un indicador colorimétrico de concentración de humedad.
- Horno de secado operaciones  $103-105^\circ\text{C}$ .
- Balanza de análisis.
- Crisoles.

### **Procedimiento:**

1. Pesar un crisol (P1), previamente secado (1 día en el horno de secado).
2. Tomar una muestra de 40 mL en el crisol.
3. Trasladar la muestra al horno de secado por 24 horas. Después durante 10 minutos dejarla muestra en el desecador para equilibrar la temperatura y pesar (P2).
4. Incinerar la muestra en un horno de mufla a  $550^\circ\text{C}$  durante una hora.
5. Dejar en el desecador por 10 minutos y pesar (P3)

### **Cálculos:**

$$\text{Sólidos Totales} = \frac{(P2 - P1)}{40} \quad \left[ \frac{\text{g}}{\text{L}} \right]$$

$$\text{Sólidos Volátiles} = \frac{(P2 - P1)}{40} \quad \left[ \frac{\text{g}}{\text{L}} \right]$$

P1=peso del crisol (g). P2=peso del crisol después de secar la muestra (g).  
P3=peso del crisol después de ser incinerada la muestra (g).

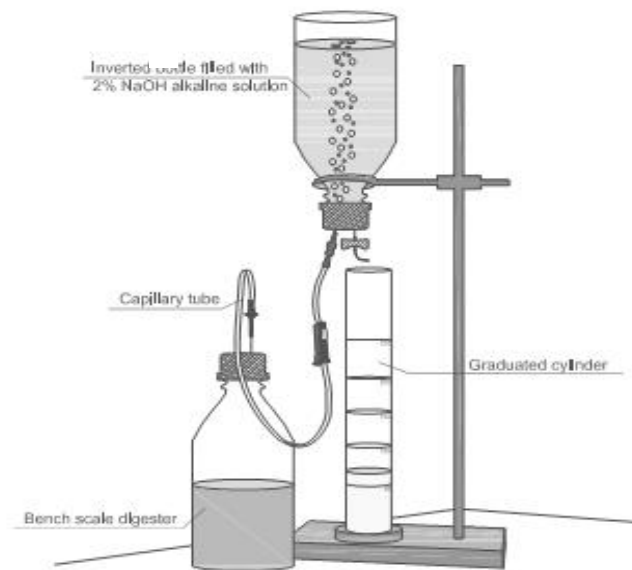
## Anexo G. Método de desplazamiento alcalino

### Materiales:

- Biodigestor anaerobio.
- Solución 0,1 N NaOH.
- Fenolftaleína.
- Mangueras y agujas.
- Recipiente colector de 1L.

### Procedimiento:

Cada reactor se conecta con la botella de desplazamiento alcalino por medio de una red de mangueras de plástico y agujas como se muestra en el esquema. El biogás producido en el reactor se burbujea en la solución alcalina con fenolftaleína como indicador y pH mayor que 12, en la cual el  $\text{CO}_2$  es absorbido y el volumen de gas metano desplaza un volumen igual de la solución alcalina. El volumen de la solución desplazada fuera de la botella en el recipiente colector es equivalente al volumen de metano y otros gases en menor proporción generados por el sistema.



Esquema de montaje para la medición de volumen de metano.

Calculo del volumen de biogás a condiciones normalizadas (VNTP).

Para poder comparar las producciones de biogás y por lo tanto el redimiendo, es necesario llevar el volumen de biogás a condiciones normalizadas.

$$VNTP = V \frac{(P_{atm} - P_V) * T_0}{P_o * T}$$

$V$  = Volumen de gas generado (mL).

$P_{atm}$  = Presión atmosférica.

$T_0$  = Temperatura estándar 273,15 (K).

$P_o$  = Presión estándar 1013.25 (mbar).

$P_V$  = Presión de vapor del agua.

$$P_V = 10 * e^{\left(16.573 - \frac{3988.842}{T(K) - 3947}\right)}$$

$T$  = Temperatura al momento de medir (K).

## Anexo H. Determinación del N-Amoniacal

### **Materiales**

- Vaso de precipitado de 100 mL.
- Centrífuga.
- Electrodo selectivo de amoniac.
- Agitador magnético.
- Plancha de agitación magnética.
- Solución ISA (hidróxido de sodio - Etanol)

### **Procedimiento**

Con anterioridad se debe verificar el equipo y realizar la curva de calibración, de acuerdo al manual.

1. Tomar una muestra aproximadamente de 40 mL en tubos falcom de 50 mL.
2. Centrifugar las muestras por 30 minutos a 5000 rpm.
3. Llevar el sobrenadante a un falcom.
4. Medir 25 ml del sobrenadante y llevarlo a un vaso de precipitado de 100 mL
5. Agregar 5 mL de la solución ISA (hidróxido de sodio+metanol); agitar continuamente
6. Sumergir el electrodo en la muestra por 3 minutos para obtener lecturas estables.

### **Curva de calibración**

Preparar soluciones de 1, 10, 100 y 1000 mg/L de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

Disponer el equipo en modo calibración.

Medir 25 mL de la solución y agregar a cada una 3 mL de ISA; agitación continúa. Sumergir el electrodo en el nivel de concentración más baja y la mezcla con un agitador magnético. Medir la concentración de N-amoniaco, para cada concentración. El equipo asocia un mV para cada concentración y realiza la curva.

## Anexo I. Registro fotográfico



**Muestreo Gallinaza de jaula**



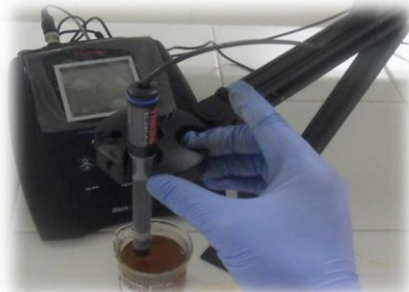
**Bioreactor utilizado para potenciar el inóculo**



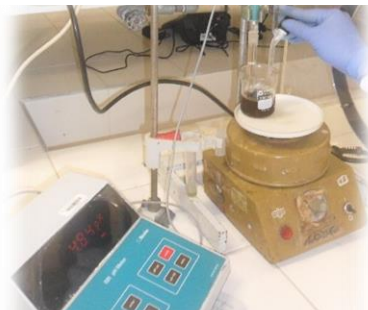
**Incubación de biodigestores**



**Medición de los Azúcares Reductores**



**Medición de nitrógeno amoniacal**



**Determinación de pH, AT,**



**Medición biogás por desplazamiento**