

## PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**TÍTULO: Determinación del potencial de biogás de diferentes sustratos para la codigestión anaerobia con excretas animales**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Gestión Ambiental

**SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Desarrollo Sostenible: Procesos sostenibles para la generación de energía empleando Fuentes No Convencionales de Energías Renovables - FNCER

**DURACIÓN:** Agosto 2018 – Julio 2020

**LUGAR DE REALIZACIÓN:** Villavicencio, Departamento del Meta:

- Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio, Facultad de Ingeniería Ambiental

- Universidad de Los Llanos. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

**INVESTIGADOR PRINCIPAL:** Christian José Rojas Reina, CE 658.867, Ingeniero Químico, Facultad Ingeniería Ambiental. Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio.

**CONFORMACIÓN DE LA ALIANZA DE INVESTIGACIÓN:**

1. Grupo Gestión Ambiental USTA Villavicencio -GAUV, código Colciencias COL0159731
2. Grupo Ciencia Tecnología e Innovación Agroindustrial - CITIA, código Colciencias COL0145511

**Investigador Principal:** Christian José Rojas Reina, CE 658.867: Ingeniero Químico, Maestría en Ingeniería Sanitaria, Doctorado en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería Ambiental USTA Villavicencio. Función en el proyecto: Coordinación/Trabajo de Laboratorio (12 horas/semana)  
Contacto: [christian.rojas@usantotomas.edu.co](mailto:christian.rojas@usantotomas.edu.co)

**Coinvestigador:** Henry Contreras León, CC 13.567.867: Ingeniero Ambiental. Especialización en Química Ambiental. Facultad de Ingeniería Ambiental, USTA Villavicencio.  
Función en el proyecto: Trabajo Experimental de Campo – 3 cosustratos (4 horas/semana)  
Contacto: [henrycontrerasl@usantotomas.edu.co](mailto:henrycontrerasl@usantotomas.edu.co)

**Coinvestigador:** Yésica Natalia Mosquera Beltrán, CC 53.031.010: Ingeniero Químico. Maestría en Hidrosistemas. Facultad de Ingeniería Ambiental, USTA Villavicencio.  
Función en el proyecto: Procesamiento de Datos y Evaluación (4 horas/semana)  
Contacto: [yesica.mosquera@usantotomas.edu.co](mailto:yesica.mosquera@usantotomas.edu.co)

**Coinvestigador:** María Patricia Rodríguez Rojas, CC 1.123.421.367: Ingeniero Químico, Doctorado en Ingeniería de Procesos y Ambiente. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Escuela de Ingeniería en Ciencias Agrarias. Programa de Ingeniería Agroindustrial, Unillanos.  
Funciones en el proyecto: Trabajo de Laboratorio – Reactor semi continuo /Biodigestor rural (8 horas/semana)  
Contacto: [mprodriguez@unillanos.edu.co](mailto:mprodriguez@unillanos.edu.co)

## **Antecedentes y Trayectoria de los Grupos involucrados**

Los Grupos de Investigación involucrados presentan experiencia y resultados previos en el área de digestión anaerobia. El Investigador Christian J. Rojas Reina realizó su Doctorado en la Universidad Técnica de Hamburgo en el Tema de biodigestión de diferentes tipos de sustratos y su modelamiento matemático, con relevantes publicaciones en el tema. Como Coordinador del Grupo GAUV-USTA Villavicencio dirige proyectos internos de investigación concernientes a la generación de energía a partir de FNCER para disminuir los gases de efecto invernadero. Entre estos se encuentra el aprovechamiento de residuos animales del bioparque Los Ocarros de Villavicencio para producir biogás y la creación de un modelo del sistema anaerobio adaptado a las condiciones regionales. El segundo integrante del Grupo GAUV, Henry Contreras León ha trabajado con proyectos de biodigestores rurales en la Penitenciaría de Mínima Seguridad de Acacias – Meta y la Escuela Agropecuaria Guacavía. La Ingeniera Natalia Mosquera tiene experiencia en la presentación de datos experimentales para expresar tendencias desde el punto de vista de la bioquímica.

La investigadora María Patricia Rodríguez Rojas realizó su Doctorado de Ingeniería de Procesos y Ambiente en el Instituto Nacional Politécnico de Toulouse en el Tema de agitación y mezclado de emulsiones y eficiencia de reactores. Desde su incorporación a la Universidad de los Llanos en el Grupo de Investigación “Ciencia Tecnología e Innovación Agroindustrial” ha trabajado en proyectos relacionados al aprovechamiento de residuos provenientes de la Agroindustria. Actualmente trabaja en un censo de biodigestores rurales en el Departamento del Meta y el aprovechamiento de residuos como la cáscara de cacao a través de la digestión anaerobia para disminuir su impacto ambiental.

Por consiguiente las perspectivas de la alianza son encontrar los residuos agrícolas con mayor potencial de producir biogás en el actual panorama productivo/agrícola de Colombia.

## **RESUMEN**

El presente trabajo se encuentra enmarcado dentro de una amplia investigación sobre los desechos agrícolas producidos en las regiones agroindustriales colombianas, con la finalidad de aprovechar los mismos para la producción de biogás y disminuir los efectos de los gases de efecto invernadero. En la mayoría de los casos el potencial energético de estos residuos es desperdiciado al ser usado como material de combustión, lo que incrementa los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, como ocurre en la industria arrocera con la cascarilla de arroz por ejemplo. Estos residuos al estar constituidos por una gran proporción de carbohidratos (50-70 %, restos de cacao, arroz, plátano, etc) o de lípidos (residuos de la industria de palma), y al no haber pasado por un proceso de digestión animal, presentan un alto contenido de biomasa orgánica disponible para el proceso de digestión anaerobia. Al emplearse como co-sustrato en un biodigestor operado con excretas animales, como ocurre actualmente en los biodigestores rurales instalados en Colombia, se incrementaría considerablemente la producción de biogás,

así como su calidad (% CH<sub>4</sub>) y al mismo tiempo se evitaría la producción de CO<sub>2</sub> por la combustión de los mismos.

Con este objetivo se realizarán pruebas en el laboratorio para obtener curvas diarias y acumulativas de producción de biogás a diferentes concentraciones en reactores tipo batch. Posteriormente se realizarán pruebas con el sustrato a una escala piloto, para evaluar otros factores de la operación continua. De esta forma se determinará el potencial específico de biogás expresado en m<sup>3</sup> Biogás producido por Kg Sólidos Volátiles del Sustrato (m<sup>3</sup>/Kg SV), así como el tiempo de digestión en las condiciones locales, previo al uso en biodigestores actualmente en operación.

**PALABRAS CLAVES:** Biogás, Digestor, Proceso anaerobio, Energías Renovables, Desechos Agrícolas

## **OBJETIVO**

- Determinar la factibilidad del uso de diferentes residuos de la industria agrícola en Colombia como cosustrato para la codigestión con excremento porcino para la producción de biogas y disminución de su carga contaminante.

### **Objetivos Específicos:**

- Determinación del potencial de biogás (m<sup>3</sup>/Kg SV) de los diferentes residuos de la industria agrícola colombiana: cascarilla de arroz, residuos del cultivo de cacao, residuos de soja, residuos de piña, residuos de Sacha inchi, residuos de Cacay, plátano entre otros.
- Caracterización de las propiedades físicoquímicas y composición de los residuos agrícolas en estudio en función de su implementación como cosustrato en la codigestión anaerobia con excretas porcinas.
- Análisis de los problemas que puedan ocasionar los cosustratos en estudio en la digestión semicontinua con excretas porcinas en un reactor a escala piloto.
- Utilización de los cosustratos con mejores resultados en los experimentos a escala de laboratorio y piloto en biodigestores de uso rural.

## **NOVEDAD DEL PROYECTO**

La novedad del proyecto radica en su enfoque regional y científico-técnico de las posibilidades en la expansión del uso de diversos cosustratos regionales en la producción de energía a través de la codigestión anaerobia. Si bien se han realizado estudios en biodigestores rurales, estos se realizan de forma empírica, sin contar con un análisis previo de los cosustratos y sus características más relevantes a nivel de laboratorio en las condiciones locales, donde se puede realizar una caracterización más detallada de los mismos, antes de ser usados a gran escala. Adicionalmente presentará nueva información sobre el posible uso de nuevos cosustratos que no han sido usados previamente en la codigestión anaerobia, como es el caso de los residuos de piña, sachá inchi y cacay.

## **PROBLEMÁTICA**

En el proceso conocido como fermentación anaerobia, se puede producir energía a partir de la descomposición de compuestos orgánicos. A partir de este proceso, en el cual se realizan diferentes transformaciones de los sustratos a partir de diferentes microorganismos, se generará una combinación de metano, dióxido de carbono y otros gases, la cual es conocida como biogás [FNR, 2006]. La cantidad y porcentaje de gas metano del biogás producido dependerá de muchos factores. Uno de los factores determinantes es la composición de los sustratos involucrados y cómo son fermentados en un biodigestor (Fermentador). El estado del sustrato también juega un papel relevante: si es sólido o líquido, con fracciones solubles o no solubles, etc. El rango de producción de metano puede variar desde 40 – 60 % en el caso de excretas animales, hasta el 80 % cuando se usan sustratos con alto contenido de grasas como codigestión con los primeros [Bischofsberger, 2005; FRN, 2006]. Esto nos lleva a la siguiente pregunta: ¿Cuales residuos agroindustriales pueden ser aprovechados para producir biogás en codigestión, disminuyendo su contribución al efecto invernadero y produciendo una fuente alternativa de energía?

## **JUSTIFICACION**

Colombia satisface más del 65 % de sus necesidades energéticas a partir de la generación hidroeléctrica. Sin embargo tiene gran potencial en la generación de energías no convencionales (eólica, biomasa, fotovoltaica) [Fullbright, 2017]. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía para el año 2016, el promedio global de este tipo de Energía rondaba el 10%, sin embargo para Colombia no alcanzaba el 3 % [Cepal, 2003; IEA, 2017]. Debido a las extensas extensiones de tierra cultivable, se producen gran cantidad de residuos agrícolas, que pudieran ser utilizados en la producción de energía a partir de su fermentación anaerobia para la producción de biogás. Este tipo de tecnología por sus características y requerimientos es ideal para zonas rurales en zonas tropicales. Aunque esta tecnología ha sido desarrollada desde los años 80 en Latinoamérica, con grandes avances en países como Brasil y Chile, en Colombia el desarrollo de la misma se encuentra en un estado incipiente. Los mayores avances se han alcanzado a partir del aprovechamiento de los residuos de la industria aceitera, con la producción de 6 MW a partir de los desechos generados en la producción de aceite de palma [Fedepalma, 2016]. Gran cantidad de los desechos agrícolas se generan en las zonas rurales del país, donde la interconexión con el sistema de energía nacional no es el más adecuado [Acosta, 2014], presentándose una oportunidad para suplir en parte esta carencia a través de la generación de biogás. En el año 2015, el departamento del Meta presentó alrededor de 18.000 viviendas del sector rural sin acceso a energía eléctrica, según el ICEE, propuesto como indicador del Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica de la UPME [Ramírez, 2016].

El biodigestor más usado en las áreas rurales colombianas, debido a su bajo costo y fácil operación, es el digestor tubular alimentado con excretas porcinas o bovinas, el cual podría tener una mayor producción al usarse desechos agrícolas de mayor potencial de biogás en codigestión. Debido a la gran cantidad de desechos/sustratos agrícolas (posibles co-sustratos) es necesario un análisis previo antes de su utilización en la práctica.

Los parámetros usados comúnmente para caracterizar los sustratos usados en los biodigestores; el contenido de masa orgánica expresada como sólidos volátiles (SV) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) no puede ser usados directamente para determinar el potencial de biogás de un sustrato, debido a los diferentes grados de biodegradabilidad de los mismos [Angelidaki, 2003, Thon, 2005]. Es por lo tanto necesario para una optimización de la digestión que los sustratos sean primero probados en el laboratorio en reactores tipo batch para estimar el potencial real de biogás que será alcanzado en un biodigestor. Se asume en base a datos reales que los resultados obtenidos en esta caracterización describen el comportamiento del sustrato en un proceso anaerobio en un reactor (biodigestor), asumiendo que el sustrato este completamente mezclado [Weiland, 2010]. La cantidad y porcentaje de metano dependerá de muchos aspectos, sin embargo uno de los más preponderantes es ante todo la composición del sustrato. En la práctica la cantidad de residuos agrícolas puede ser tan extensa que es necesario este tipo de pruebas antes de implementar el sustrato en biodigestores rurales.

## **MARCO CONCEPTUAL**

### **Antecedentes**

El uso de residuos agrícolas como cosustrato es de amplio uso en países donde la producción de energía a través del proceso anaerobio se encuentra en un estado avanzado como en Alemania, Holanda, Dinamarca, Suecia, entre otros [Deublein, 2008]. Co-sustratos de similar composición (carbohidratos) y origen (agricultura), como restos de maíz, colza, y otros desechos de la industria agrícola se han usado con éxito [FNR, 2006]. Por ejemplo los residuos de arroz, al ser un producto de carácter tropical, se ha empezado a considerar con la finalidad de aprovechar estos desechos más eficientemente, entre otros metodos, por medio de su biodigestión [Jeng, 2012]. Recientemente se han obtenido resultados positivos con este tipo de sustrato en Asia [Nguyen *et al*, 2016]. En las condiciones locales estos residuos fueron capaces de producir 60 -180 L de Metano/kg de residuos secos, sin embargo la falta de conocimiento ocasiona que estos residuos sean incinerados desperdiándose su potencial para producir biogás y al mismo tiempo produciendo CO<sub>2</sub>. En este estudio se determinó, que la utilización de desechos de la producción de arroz en el proceso anaerobio resultaba en una ganancia neta energética entre 71 al 86 %, considerando la energía utilizada en su cultivo. A nivel latinoamericano, en Cuba, donde la industria arrocera representa un sector agrícola importante, se han realizado estudios, que permiten concluir que la paja y el residuo de secado pueden ser usados en la digestión anaerobia [Contreras, 2013].

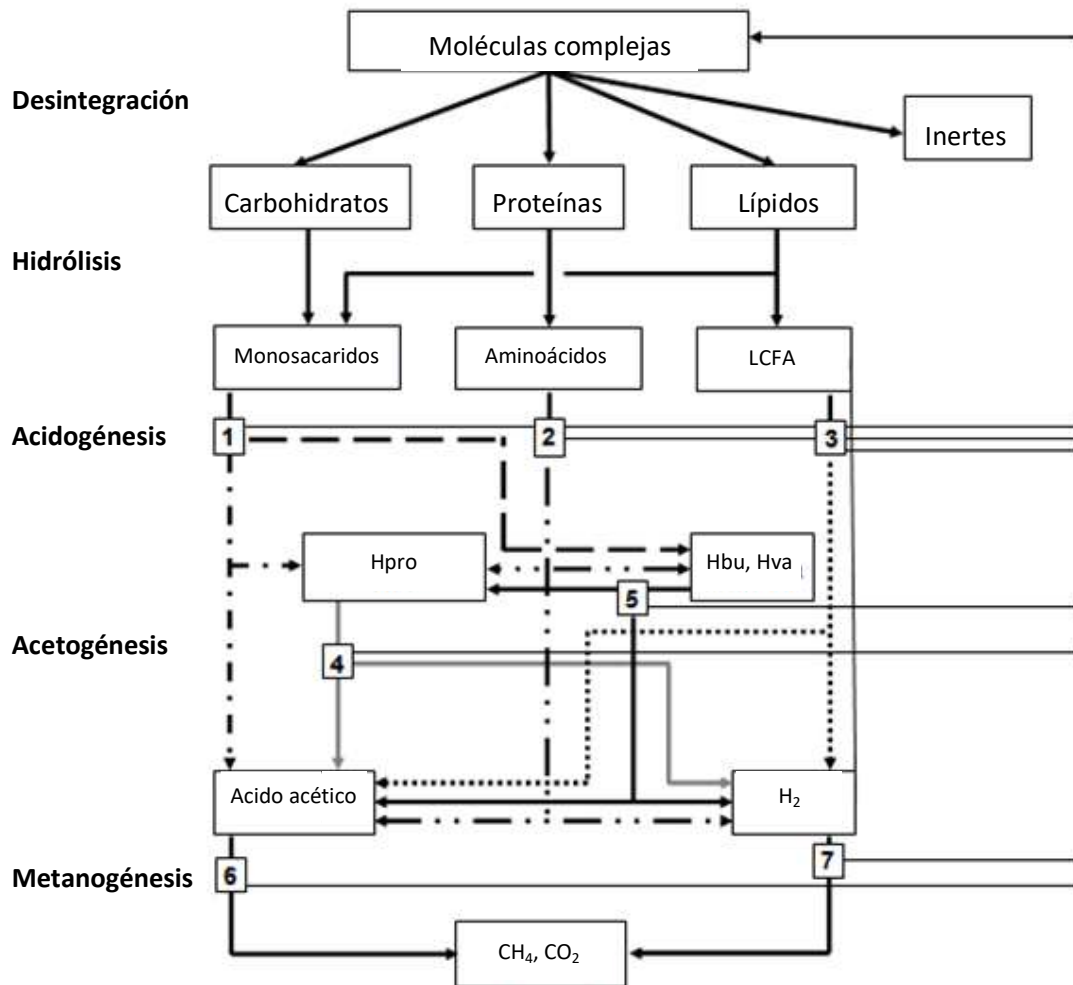
### **Biología del Proceso Anaerobio**

El proceso anaerobio se realiza en un reactor comúnmente llamado biodigestor o fermentador, en el cual se realiza la transformación biológica de los sustratos a biogás y un residuo liquido o "biol" que sirve como fertilizante. La transformación biológica del sustrato sigue una secuencia definida (Ver Figura 1): Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis [Bischofsberger, 2005; Voigt, 2006]. Al inicio del proceso anaerobio las grandes moléculas de biopolímeros son transformados en monómeros y otros productos solubles (Desintegración), como por ejemplo carbohidratos o ácidos grasos. Los biopolímeros se dividen básicamente en carbohidratos,

proteínas y lípidos, estas moléculas son divididas en azúcares, aminoácidos y ácidos grasos de cadena larga (LCFA) respectivamente durante la Hidrólisis. En la acidogénesis los azúcares, aminoácidos y ácidos de cadena larga son transformados en diferentes tipos de ácidos, como por ejemplo el ácido butírico (Hbu), ácido propiónico (Hpr), ácido acético o alcoholes. En la tercera fase, la acetogénesis, los ácidos producidos se transforman en ácido acético, el cual servirá como sustrato principal de la última fase del proceso, la metanogénesis, donde se transforma mayormente en metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), aparte de concentraciones mínimas de  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  [Dennis, 2001; Thon, 2005].

La composición de los sustratos biopoliméricos se puede dividir en tres grandes grupos [Batstone, 2001]:

- Carbohidratos (Azúcares, Hemicelulosa, Celulosa, Pectina, Almidón, etc.): Son fácilmente hidrolizables. Los azúcares y hemicelulosa son rápidamente degradados en la Hidrólisis, mientras que la degradación de celulosa, almidones o pectina ocurren de una manera más lenta [Dennis, 2001; Bischofsberger, 2005].
- Proteínas: Pueden estar constituidas hasta por 20 aminoácidos. La tasa de la Hidrólisis es baja, sin embargo las condiciones de almacenamiento pueden acelerar el proceso de degradación [Batstone, 2001]. Por consiguiente un mayor almacenamiento desde su origen hasta el momento de la digestión aumentará su velocidad de descomposición, en ese caso ya ha ocurrido cierto grado de desdoblamiento de las proteínas (Desintegración).
- Lípidos: La hidrólisis de estos compuestos requiere una emulsificación para aumentar el área superficial [Georgacakis, 1993]. Así pueden las Lipasas (Enzima) degradar mejor las moléculas. Este tipo de moléculas pueden ser totalmente descompuestas, dependiendo su velocidad del grado de descomposición alcanzado al momento de la digestión, sin embargo solo cuando la temperatura es superior a los  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .



**Figura 1.** Descomposición de la materia orgánica propuesto por Batstone *et al* 2003 para el proceso de digestión anaerobia.

La buena operación de la digestión anaerobia dependerá de la biomasa activa (bacterias anaerobias) y sus condiciones ambientales en el reactor (pH, temperatura, nutrientes, etc.), los sustratos alimentados y el tipo de operación del reactor [Weiland, 2010]. Las reacciones que ocurren en el reactor son del tipo enzimático. Es decir las bacterias producen diferentes tipos de enzimas para poder degradar los diferentes sustratos y obtener la energía para su supervivencia.

**Factores que influyen el proceso:**

- 1) **Temperatura:** Este parámetro juega un papel central en el proceso anaerobio y por lo tanto en la producción de biogás, debido a su influencia sobre las bacterias anaerobias. En general aumenta la producción de biogás hasta alcanzarse un punto máximo, para luego disminuir nuevamente. Los diferentes tipos de bacterias tienen diferentes rangos óptimos de temperatura. Adicionalmente la solubilidad de los sustratos orgánicos se ve

influenciada por este factor. Para las bacterias acidogénicas existen tres tipos de rangos de temperatura: 12-20 °C para operación psicrófila, 20-35 °C para operación mesófila y 35-55 °C para operación termófila [Bischofsberger, 2005]. La temperatura óptima para las bacterias mesófilas oscila entre 37-41° C y para las termófilas 50-52 °C. Cambios bruscos de temperatura afectan negativamente el proceso, por lo que se debe tratar de mantener la temperatura constante. Por lo general se prefieren las bacterias mesófilas para la digestión anaerobia, debido a que son las más resistentes a los cambios de temperatura y condiciones ambientales con respecto a las otras [Dennis, 2001; Pereira, 2003].

- 2) **pH:** Uno de los factores más relevantes después de la temperatura, ya que puede influenciar las propiedades enzimáticas de las bacterias anaerobias durante la digestión, aunque en la mayoría de los casos es autoregulado en el proceso. El pH óptimo para la digestión anaerobia se encuentra entre 6,8 a 7,5; fuera de este rango se produce una disminución en la producción de biogás [FNR, 2006]. El mayor peligro radica en la acidificación del reactor como consecuencia de la acumulación del dióxido de carbono y los ácidos grasos producidos en la acidogénesis, lo que puede llevar a la inhibición del proceso anaerobio [Bischofsberger, 2005].
- 3) **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH):** Este tiempo corresponde al momento en el cual el sustrato es agregado al reactor hasta su salida. Se calcula como la relación entre volumen de sustrato agregado entre el volumen del reactor. Este tiempo debe ser tal, que el número de bacterias a la salida del reactor no debe ser mayor a las agregadas y las generadas dentro del mismo reactor durante el proceso. El crecimiento de bacterias anaerobias es lento comparado con las bacterias aerobias/anóxicas. Debido a esto requieren un tiempo largo en el reactor para alcanzar una población grande y estable [Werner, 2006]. Por regla general el tiempo mínimo es de 20 días. Dependiendo del contenido orgánico del sustrato y su biodegradabilidad este tiempo puede variar por debajo o encima de este valor [Weiland, 2010].
- 4) **Sustrato:** Es el factor más importante en el proceso anaerobio, ya que, si las condiciones son óptimas, determinará la cantidad de biogás producido y su porcentaje de gas metano. En primer lugar la biodegradabilidad del sustrato influye en la velocidad del proceso y la calidad del biogás producido [Thon, 2005], a mayor porcentaje de metano, mayor será el poder calórico del biogás. En la Tabla N°1 se observa la composición de biogás a partir de diferentes tipos de sustratos.

**Tabla N°1.** Composición de biogás a partir de diferentes fuentes de sustrato.

Compuesto	Sustratos agrícolas	Lodos de tratamiento	Desechos industriales	Lixiviados
Metano, CH <sub>4</sub> (% V)	50 – 75	50 – 80	50 – 75	50 – 75
Dióxido de Carbono, CO <sub>2</sub> (% V)	25 – 45	20 – 50	25 – 45	25 – 45
Acido sulfhídrico, H <sub>2</sub> S (% V)	< 0,1	0 – 1	0 – 8	< 0,1
Nitrógeno, N <sub>2</sub> (% V)	0 – 1	0 – 3	0 – 1	0 – 2
Oxígeno, O <sub>2</sub> (% V)	0 – 1	0 – 1	0 – 1	0 – 5
Hidrógeno, H <sub>2</sub> (%V)	0 – 1	0 – 5	0 – 2	0 – 1

Fuente: Coombs, 1990.

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

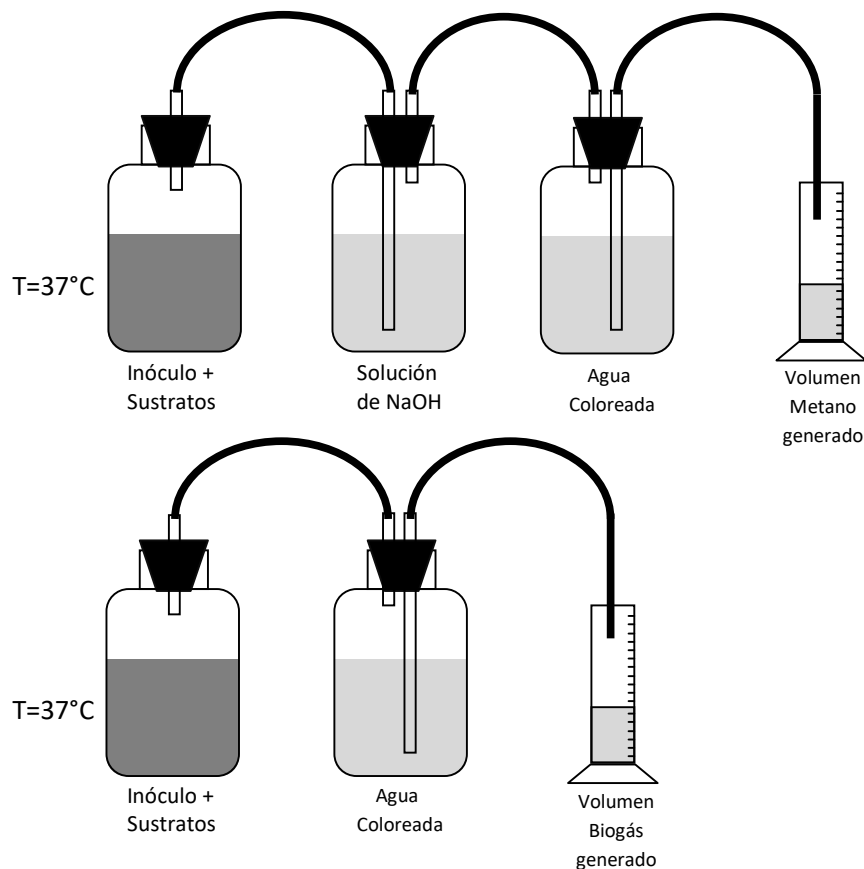
El siguiente diseño experimental será realizado en los Laboratorios de la Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio, así como en la Universidad de Los Llanos, Sede Barcelona, Villavicencio. Por medio de estos análisis experimentales se investigará la factibilidad del sustrato para producir biogás en las condiciones locales. Para esto se realizarán pruebas en reactores de cargas (tipo batch) para determinar el potencial específico de biogás del sustrato. Se realizarán pruebas en un reactor a escala piloto para determinar el comportamiento de otras variables del proceso (acumulación/sedimentación del sustrato, flotabilidad, etc)

- 1. Caracterización fisicoquímica de los sustratos:** Los sustratos a utilizar (excretas porcinas y cascarilla de arroz) serán caracterizados usando la metodología para fracciones sólidas descritos en el manual Métodos Normalizados APHA (Standard Methods). En la Tabla N°2 se describen los parámetros que serán determinados.

Tabla N°2. Parámetros analizados de los sustratos a usar.

Parámetro	Excretas porcinas	Cosustratos
Sólidos Totales, (%)	x	x
Sólidos Volátiles totales (%ST)	x	x
Nitrógeno Total Kjeldahl	x	No
Nitrógeno amoniacal (NH <sub>4</sub> )	x	No
pH	x	No
Tamaño de partícula	No	x
Densidad	x	x
Viscosidad	x	No
COT	X	x
DQO	x	x

- 2. Experimentos para determinación de Potencial de Biogás (USTA Villavicencio):** La función de los experimentos en el laboratorio será determinar el potencial de biogás de los sustratos y su comportamiento durante el proceso anaerobio. El diseño experimental se realizará como está representado en la Figura 2. El reactor consiste en un contenedor de 1 L que servirá de biodigestor, el cual se encuentra herméticamente sellado y conectado a un segundo contenedor con hidróxido de sodio (NaOH). El hidróxido tiene la función de adsorber el CO<sub>2</sub> del biogás. El biogás remanente (principalmente metano) fluye a un tercer contenedor donde desplaza un líquido inerte, para obtener una medición del gas producido a temperatura ambiente. El reactor se mantendrá en régimen mesofílico (37 °C), durante la digestión, la cual se dará concluida, cuando el volumen diario producido sea menor al 1 % de la mayor cantidad diaria producida desde el inicio. Estos valores serán posteriormente normalizados a 0° C y 1 atm. Las muestras tendrán su duplicado sin el contenedor de absorción de CO<sub>2</sub>, para obtener la cantidad de biogás y por relación calcular el % de Metano producido. Debido a la variabilidad de los sustratos en sus composición, las pruebas se realizarán en varias corridas para obtener valores promedios de la producción de biogás.



**Figura 2.** Montaje experimental para la determinación de biogás y metano a escala de laboratorio en reactores tipo batch.

El montaje de los reactores procederá como se observa en la Tabla N° 3. Para garantizar la mezcla completa, se utilizará inóculo (bacterias anaerobias), obtenidas de un reactor en operación y una porción de excretas porcinas, lo cual proporcionará una densidad y condiciones adecuadas para el completo contacto del cosustrato y las bacterias anaerobias de una manera óptima [Rojas *et al*, 2010].

**Tabla N°3.** Composición del contenido de los digestores (1000 ml) en el laboratorio.

N°	Contenido	Inóculo	Excretas	Cosustrato <sup>2</sup>
1	Control (Absorción de CO <sub>2</sub> )	200 ml <sup>1</sup>	0	0
2	Control	200 ml <sup>1</sup>	0	0
3	Ex. Porcinas (Absorción de CO <sub>2</sub> )	200 ml	300 ml	0
4	Ex. Porcinas	200 ml	300 ml	0
5	Ex. Porcinas + Cosustrato (Absorción de CO <sub>2</sub> )	200 ml	300 ml	Cantidad 1
6	Ex. Porcinas + Cosustrato	200 ml	300 ml	Cantidad 1
7	Ex. Porcinas + Cosustrato (Absorción de CO <sub>2</sub> )	200 ml	300 ml	Cantidad 2
8	Ex. Porcinas + Cosustrato	200 ml	300 ml	Cantidad 2
9	Ex. Porcinas + Cosustrato (Absorción de CO <sub>2</sub> )	200 ml	300 ml	Cantidad 3
10	Ex. Porcinas + Cosustrato	200 ml	300 ml	Cantidad 3

<sup>1</sup>Completadas con agua hasta 500 ml; <sup>2</sup>Determinadas a partir de % SV obtenido en la caracterización

**3. Experimentos a escala piloto en reactor semicontinuo de mezcla completa (Unillanos Sede Barcelona):** En el Laboratorio de Ingeniería Agroindustrial, se realizará el arranque de un digester a escala piloto (Volumen 15 L) alimentado con excretas porcinas producidas en la granja de la Universidad de Los Llanos (Figura 3). Este montaje se realizará 4 semanas antes del inicio de los experimentos de laboratorio para la determinación del potencial de biogás de los cosustratos, para garantizar una fuente de bacterias adaptadas (inóculo) a las condiciones de operación locales. El rango de operación será el de las temperaturas ambientales de la región, las cuales se encuentran en el régimen mesofílico (20-35°C).

Posteriormente se realizará la operación de este reactor con cada cosustrato, para estudiar los problemas de operación de modo semicontinuo, como acumulación de residuos en el reactor, efecto de la posible flotabilidad de cosustrato, porcentaje de eficiencia en la digestión u otros problemas que se puedan encontrar. Se analizará la composición del biogás producido (% CH<sub>4</sub>) con los instrumentos de medición acoplados al reactor así como las otras variables mencionadas en la Tabla N°2.

**Tabla N°4.** Condiciones de operación del reactor semicontinuo (36L).

Corrida	Sustrato	Frecuencia de alimentación	Volumen Reactor (Liq)
1	Excretas porcinas	Diaria	10 L
2	Excretas porcinas + Cosustrato	Cada 3 días	10 L
3	Excretas porcinas + Cosustrato	Cada 5 días	10 L

Una vez determinado el potencial de los cosustratos se realizaran las pruebas semi continuas dentro de los rangos normales de operación, es decir una alimentación de alrededor de 2,5 Kg SV de sustrato/m<sup>3</sup> de reactor [Schöen et al, 2009].



(A)

(B)

(C)

**Figura 3.** Fotogramas del reactor a escala piloto ubicado en la Universidad de Los Llanos. (A) Vista Superior; (B) Detalle instrumentos de medición; (C) Vista lateral.

- 4. Prueba de los mejores cosustratos en un codigestor rural en operación con excretas porcinas:** En la fase final del proyecto se probará el rendimiento de los cosustratos con mejor potencial de biogás en reactores rurales del Departamento del Meta, tomando como base para la alimentación los resultados obtenidos en las fases anteriores.

## RESULTADOS ESPERADOS

- Potencial de producción de biogás en codigestión anaerobia con excretas porcinas de los cosustratos procedente de la industria agrícola estudiados.
- Identificación de los problemas o ventajas particulares de cada uno de los cosustratos estudiados en la codigestión con excretas porcinas en biodigestores rurales en la zonas agrícolas colombianas.
- Eficiencia de los cosustratos analizados en el proceso de codigestión anaerobia en reactores rurales.
- Demostrar un metodo alternativo de aprovechamiento de residuos agrícolas con menor impacto ambiental al empleado actualmente en algunos de ellos (combustión de los residuos).

## PRODUCTOS ESPERADOS

Tabla N°5. Listado de productos científicos resultantes del proyecto

Producto	Descripción
1er Artículo Científico	Estudio comparativo del potencial de producción de biogas en la Región del Meta con la Región de Baja Sajonia
2do Artículo Científico	Uso de la cascarilla de arroz, residuos de cacao y de soja como cosustratos para la producción de energía a través de la digestión anaerobia
3er Artículo Científico	Uso de residuos de piña, sachá inchi y cacay como cosustratos para la producción de energía a través de la digestión anaerobia
Capacitaciones	Jornadas de Capacitación con productores agrícolas con biodigestores rurales a través del Nodo de la Orinoquía de la Red Biolac
1 Ponencias	XIV Taller y Simposio Latinoamericano de Digestión Anaerobia / Oct 2019,
1 Ponencias	XI Encuentro Internacional de la Red Biolac 2019
1 Ponencias	XI Encuentro Internacional de la Red Biolac 2020
1 Folleto Informativo	Folleto para ser empleado en la Capacitación para dar a conocer los resultados a los actores que usan biodigestores rurales
4 Tesis de Grado	Relacionadas con los diferentes cosustratos a estudiar

## IMPACTO AMBIENTAL

Aunque la generación de biogás en las condiciones que plantea el proyecto no proveerá grandes cantidades de energía al sistema nacional, debido a su escala y naturaleza rural, sí proporcionará nuevo conocimiento que impactará en la calidad de vida en las zonas agrícolas de Colombia. Primeramente disminuyendo el impacto que causan en el entorno, tanto como si son aprovechados como material de combustión (aumentando a escala global el CO<sub>2</sub> – gas de efecto invernadero), o si son simplemente tratados como residuos desechables, lo que ya causa un problema ambiental en zonas, que como en el caso del Departamento Meta y Boyaca, contienen grandes áreas vulnerables o protegidas.

Al aprovechar estos residuos en la producción de biogás, éste puede ser usado en actividades cotidianas (cocina, calentamiento, etc), se disminuye la huella de carbono y al mismo tiempo se tratan estos residuos agrícolas produciendo aparte del biogás un efluente, que puede ser usado como biofertilizante o ser dispensado con menor riesgo ambiental.

Como se dijo anteriormente, a pesar de la relativa simplicidad de esta tecnología, esta no ha sido lo suficientemente explotada en Colombia, a pesar de su potencial de residuos agrícolas disponibles, por lo que a largo plazo se espera potenciar su uso en las zonas rurales con este nuevo aporte al conocimiento.



## BIBLOGRAFIA

- [1] Norton Rose Fullbright . Renewable Energy in Latin America. *Technical Report*. 2017.
- [2] International Energy Agency. Statistics Renewables Information. *Technical Report*. 2016.
- [3] CEPAL. Entorno Internacional y Oportunidades para el Desarrollo para la fuentes renovables de energía en los países de América Latina y el Caribe. Informe Técnico. 2003. Santiago de Chile.
- [4] Acosta, M.; Pasqualino, J. Potencial de uso de biogás en Colombia. *Revista Teknos*. 2014: 14(2): 27-33.
- [5] FNR e.V. *Handreichung. Biogasgewinnung und Nutzung. Institut für Energetik und Umwelt. gGmbH*, 2006
- [6] Voigt, J.C. Aufbereitung biogener Reststoffe zur Energiegewinnung in der G.arindustrie. *Chemie Technik*. 2006, 78,1403.
- [7] Bischofsberger, W; Dichtl, N; Rosenwinkel, K.-H. ; Seyfried, C. F. ; Böhnke, B. *Anaerobetechnik*, Springer, New York, 2005.
- [8] Angelidaki, I.; Ellegaard, L. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants: status and future trends. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2003, 109, 95–105.
- [9] Dennis, A.; Burke, P.A. *Dairy Waste Anaerobic Digestion Handbook*. Environmental Energy Company. 2001 Olympia WA. USA.
- [10] Thon, w.; Schneider, T.; Schmidt, O.; Kummer, B.; Friege, H. Der Vollzug der Abfallablagerungs VO in *Deutschland: Erfahrungen und Perspektiven für die zukünftige Entwicklung*. 2005, Müll-Handbuch. Erich Schmidt Verlag, Berlin.
- [11] Weiland, P. Biogas production: actual status and perspectives. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2010, 85, 849–860.
- [12] Batstone, D. J. *et al.*, *Anaerobic Digestion Model No. 1, IAJWQ Scientific and Technical Report No. 13, 2001*, IWA Publishing, London
- [13] Georgacakis, D. and Dalis, D. Controlled anaerobic digestion of settled olive-oil wastewater. *Bioresour. Technol.* 1993, 46 (3), 221 – 226.
- [14] Deublein, D. and Steihauser, A. (Ed.). *Biogas from Waste and Renewable Resources. An introduction. 2008*.Wiley-VCH, Verlag GmbH& Co. KGaA. Weinheim, Germany.
- [15] Pereira, M.A.; Cavaleiro A.J.; Mota, M. and Alves, M.M. Accumulation of long chain fatty acids onto anaerobic sludge under steady state and shock loading conditions: effect on acetogenic and methanogenic activity. *Water Sci. Technol.* 2003, 48 (6): 33-40.
- [16] Werner A., Trogisch S., Veran N. und Reindl K. Erstellung eines Bewertungstools für die regionale Akzeptanz von Biogasanlagen mit Energiesystempflanzen sowie deren Eignung und Verfügbarkeit. *Endbericht zum Energie Systeme der Zukunft-Projekt Biogasakzeptanz*“. 2006. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien.
- [17] Coombs, J. The present and future of anaerobic digestion, in *Anaerobic digestion: a waste treatment technology. Crit. Rep. Appl. Chem.* 1990, 31: 93-138.
- [18] Ramírez Yaima, O.E. *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica - PIEC 2016-2020*. Unidad de Planeación Minero Energética , Bogotá, 2016.
- [19] Deublein, D. and Steihauser, A. (Ed.). *Biogas from Waste and Renewable Resources. An introduction*.Wiley-VCH, Verlag GmbH& Co. KGaA. Weinheim, Germany. 2008.

- [20] Jeng, S. L.; Zainuddin, A. M.; Sharifah, R. W.; Alwi, H. H. . A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. 16(5): 3084-3094.
- [21] Contreras-Velasquez, L. M. Digestión anaerobia de residuos de la agroindustria arrocera cubana para la producción de biogás. Tesis de Doctotado. Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas, Cuba, 2013.
- [22] Rojas, C.; Uhlenhut, F.; Steinigeweg .Stirring and biomass starter influences the anaerobic digestion of different substrates for biogas production. *Engineering in Life Sciences*. 2010. 10 (4): 339-347.
- [23] Schön, M. Numerical modelling of anaerobic digestion process in agricultural biogas plants. *Dissertation*. Leopold-Franzens-Universität, Innsbruck, Austria, 2009.