

Determinación del potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos de las cafeterías Central y Bristo casa SAE de la Universidad Icesi

Yurany Arelis Medina

Universidad ICESI

Facultad de Ciencias Naturales, Departamento de Ciencias farmacéuticas

Valle del cauca, Santiago de Cali

2017

Determinación del potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos de las cafeterías Central y Bristo casa SAE de la Universidad Icesi

Yurany Arelis Medina

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE PREGRADO EN
QUÍMICA FARMACÉUTICA

María Francisca Villegas Torres, PhD

Valle del cauca, Santiago de Cali

2017

Aprobado por:



APROBADO POR:

A handwritten signature in red ink, consisting of several loops and vertical strokes.

Andrés Felipe Dávalos MSc
Evaluador

A handwritten signature in black ink that reads "Ua. Francisca Villegas".

María Francisca Villegas Ph.D
Tutor del proyecto

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Juan Sebastián Rey".

(Nombre Correspondiente)
Co-Tutor del Proyecto.
Juan Sebastián Rey

Santiago de Cali, 6, Diciembre 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, le agradezco a Dios por llevarme de su mano en este proceso, por darme sabiduría para salir adelante con el desarrollo de esta maravillosa carrera, por todas las bendiciones que le ha regalado a mi vida, por ser mi guía y mi fortaleza. A mi madre, que es la persona más importante en mi vida, quien ha sido mi luz, este es un logro en conjunto, sin ella no sería la persona y la estudiante que soy. A mi abuelita, la más consentidora y hermosa de todas, gracias por poner su esperanza en mí.

Igualmente, agradezco a mis profesores por todo el conocimiento aportado y en especial a mi tutora, María Francisca Villegas, por la oportunidad de desarrollar tan valioso proyecto, por su entrega, su disposición y toda su paciencia. A mi cotutor, Juan Sebastián Rey, que siempre estuvo dispuesto a guiarme, agradezco enormemente su apoderamiento en el proyecto y su constante presencia en el desarrollo del mismo. De la misma manera, expreso mi gratitud a Isabel Osorio, por su apoyo en el desarrollo de las tareas más demandantes, por su voluntad y su amistad sincera.

Finalmente, agradezco a todos mis amigos, quienes han hecho de esta etapa de mi vida una experiencia maravillosa y han sido un apoyo valioso en los momentos difíciles. A Natalia Hurtado, la mejor amiga que la vida me pudo dar; a Víctor Ballesteros, mi respuesta de Dios; a Monroe y Laurel, por los momentos compartidos; a Dani Ruiz, por sus palabras de aliento y a todos los que han creído en mí.

Tabla de contenido

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
1. INTRODUCCIÓN	12
2. Descripción del proyecto	13
2.1 Planteamiento del problema de investigación, necesidades y pertinencia del proyecto	13
2.2 Marco teórico y estado del arte.....	14
2.3 Objetivos.....	22
2.3.1 Objetivo general.....	22
2.3.2 Objetivos específicos	22
2.4. Metodología.....	22
2.4.1 Plan de muestreo	22
2.4.2 Caracterización de los sustratos	23
2.4.3 El inóculo	23
2.4.5 Determinación de la producción de biogás	23
2.4.6 Cuantificación de metano en el biogás producido.....	24
2.4.7 Diseño experimental	25
2.4.8 Tratamiento estadístico de los datos	25
2.4.9 Matriz de marco lógico	26
2.5 Resultados y Discusión	27
2.5.1 Plan de muestreo	27
2.5.2 Caracterización de los sustratos	28
2.5.2 Determinación de la producción de biogás	29
2.5.3 Cuantificación de metano en el biogás producido.....	35
2.6 Conclusiones	37
2.6 Recomendaciones.....	38
2.9 Anexos.....	42

Lista de Tablas

Tabla 1: Matriz de marco lógico	26
Tabla 2: Resultados obtenidos en la caracterización de las muestras	28
Tabla 3: Resultados de BMP obtenidos para las muestras evaluadas.....	35
Tabla 4: Valores de metano obtenidos para las muestras, reportados en mililitros por gramos de sólidos volátiles añadidos y en porcentaje	36

Lista de Gráficas

Gráfica 1: Principales fuentes de obtención de metano.....	18
Gráfica 2: Consumo de energía eléctrica en Colombia (KW/h per cápita)	20
Gráfica 3: Tarifas de electricidad para América Latina en el año 2015.....	21
Gráfica 4: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del lunes en los primeros 7 días.....	29
Gráfica 5: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del martes en los primeros 7 días.....	30
Gráfica 6: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del miércoles en los primeros 7 días.....	30
Gráfica 7: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del jueves en los primeros 7 días.....	31
Gráfica 8: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del viernes en los primeros 7 días.....	31
Gráfica 9: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del control en los primeros 7 días.....	32
Gráfica 10: Producción de biogás obtenida para cada muestra en los 15 días de estudio.....	33
Gráfica 11: Diagrama de barras para presentar los BMP de los dos tratamientos.....	36

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema de transformaciones en digestión anaerobia	15
Figura 2: Montaje experimental para la obtención de biogás.....	24
Figura 3: Analizador de biogás empleado, BIOGÁS 5000	25

Lista de Anexos

Anexo 1: Entrevista SOMA.....	42
Anexo 2: Supuesto de normalidad de Ryan Joiner.....	44
Anexo 3: Resultado de la prueba Kruskal Wallis para comparar el volumen de biogás producido en los dos tratamientos dados.....	44
Anexo 4: Resultado de la prueba Kruskal Wallis para comparar el volumen de biogás producido con el porcentaje de metano obtenido.....	45

RESUMEN

En Colombia, las cifras del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial indican que en un día el país produce 27300 toneladas de basura, de las cuales el 65% son residuos orgánicos y el 35% inorgánicos. Estas cifras aumentan de forma proporcional al acelerado crecimiento urbanístico y generan la necesidad de reutilizar materias primas desechadas. Por ello, es importante encontrar formas de darle un uso racional a esos desperdicios, lo cual va a tener un impacto positivo no solo a nivel ambiental, sino también en el aspecto económico.

El presente trabajo de grado tiene por objetivo determinar el potencial de producción de biogás de los desechos orgánicos de las cafeterías Central y Bristo de la Universidad Icesi, las cuales generan un promedio diario de 26 kg de residuos sólidos orgánicos. Para ello, se realizó un seguimiento a la generación de estos residuos en términos de cantidad, tipo y manejo, lo que permitió definir el régimen de muestreo. A las muestras obtenidas se les determinaron valores de pH, los cuales se encontraron entre 4,95 y 5,25; humedad entre 74,97% y 81,79% y sólidos volátiles entre 18,86% y 25,03%. Finalmente, se evaluó el potencial de biometano para determinar la proyección energética que se puede obtener al aprovechar estos residuos, alcanzándose un valor promedio de 625,69mL CH₄/g SV y un máximo de 76,548% en composición de metano, con lo que se evidencia la capacidad de generar metano con los sustratos empleados.

A partir de los resultados obtenidos se pretende proporcionar una forma de generación de energías alternativas para uso en algunas actividades de la institución. Con dicha implementación, se esperaría obtener 4,620 KWh/Kg de energía eléctrica. De esta manera, la digestión anaerobia es una alternativa viable para el aprovechamiento de los residuos orgánicos sólidos generados en las cafeterías de la universidad Icesi.

Palabras claves: Digestión anaerobia, potencial de producción de biometano, biogás, sustrato, inóculo.

ABSTRACT

In Colombia, figures from the Ministry of Environment, Housing and Territorial Development indicate that in one day the country produces 27,300 tons of garbage, of which 65% are organic waste and 35% inorganic. These figures increase proportionally to the accelerated urban growth and generate the need to reuse discarded raw materials. Therefore, it is important to find ways to give a rational use to these wastes, which will have a positive impact not only at the environmental level, but also in the economic aspect.

The purpose of this degree work is to determine the potential for biogas production of organic waste from the Central and Bristo coffee shops of Icesi University, which generate a daily average of 26 kg of organic solid waste. For this, the generation of these wastes was monitored in terms of quantity, type and management, which allowed defining the sampling regime. The pH values were determined to the samples obtained, which were between 4.95 and 5.25; humidity between 74.97% and 81.79% and volatile solids between 18.86% and 25.03%. Finally, the potential of biomethane was evaluated to determine the energy projection that can be obtained by taking advantage of these residues, reaching values of up to 625,69mL CH₄/g SV and a maximum of 76.548% in methane composition, thus evidencing the ability to generate methane with the substrates used.

Based on the results obtained, it is intended to provide a way of generating alternative energies for use in some activities of the institution. With this implementation, it would be expected to obtain 9,387KWh of electric power. In this way, anaerobic digestion is a viable alternative for the use of solid organic waste generated in the cafeterias of the Icesi University.

Key words: Anaerobic digestion, biomethane production potential, biogas, substrate, inoculum.

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos orgánicos sólidos son de gran importancia en la actualidad, por aspectos tanto ambientales como económicos, debido a que es necesario realizar una inversión monetaria para una disposición final adecuada de los mismos. Por su parte, el impacto ambiental negativo se presenta no sólo por la disposición final, sino también por el incremento en la cantidad de residuos generados, lo cual va ligado al crecimiento de la población humana.

Dada la magnitud del problema, actualmente se buscan soluciones mediante la implementación de la Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), la cual incluye desde la separación en la fuente (orgánico, reciclaje e inservible), hasta la transformación de los que permiten éste proceso o a la disposición final de los que no se pueden reciclar. Dicho plan de GIRS, se desarrolla en el marco del cumplimiento de la Resolución 2482 del 2012.

Una vez obtenida la separación en la fuente, se tienen por alternativas el compostaje de los residuos orgánicos sólidos como biofertilizantes y acondicionadores de suelos, la producción de gas, humus, los biocombustibles, entre otros, siendo la producción de biogás el enfoque de aprovechamiento de los residuos orgánicos en el presente trabajo.

La producción de biogás a partir de residuos sólidos se obtiene mediante la digestión anaerobia, proceso que consiste en la ruptura de casi todos los tipos de materia orgánica debido a la acción concertada de una amplia variedad de microorganismos, el cual se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y de cualquier otro tipo de agentes oxidantes fuertes. Los principales productos que se generan son metano y dióxido de carbono, con cantidades menores de N_2 , NH_3 , H_2 y H_2S . (Bermúdez, M. et al 1988).

El objetivo de este proyecto se basa en la determinación del potencial de producción de biogás de los desechos orgánicos no aprovechados de las cafeterías de la Universidad Icesi en el segundo semestre del 2017, con el propósito de establecer la capacidad de producción de biogás para ser usada como una fuente de energía alternativa, con la cual se puedan suplir algunas de las necesidades de consumo dentro de la Universidad Icesi.

2. Descripción del proyecto

2.1 Planteamiento del problema de investigación, necesidades y pertinencia del proyecto

Los residuos sólidos orgánicos urbanos constituyen cerca del 70% del volumen total de desechos generados, por tal motivo es primordial buscar una salida integral que contribuya al manejo adecuado de los mismos, potenciando los productos finales de éstos procesos y minimizando un gran número de impactos ambientales que conlleven a la sostenibilidad de los recursos naturales. Existen varios tipos de aprovechamiento para estos residuos sólidos, los cuales comprenden alimentación animal, compostaje, lombricultivo, biocombustibles, biofertilizantes y biofermentos; este trabajo se enfoca en la generación de biogás a partir de dichos residuos (Jaramillo & Zapata, 2008).

En cuanto al impacto negativo a nivel ambiental que ha generado la acumulación, la disposición inapropiada y el incremento desmedido de los residuos sólidos, este trae consigo un aumento en las investigaciones que pretenden encontrar opciones adecuadas para el aprovechamiento de los mismos. En el ámbito internacional, nuevos estándares de gestión han venido proponiendo en los últimos años pasar de los modelos tradicionales basados en la eliminación de residuos —como el enterramiento en rellenos sanitarios, su descarte en basurales a cielo abierto o la incineración—, hacia un modelo GIRSU (de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos), orientado a la reducción en la generación, la reutilización, la recolección diferenciada, el reciclado y el tratamiento de residuos, es decir, cimentado en la recuperación de materiales (Merlinsky, 2011). En Colombia, se han venido diseñando e implementado nuevas políticas tendientes a la gestión integral de los residuos sólidos, las cuales deben ceñirse a la reglamentación establecida mediante la normatividad ambiental (Resolución 1045 de 2005, Decreto 1713 de 2002, artículo 36 del Decreto 2811 de 1974).

Con el aprovechamiento de los residuos orgánicos se contribuye en forma directa a la disminución de impactos ambientales negativos y a algunos problemas de salud pública. Por ello con el desarrollo de este proyecto se pretende determinar el potencial de biogás de los residuos orgánicos de las cafeterías Central y Bristo casa SAE de la Universidad Icesi. Los resultados obtenidos, pueden ser una base fundamental para establecer formas de aprovechamiento de dichos residuos y suplir algunos de los requerimientos básicos de energía dentro de la universidad.

2.2 Marco teórico y estado del arte

La digestión anaerobia consiste en la ruptura de casi todos los tipos de materia orgánica, debido a la acción concertada de una amplia variedad de microorganismos; este proceso se lleva a cabo en ausencia de oxígeno y de cualquier otro tipo de agentes oxidantes fuertes. Los principales productos que se generan son metano y dióxido de carbono, con cantidades menores de N_2 , NH_3 , H_2 y H_2S (Bermúdez *et al.* 1988).

El proceso de digestión anaerobia se compone de distintas fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La hidrólisis o licuefacción, consiste en la solubilización de los compuestos orgánicos mediante acción enzimática, dada por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas que actúan en el exterior celular, por lo que se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros (Lorenzo *et al.* 2005).

La siguiente etapa es la acidogénesis, en la cual, los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la hidrólisis son convertidos principalmente en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico. En cuanto a la acetogénesis, a esta también se le conoce como acidogénesis intermediaria, en la que los productos correspondientes son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO_2 . Finalmente, la metanogénesis es una etapa metabólica donde el CH_4 es producido a partir del ácido acético o de mezclas de H_2 y CO_2 , pudiendo formarse de igual manera desde otros sustratos tales como ácido fórmico y metanol (Lorenzo *et al.* 2005). Por lo anterior, se puede decir que, el rol de las bacterias metanogénicas se define por el tipo de sustrato disponible. Así pues, las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia descritas, se representan en la figura 1.

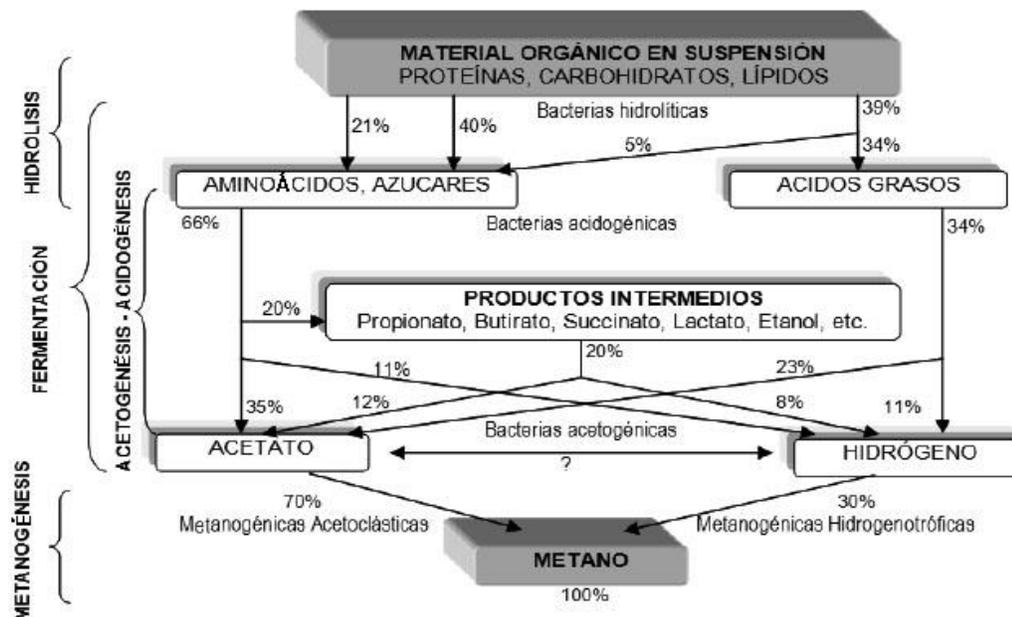


Figura 1: Esquema de transformaciones en digestión anaerobia (Giraldo, 1991)

Ahora bien, el proceso de digestión anaeróbica tiene lugar en biodigestores, depósitos completamente cerrados, donde el material depositado se fermenta sin aire; aquí es donde se lleva a cabo la fermentación de materia orgánica para producir biogás. Los biodigestores además de ser generadores de energía no convencional, representan una forma adicional de elaborar abono mediante la fermentación de sus materiales y puede ser aplicado en diferentes cultivos (Aza, 2004). Igualmente, existe una gran variedad de diseños, los cuales se ajustan a los resultados buscados, al sustrato y a los costos. Entre los más utilizados en el sector industrial se encuentran: el Digestor de Manto de Barros en Flujo Ascendente (UASB), el Digestor de Mezcla Continua (CSTR), los Digestores de Filtros Anaeróbicos y los Biodigestores de Membrana (Aza, 2004).

Los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización; los más sencillos caen dentro de la clasificación de digestores discontinuos o de cargas por lotes, y los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación. Asimismo, se clasifican según su modo de operación con relación a su alimentación o carga en continuos, semicontinuos y discontinuos. En el primer caso, la alimentación del digestor es un proceso ininterrumpido, el efluente que descarga es igual al afluente o material de carga (que entra al digestor), con producciones de biogás uniformes en el tiempo y se utilizan principalmente, para el tratamiento de aguas negras. En el segundo caso, la primera carga que se introduce al digestor consta de una gran cantidad de materias primas, con una posterior adición de nuevas cargas de afluente y se emplea en el medio rural cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico. Finalmente, los discontinuos se cargan con las

materias primas en una sola carga o lote, después de un cierto periodo de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se vuelven a alimentar dando inicio a un nuevo proceso de fermentación, lo que se conoce también como digestores Batch (Moreno, 2011).

Adicional al tipo de reactor que se decida emplear, es importante tener en cuenta las características principales del sustrato, las cuales están definidas en cuanto al potencial de producción de biogás y consisten en: la biodegradabilidad, dada por la relación entre sólidos totales y sólidos volátiles del efluente; la humedad, que se determina por la proporción de sólidos totales o materia seca, y la concentración de sólidos volátiles del efluente, la cual es una de las variables que más influyen en la producción de biogás (Hernández F. , 2015). En ese orden de ideas, parámetros mencionados como es el caso del contenido de sólidos volátiles se interpreta en términos de materia orgánica, teniendo en cuenta que a $550\pm 50^{\circ}\text{C}$ la materia orgánica se oxida formando el gas carbónico y agua que se volatilizan, de donde la concentración de dicho gas estará disponible como fuente de alimento para los microorganismos.

Así como es relevante considerar las características del sustrato, también se debe tener en cuenta una posible hipótesis de los fundamentales problemas en la producción de biogás, como son las elevadas concentraciones de sulfuro de hidrógeno y los bajos rendimientos de metano. Lo anterior, se puede esbozar de las relaciones ecológicas que se establecen entre los grupos microbianos de los residuos alimenticios y sus particularidades metabólicas (Ferrer & Pérez, 2010).

Igualmente, el inóculo es otro componente fundamental, el cual consiste en una suspensión de microorganismos que busca que éstos salgan de su etapa de “bajo metabolismo” y se adapten a las condiciones de cultivo. En ese orden de ideas, su preparación implica el desarrollo de una población de microorganismos, desde su estado de conservación hasta obtener una suspensión de microorganismos viables y aptos para reproducirse. Los métodos de preparación tienen dos finalidades: obtener el máximo de viabilidad de los microorganismos así como evitar que pierdan las características para producir los metabolitos de interés (Hernández A. , 2003).

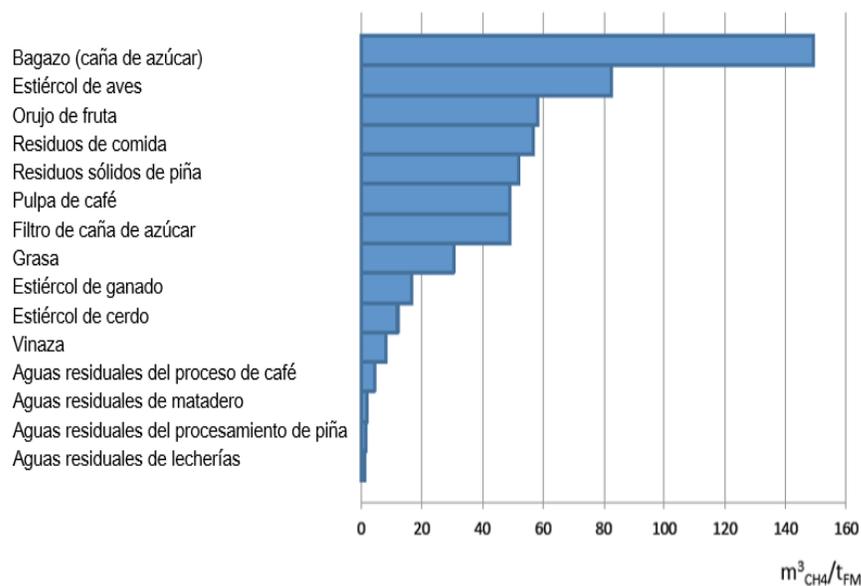
De esta manera, la producción de metano es una alternativa clave para la obtención de energías alternativas que ayuden en la preservación del medio ambiente, por ello, en los últimos años este proceso se ha estudiado en detalle. Según el resumen ejecutivo del año 2016 proporcionado por REN21 (Red de políticas en Energía Renovable para el siglo 21), las energías renovables se han establecido en todo el mundo como una importante fuente de energía. Su rápido crecimiento, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías renovables, iniciativas de política aplicada, un mejor acceso al financiamiento, seguridad

energética y cuestiones de medio ambiente, demanda creciente de energía en economías en desarrollo y emergentes, y la necesidad de acceso a una energía modernizada. En consecuencia, en los países en desarrollo están surgiendo mercados nuevos, tanto para la energía renovable centralizada como para la distribuida (Sawin, 2017).

De acuerdo con ello, se debe resaltar que en el mundo se producen aproximadamente 1600 millones de toneladas por año de residuos sólidos (Skinner, 2000), los cuales generan graves problemas, no sólo por el deterioro progresivo del medio ambiente, sino también desde el punto de vista económico puesto que los costos de recolección, transporte y disposición final son cada vez mayores. Se estima que los servicios de disposición, tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos mueven mundialmente un mercado anual de 100000 millones de dólares, de los cuales 43000 millones corresponden a Norteamérica, 42000 millones a la Unión Europea y sólo 6000 millones a Suramérica, siendo la producción de residuos de 250, 200 y 150 millones de toneladas por año respectivamente (Skinner, 2000).

Ahora bien, en el caso puntual de Colombia, las cifras del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial indican que en un día el país produce aproximadamente 9.488.204 toneladas al año de residuos sólidos, de los cuales se reciclan alrededor de 1.775.191 toneladas anuales entre vidrio, cartón, papel chatarra y plástico. De acuerdo a estas cifras, tan solo el 18% de los residuos se recicla en el país, es decir que más del 80% va a los rellenos, mezcladas, sin ningún tratamiento (Minambiente, 2017).

Por su parte, con los residuos grasos de alimentos desperdiciados en restaurantes, cocinas comerciales o proveedores de servicios alimenticios se genera metano para ser usado como una fuente de energía alternativa. Es importante mencionar que a estos residuos generalmente no se les da una adecuada eliminación y se sabe que la digestión anaerobia es una buena opción para transformar el contenido de dichos residuos en energía mediante una acción concertada de microorganismos. Además, se ha demostrado que los residuos grasos tienen un alto potencial de producción de biometano (BMP), el cual es un parámetro que determina la producción total de dicho biogás a partir de diferentes materiales orgánicos (Doran, 1995). En la gráfica 1 se observan las principales fuentes de obtención de metano a partir de fermentación anaerobia.



Gráfica 1: Principales fuentes de obtención de metano (Scholwin, 2016).

En ese orden de ideas, el BMP, se define como el volumen de metano producido por cantidad de sustrato añadido al biorreactor (Cuixia Liu, 2016). El análisis de BMP debe llevarse a cabo en un período relativamente corto de tiempo, por el menor costo posible de una manera estandarizada. Existen pocos métodos universalmente aceptados para la determinación de BMPs para residuos orgánicos (Amaya O., 2013).

El Instituto Alemán de Normalización (DIN) ha desarrollado un método estándar de laboratorio DIN 38414-17 para el análisis de la producción de biogás (Deutsches Institut für Normung, 2015a, b, c). Este método utiliza un dispositivo de vidrio especializado llamado eudiómetro que mide los cambios en el volumen de gas, permitiendo la evaluación de la producción de biogás durante un período de seis semanas. Este es el método estándar utilizado en muchas partes del mundo para determinar la producción de biogás a partir de un sustrato determinado, este método requiere cristalería especializada, mano de obra intensiva y permite medir tanto la cantidad como la calidad del biogás.

Por otro lado, el Sistema Automatizado de Pruebas de Potencial de Metano II (AMPTS) es un sistema y método de pruebas de BMP recientemente desarrollado en Suecia. Este método utiliza un sistema más automatizado que el anterior y mide automáticamente la producción de biogás en biorreactores tipo batch. A medida que se produce el biogás, una unidad de fijación de dióxido de carbono del sistema AMPTS se une al dióxido de carbono, el cual es un producto importante en la digestión anaerobia. El contenido de metano del biogás se calcula restando la cantidad de CO₂ de la cantidad total de biogás producido. Este método de laboratorio requiere un equipo especializado, proporciona cantidad de biogás y se

realiza en un tiempo más corto que el método DIN (Kleinheinz & Hernández, 2016).

De acuerdo con ellos, se han realizada varios estudios a nivel regional y mundial, para el primer caso se encuentra por ejemplo, la investigación realizada por Cadavid y Bolaños, de la Universidad Nacional, quienes determinaron el potencial bioquímico de metano de residuos de frutas y verduras y de los residuos de poda de una ciudad colombiana intermedia (Palmira, Colombia), los que se estudiaron con el fin de analizar su potencial para producir energía renovable. En esta investigación todas las muestras fueron tomadas de forma representativa y en fresco. El potencial bioquímico de metano final de los residuos frutas y verduras fue de $0,710 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$ adicionado, el cual es 2 veces mayor al obtenido para los residuos de poda. Finalmente, se determinó que la totalidad de los residuos de frutas, verduras y de poda que se produce en la ciudad de Palmira al año, sería posible producir 5.489 MWh de energía térmica ó 3.295 MWh de energía eléctrica (Cadavid & Bolaños, 2015).

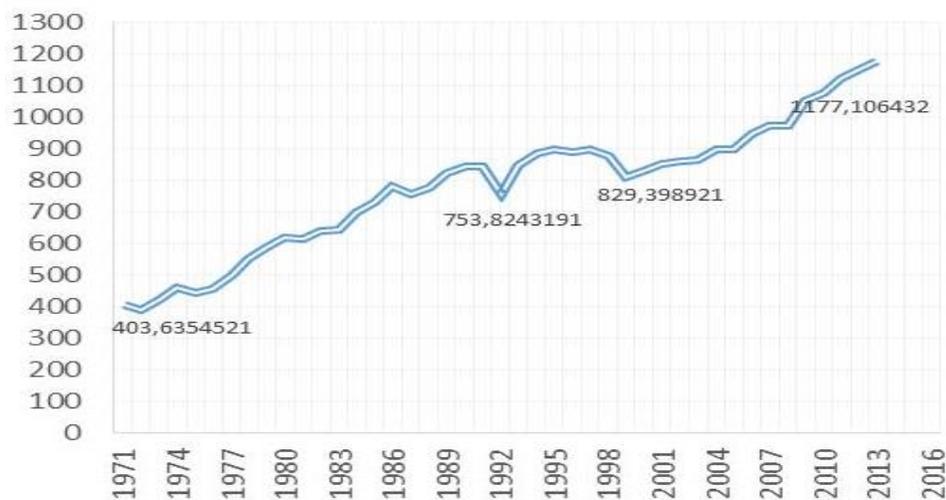
Considerando ahora el panorama internacional, según la investigación realizada por Liu Chang, *et al*, China también comenzó a prestarle atención al potencial de biometano y su perspectiva de desarrollo, eligiendo la biomasa apropiada como fuente de biometano. En este trabajo, se evaluaron 5 recursos y se supuso que dos cultivos energéticos apropiados se plantarían en tierras marginales para la producción de biometano. Se estimó que los potenciales de biometano teóricos y prácticos en China pueden alcanzar a 888.78 y 316.30 mil millones de m^3 por año, los desechos agrícolas deberían ser la biomasa de desarrollo preferencial. Finalmente, el biometano se compara con el gas natural, y el resultado mostró que se puede suplir el 48,15% del consumo total de gas natural (Liu, *et al* 2015).

El biogás se utiliza actualmente en su mayor parte, en plantas de cogeneración, con una eficacia muy alta para la generación de electricidad y calor. La electricidad producida puede alimentarse en la red pública o utilizarse para el suministro de energía independiente de áreas comerciales e industriales o urbanizaciones rurales de red remota. El calor de escape puede usarse para generar electricidad adicional; pero también para calefacción, o para el funcionamiento de máquinas frigoríficas (Rojas, R., 2012). Con el uso energético de los restos orgánicos no sólo se proporciona una solución para la desactivación de gran cantidad de este tipo de residuos con lo que se genera un impacto positivo a nivel ambiental, sino que también se facilita satisfacer la demanda energética para el desarrollo de algunas actividades humanas, con lo que se obtiene una ganancia económica importante.

El biogás está compuesto por alrededor de 60% de gas metano y 40% de dióxido de carbono, con un contenido mínimo de otros gases, entre ellos 1% de ácido sulfhídrico. Tiene un poder calorífico promedio de 5000 Kcal, donde un metro cúbico de biogás permite generar 11,70 kW/h (Preciogas , 2017). De igual manera, puede ser utilizado como cualquier otro combustible, y constituye una tecnología

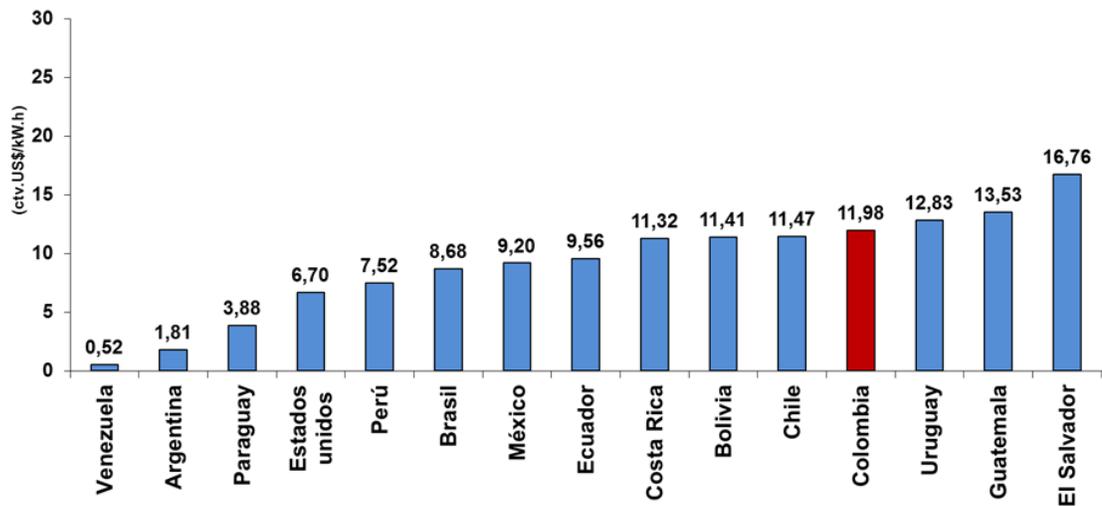
limpia pues los productos generados de su quema se encuentran en menores concentraciones que las de los combustibles tradicionales. Algunas de las aplicaciones son: la cocción de alimentos; el alumbrado mediante lámparas adaptadas; en calderas para generación de calor y electricidad, en motores o turbinas para generar electricidad y en pilas de combustible. Sin embargo, es importante aclarar que este gas puede usarse como combustible sólo cuando el metano se encuentra en concentraciones mayores o iguales a 50% dentro de la mezcla de gases obtenida (Biomasa: Digestores Anaerobios, 2007).

Teniendo en cuenta que, en el mundo la demanda de energía eléctrica es elevada y en general tiene fuertes consecuencias negativas para el medio ambiente, se despertó el interés científico por obtener parte de ésta mediante diferentes tipos de residuos que también contribuyen de forma desfavorable al ambiente. Los datos reportados por el Banco Mundial, para el consumo de energía eléctrica per cápita en Colombia correspondiente a los años entre 1971 y 2013 se ilustran en la gráfica 2.



Gráfica 2: Consumo de energía eléctrica en Colombia (KW/h per cápita) (Datos Banco Mundial).

De acuerdo con la gráfica 2, se observa un aumento marcado en el consumo, el cual es proporcional al incremento en el número de habitantes del país y a una mayor actividad económica y empresarial, por ejemplo el aumento en el consumo entre el año 2000 y 2013 ha sido del 41.9%, el incremento en estas cifras es importante dado las consecuencias que tiene sobre el medio ambiente, lo que se constituye en un llamado a tomar acciones y fomentar el uso de energías alternativas.



Gráfica 3: Tarifas de electricidad para América Latina en el año 2015 (Revista Dinero, 2015).

Una vez considerado el incremento en el consumo de energía eléctrica y su impacto a nivel ambiental, es indispensable resaltar las tarifas de electricidad en el sector industrial dado el alto consumo mensual. En la gráfica 3, se puede evidenciar que Colombia posee la cuarta energía más costosa de América Latina, sus costos han aumentado en un 11% desde el 2008 lo que aumenta el precio de los productos del país. Si se hace una comparación con Estados Unidos, Colombia tiene un costo por KW mayor en un 78% (Dinero, 2015).

En ese orden de ideas, las estadísticas mencionadas ponen en manifiesto la necesidad de disminuir el consumo de energía, sin embargo, con el ritmo de vida actual de la población es más viable hacer uso de energías alternativas y es ahí donde el presente proyecto provee un aporte valioso. Aunque, las muestras de estudio pertenecen a una zona específica, los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a otros residuos de alimentos que se den en mayor proporción. Por lo tanto, se consideran datos fundamentales a tener en cuenta como punto de partida en una investigación relacionada.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Aprovechar los residuos orgánicos sólidos generados por las cafeterías Central y Bristo casa SAE de la Universidad Icesi en el segundo semestre del 2017, para la obtención de biogás.

2.3.2 Objetivos específicos

- ✓ Definir el régimen de muestreo según la cantidad, tipo y manejo de los residuos orgánicos de las cafeterías Central y Bristo casa SAE.
- ✓ Caracterizar fisicoquímicamente los residuos orgánicos de acuerdo a su humedad, sólidos volátiles, relación C:N, pH y sólidos.
- ✓ Determinar el potencial de biometano de los residuos orgánicos y su proyección energética.

2.4. Metodología

2.4.1 Plan de muestreo

Como primera medida, se realizó una entrevista a Juan David Uribe, analista de gestión ambiental de la oficina de Salud Ocupacional y Medio Ambiente (SOMA), para conocer la cantidad de residuos orgánicos sólidos generados y su forma de eliminación, y con base a ello establecer la dinámica de muestreo. De acuerdo a la cantidad, tipo y manejo de los residuos orgánicos de las cafeterías a evaluar, con el fin de obtener muestras variadas según el menú, se procedió a recolectar del tanque de almacenamiento de los residuos en cada una de dichas cafeterías, una única muestra cada día, por una semana. Se procuró obtener una mezcla representativa del contenido del recipiente, para lo cual se sumergió la mano a una profundidad considerable (empleando guantes con manga), se homogenizó el contenido y se extrajo la cantidad necesaria para el desarrollo del experimento (aproximadamente 200g).

2.4.2 Caracterización de los sustratos

Para la determinación de los sólidos volátiles (SV) se secó una fracción de cada muestra a 110°C durante 24 horas, se pesó, y posterior al secado se llevaron a una mufla a 500°C durante otras 24 horas. Finalmente, se obtuvieron los SV por diferencia de peso, para lo cual se pesó cada muestra antes y después del procedimiento (Torres, 2006). En cuanto a la humedad, esta se determinó pesando la muestra y luego exponiéndola a una temperatura de 110°C por 24 horas, y pesando nuevamente.

La determinación del pH se realizó mediante la elaboración de una suspensión de acuosa del sustrato al 20%, a la que se le midió el pH con ayuda de un pH-metro. Para una mayor confianza en los resultados, cada prueba se realizó por duplicado.

2.4.3 El inóculo

Se empleó como inóculo lodo anaerobio proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas de la ciudad de Cali, Valle del Cauca.

2.4.5 Determinación de la producción de biogás

En primer lugar, se establece la relación de los sólidos volátiles del sustrato respecto a los sólidos volátiles del inóculo en el reactor, con el fin de mantener una relación 1:6 (sustrato: inóculo) para generar una buena interacción entre ellos. Dicha relación fue determinada como óptima en investigaciones anteriores, la cual está fundamentada en el deseo de que el factor limitante de la digestión no sea la fuente de microorganismos sino el alimento, es decir que las bacterias tengan la capacidad de consumir todo el sustrato que se adicione y no que haya una disminución en la cantidad de gas que se produce debido a saturación por parte del sustrato. Posteriormente, se procede a cargar cada reactor, con la cantidad de muestra estipulada mediante una plantilla creada en Excel para conservar dicha relación, estos reactores fueron mantenidos en baño María a 35°C, con agitación constante por un periodo de una semana, para establecer la cantidad de biogás producida y una semana adicional para hacer seguimiento del mismo; sin embargo, para el duplicado el experimento se realizó sólo para la primera semana, porque la producción mayor de biogás se genera en ese periodo.

Una vez realizado el montaje descrito (ver figura 2), el cual se conformó por 15 reactores, cada uno con capacidad de 1L y con agitación independiente, se procedió a determinar el volumen de gas que se produjo. Para ello, se proporcionó una celda con agua acidificada para cada reactor, por las cuales pasa el gas que

se va produciendo. Dichas celdas cuentan con un interruptor que gira cuando se ha completado un volumen dado.



Figura 2: Montaje experimental para la obtención de biogás

Una vez obtenidos los datos de BMP, se realiza la proyección energética de los sustratos, siguiendo la ecuación 1, donde se considera que por cada metro cúbico de biogás se generan 11,07 KWh.

$$\frac{KWh}{m^3} \times \frac{m^3}{1000000} \times \frac{\text{promedio de BMP}}{g} \times \frac{1000 g}{1 Kg} = \text{Capacidad energética} \frac{KWh}{Kg} SV \quad \text{Ec. 1}$$

2.4.6 Cuantificación de metano en el biogás producido

A cada una de las bolsas que se le acondicionaron a los reactores para la recolección del biogás, se le determinó el contenido de metano con un analizador de biogás portable, BIOGÁS 5000 (ver figura 3), del cual se obtuvo la cantidad de metano presente en la muestra de biogás, al conectar la bolsa de aire con la válvula de entada del equipo. Continuo a la válvula de entrada se encuentra la de salida, la cual se conectó a un extractor para retirar el gas del laboratorio.



Figura 3: Analizador de biogás empleado, BIOGÁS 5000

2.4.7 Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente al azar, donde las unidades experimentales fueron los reactores de 1L de capacidad, con su respectivo sistema de agitación constante. Se hizo un total de dos tratamientos a las muestras, uno de los cuales consistió en la homogenización de la misma y en el otro caso, se trabajó con la muestra tal como se recolectó, para estudiar si había algún efecto del estado físico de la muestra sobre el proceso de digestión.

2.4.8 Tratamiento estadístico de los datos

Para establecer si se tiene diferencia significativa en los resultados obtenidos, tanto para los tratamientos dados a las muestras como para la cantidad de producto generado, se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis, dado que los datos no cumplen con el supuesto de normalidad para realizar a (ANOVA). Se empleó el software Minitab 17, con un nivel de significancia del 95% para todas las pruebas.

2.4.9 Matriz de marco lógico

Tabla 1: Matriz de marco lógico

Objetivo general: Aprovechar los residuos orgánicos sólidos generados por las cafeterías Central y Bristo casa SAE de la Universidad Icesi en el segundo semestre del 2017, para la obtención de biogás.			
Objetivo específico	Actividades	Supuestos	Indicadores
Definir el régimen de muestreo según la cantidad, tipo y manejo de los residuos orgánicos de las cafeterías Central y Bristo casa SAE.	<p>Entrevista a los funcionarios de SOMA encargados del manejo de residuos.</p> <p>Establecimiento de los días de mayor demanda.</p> <p>Establecimiento de los días de muestreo.</p> <p>Establecimiento de los momentos de recolección durante el día.</p>	<p>Disponibilidad de muestras.</p> <p>No hay variabilidad en el Menú de las cafeterías de semana a semana</p>	<p>Entrevista realizada.</p> <p>Días de mayor demanda establecidos.</p> <p>Días de muestreo establecidos.</p> <p>Momentos de muestreo establecidos.</p>
Caracterizar fisicoquímicamente los residuos orgánicos de acuerdo a su humedad, sólidos volátiles, relación C:N, pH y sólidos.	<p>Determinación de los sólidos volátiles.</p> <p>Determinación de la humedad.</p> <p>Determinación de relación C:N</p> <p>Determinación del pH.</p>	<p>Disponibilidad de muestras, equipos y reactivos.</p> <p>Disponibilidad de los resultados de la relación C:N.</p>	<p>Porcentaje de sólidos volátiles establecido.</p> <p>Humedad determinada.</p> <p>Relación C:N determinada.</p>

<p>Determinar el potencial de biometano de los residuos orgánicos y su proyección energética.</p>	<p>Establecimiento de la relación C:N del inóculo.</p> <p>Carga de los biorreactores.</p> <p>Determinación del volumen de gas producido.</p> <p>Establecimiento de la cantidad de metano producida.</p>	<p>Disponibilidad de muestras, equipos y reactivos.</p>	<p>Relación C:N establecida.</p> <p>Biorreactores cargados.</p> <p>Volumen de gas establecido.</p> <p>Cantidad de metano cuantificada.</p>
---	---	---	--

2.5 Resultados y Discusión

2.5.1 Plan de muestreo

Con base a la entrevista realizada a colaboradores de SOMA (Ver anexo 1), se obtuvieron algunos datos relevantes para establecer el régimen de muestreo. En primer lugar, los residuos de los alimentos cocinados no pueden ir a compostaje, porque su descomposición es complicada y genera muchos olores. Por lo tanto, dentro de las instalaciones de la Universidad no se le da uso a estos residuos orgánicos sólidos y es mucho material que se está enviando al relleno sanitario. Este es un hecho puntual que permite ver en la realización del proyecto una oportunidad para cambiar el rumbo de los desechos y aprovechar su potencial de producción de metano en actividades demandantes de energía dentro de la universidad.

Por otra parte, las cantidades de residuos que se generan a diario en las cafeterías, fue un factor determinante para establecer cuáles de ellas eran más representativas para la toma de muestra. De acuerdo con los promedios de generación de residuos, el día en el que se produce una mayor cantidad de éstos es el jueves. En cuanto a la cantidad generada por cafeterías, se tiene que la producción más significativa la ofrecen Central con 35kg y Bristo casa SAE con 20Kg, por ello se decidió realizar el muestreo en estas dos cafeterías.

En cuanto a la recolección, ésta se hace 4 veces al día, dos generales de la universidad y dos exclusivas de cafeterías. Las primeras son a las 7am y a la 1pm

y pasan por cafeterías; las exclusivas son a las 11am y a las 5pm. Es importante resaltar que a estos residuos no se les hace ningún tratamiento dentro de la Universidad, éstos son almacenados en barriles plásticos y cada mañana son recolectados por Promoambiental. Con base en esta información, se estipuló hacer la toma de muestra dos veces al día durante una semana, cada una antes de las recogidas exclusivas. Sin embargo, esto no se pudo llevar a cabo, dado que al momento de recolectar la primera muestra, se evidenció que en realidad no se hacen las recolectas de Promoambiental para estos residuos. Por el contrario, los residuos son almacenados en tarros azules de PVC, durante toda la semana y los lunes pasa a recogerlos una persona que emplea estos residuos para alimentación de cerdos. En ese orden de ideas, se cambió el plan de muestreo y se decidió hacer la toma una vez al día durante una semana.

2.5.2 Caracterización de los sustratos

Los resultados obtenidos en la caracterización de cada una de las muestras se presentan en la tabla 2. De acuerdo con ello, la muestra con mayor contenido orgánico es la del martes.

Tabla 2: Resultados obtenidos en la caracterización de las muestras

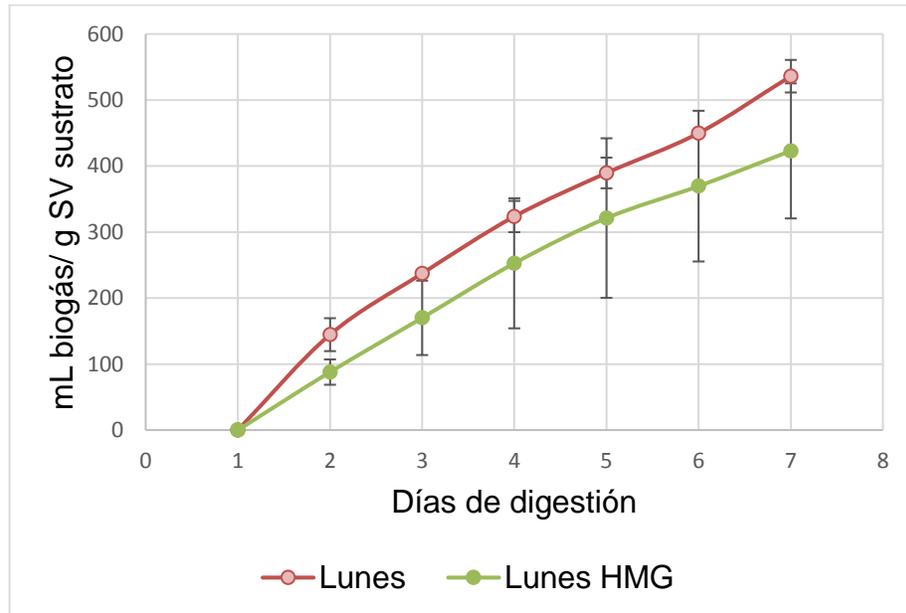
Muestra	%SV	% humedad	Relación C:N	pH
Lunes	18,86	81,14	43,47:7,76	4,95
Martes	25,03	74,97		5,24
Miércoles	19,78	80,22		5,25
Jueves	18,21	81,79		5,21
Viernes	19,21	80,79		5,14
Promedio	20,22	79,78		5,16
Desviación	2,75	2,75		0,12

Según la teoría, un alto contenido de humedad en las muestras puede favorecer la etapa de hidrólisis que ocurre en fase inicial de la digestión anaerobia (González, G. et al 2008). Por su parte, el porcentaje de SV indica un alto contenido de materia orgánica biodisponible y el pH idealmente debería estar entre 6.6 a 7.6, para evitar procesos de inhibición (Li, C. et al 2010). Adicionalmente, la relación C:N para las comidas es cercana a 15/1, siendo 43,47/7,76 el valor obtenido para las muestras estudiadas, se puede evidenciar que en promedio dichas muestras tienen un relación óptima para ser empleados como sustrato. Contrastando esto con los resultados obtenidos, las muestras son adecuadas para obtener buenos rendimientos en la producción de biogás, exceptuando el valor de pH que puede

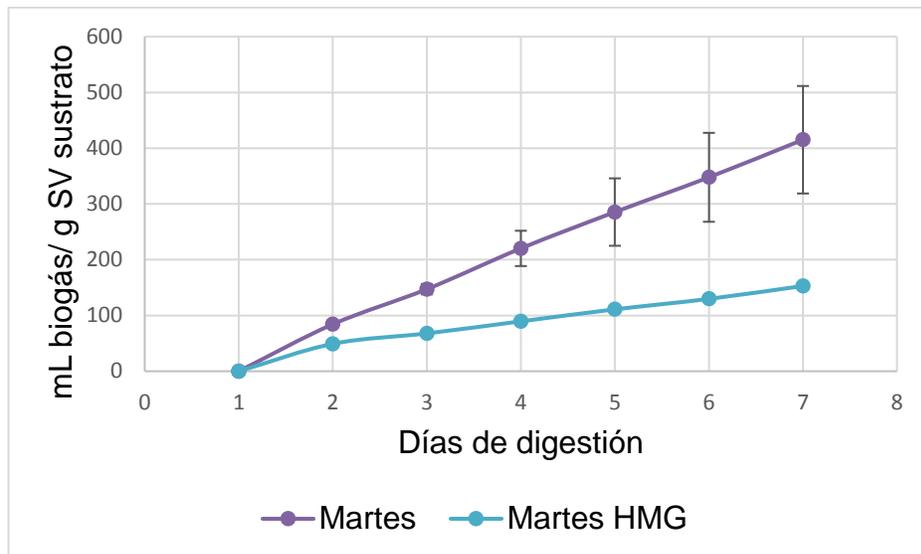
ser causante de una disminución en el rendimiento, por encontrarse un poco por debajo del rango ideal para los procesos anaerobios.

2.5.2 Determinación de la producción de biogás

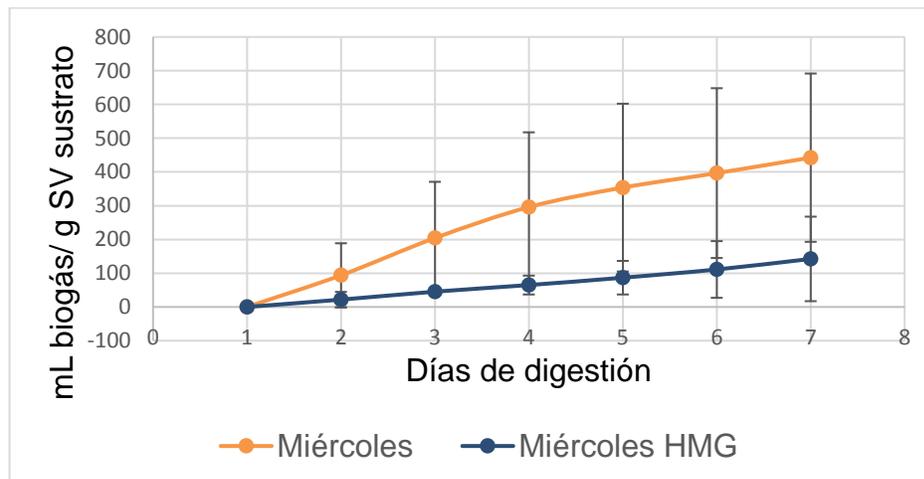
La cantidad de biogás obtenida en los primeros 7 días tanto para la muestra sólida como para la homogenizada y los respectivos controles positivos, se presentan en las gráficas 4 a 9. La celulosa se emplea como control positivo, por ser esta un polisacárido que requiere de la hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis para que las arqueas metanogénicas la usen como fuente de carbono (Rodríguez, E. et al 2005).



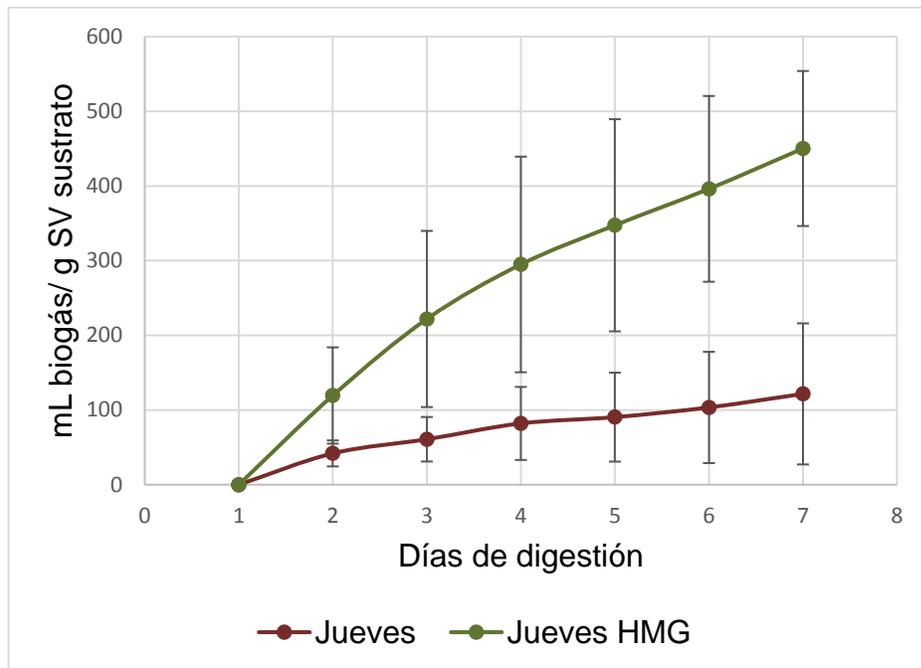
Gráfica 4: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del lunes en los primeros 7 días. Las muestras rotuladas con HMG corresponden a las muestras que fueron homogenizadas.



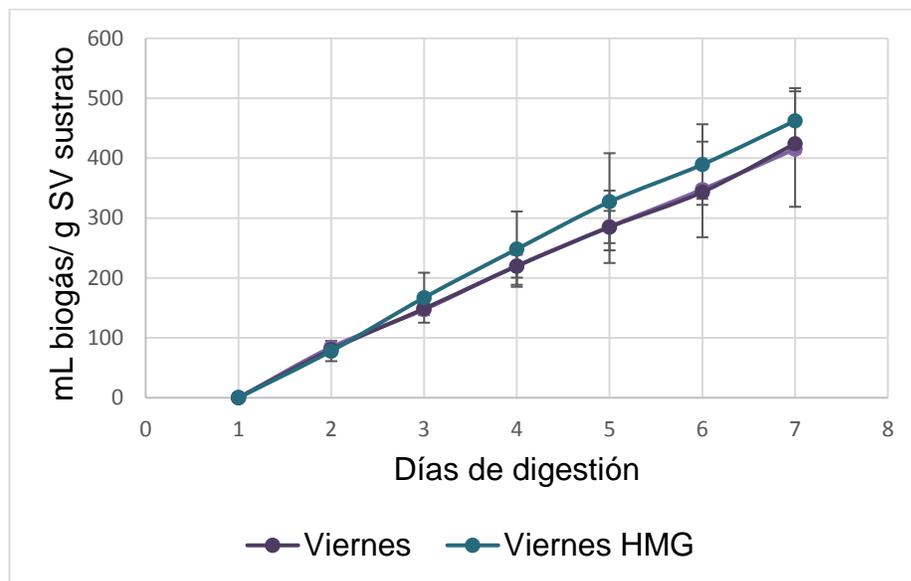
Gráfica 5: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del martes en los primeros 7 días. Las muestras rotuladas con HMG corresponden a las muestras que fueron homogenizadas.



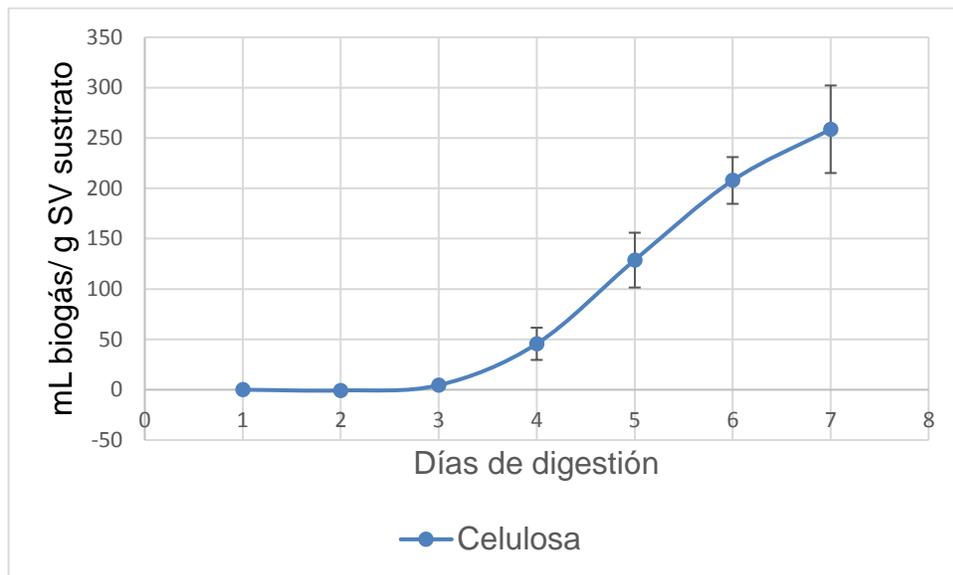
Gráfica 6: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del miércoles en los primeros 7 días. Las muestras rotuladas con HMG corresponden a las muestras que fueron homogenizadas.



Gráfica 7: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del jueves en los primeros 7 días. Las muestras rotuladas con HMG corresponden a las muestras que fueron homogenizadas.



Gráfica 8: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra del viernes en los primeros 7 días. Las muestras rotuladas con HMG corresponden a las muestras que fueron homogenizadas.

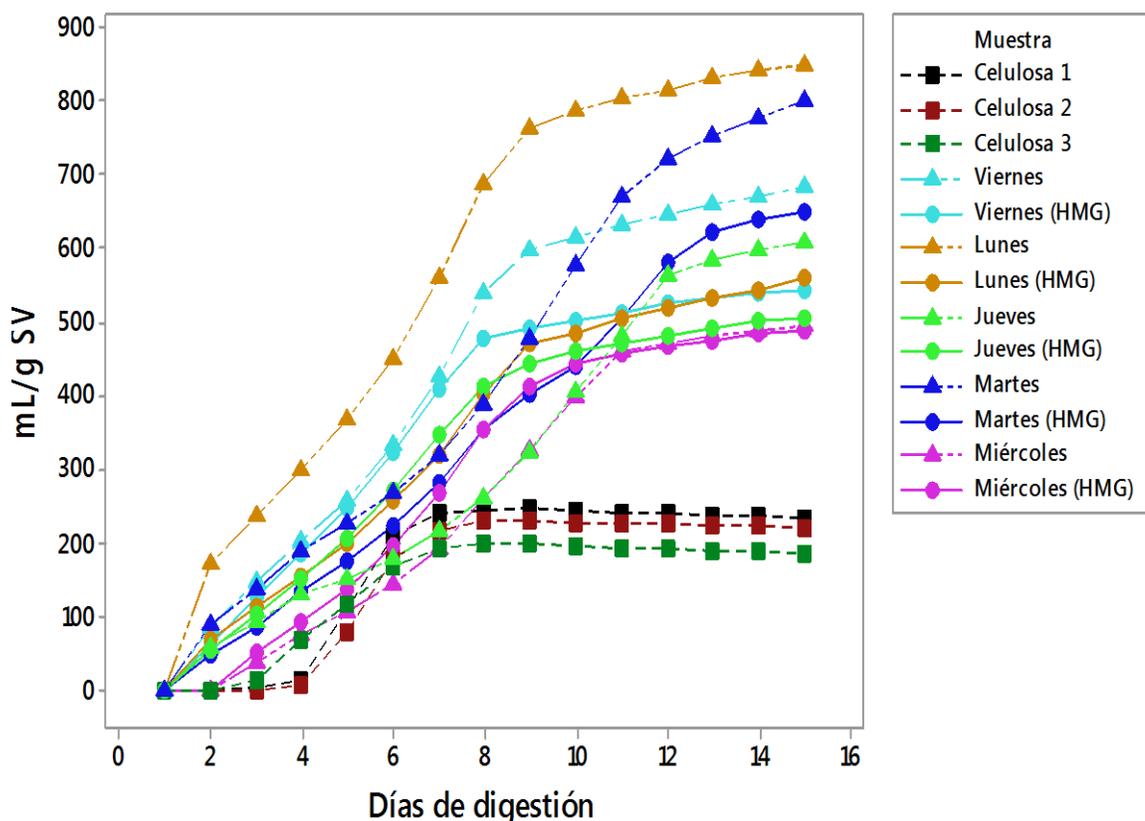


Gráfica 9: Producción promedio de biogás obtenida para la muestra de control en los primeros 7 días, siendo la celulosa el control positivo. Las muestras rotuladas con HMG corresponden a las muestras que fueron homogenizadas.

La tendencia mostrada para la primera semana en las gráficas 4 a 9, tiene un crecimiento constante para todas las muestras, dado que las bacterias del inóculo comienzan a usar el sustrato, lo que se traduce en un incremento en la cantidad de biogás producida. La caracterización de las muestras presentada en la tabla 2 y los resultados ilustrados en las gráficas 4 a 9, indican que la muestra con mayor digestibilidad es la correspondiente al lunes o en su defecto, es la muestra que presente menor cantidad de compuestos inhibidores del proceso de digestión anaerobia. La mayor digestibilidad de esta muestra es producto de su composición, lo cual indica que predomina la presencia de carbohidratos simples y por el contrario, su contenido de grasas y otros constituyentes complejos, es bajo.

Este análisis realizado para la primera semana, se hizo con el fin de evaluar la reproducibilidad de los datos, dado que en esta etapa inicial del proceso es donde se presenta la mayor variabilidad en la producción de biogás. Como se observa en las gráficas 4 a 9, las desviaciones permiten concluir que el experimento es reproducible.

Los resultados obtenidos para la segunda semana se presentan en la gráfica 10, donde se puede apreciar el comportamiento de las muestras para la duración completa del estudio, es decir las semanas 1 y 2.



Gráfica 10: Producción de biogás obtenida para cada muestra en los 15 días de estudio. Se empleó la celulosa como control positivo. Las muestras rotuladas con HMG corresponden a las muestras que fueron homogenizadas.

En ese orden de ideas, la primera semana de estudio indica una tendencia al incremento de la producción de biogás con el paso de los días. Sin embargo, para esperar que la generación de biogás se estabilice y determinar el tiempo en el que se obtiene una cantidad máxima del mismo, se realizó seguimiento por una semana adicional. En la gráfica 5, se presenta el comportamiento de las muestras durante la duración total del estudio, en el cual como ya se mencionó, la producción de biogás incrementa con el tiempo para la primera semana. Sin embargo, al inicio de la segunda semana la generación del mismo se estabiliza, dado que la materia orgánica biodisponible se empieza a agotar. En este caso, la muestra que generó el mejor rendimiento corresponde a la del lunes, con un acumulado de 849,92 mL/g SV a pesar de tener un contenido de SV bajo comparado con las demás muestras, lo cual evidencia que el rendimiento del proceso está determinado por el conjunto de parámetros evaluados, por lo que no sería correcto hacer un análisis separado para cada uno de ellos. El análisis estadístico correspondiente se plantea en el anexo 3.

Con los resultados de las pruebas estadísticas, se pretende establecer si se tiene diferencia significativa en el tratamiento de las muestras. Es decir, determinar si la producción de biogás depende del estado físico de la muestra y establecer si se ve favorecida la homogenización o si ésta no es necesaria. De acuerdo con el anexo 2, los datos no cumplen con el supuesto de normalidad, por lo tanto se deben emplear pruebas no paramétricas para hacer las comparaciones necesarias, en este caso se hará uso de la prueba de Kruskal Wallis.

Por su parte, en el anexo 3 se presenta la comparación entre el volumen de biogás producido por las muestras homogenizadas y las que no tuvieron dicho tratamiento.

Se establece con un 95% de confianza que existe diferencia significativa en la producción de biogás con respecto al tratamiento de las muestras. Lo que implica que el rendimiento puede estar determinado por el estado físico de la muestra, por tanto, es posible que al homogenizar la muestra se facilite el acceso de las bacterias al material orgánico, dado que se aumenta el área superficial del mismo. De esta manera, cuanto mayor sea la superficie expuesta al ataque microbiano por unidad de masa, más rápida y completa será la reacción. Por lo tanto, el desmenuzamiento del material facilita el ataque de los microorganismos y aumenta la velocidad del proceso (Haug, 1993). Sin embargo, no se recomiendan partículas demasiado pequeñas, puesto que puede quedar aire atrapado entre partículas y esto afecta negativamente en proceso de digestión anaerobia.

Adicionalmente, como se puede notar en el comportamiento de la gráfica 10, a partir de la segunda semana la generación de biogás deja de ser significativa, por lo cual no es necesario que se dejen las muestras más tiempo en incubación, ya que el proceso no va a generar mayores rendimientos, entonces lo ideal es que éste se pare en los primeros días de la segunda semana. De igual manera, se considera necesario hacer tratamiento de homogenización ya que el proceso depende de la composición química de la muestra, pero también de su estado físico.

En seguida, se consignan los resultados de BMP obtenidos para cada una de las muestras, los cuales se calcularon con base al punto de inflexión de las curvas generadas con los valores acumulados de volumen de biogás/g SV. En primer lugar, a partir de las curvas de la cinética de las muestras, presentada en la gráfica 10 de acuerdo con los días de digestión y el volumen de biogás producido, se obtiene la primera deriva de cada curva y finalmente, se realiza la segunda derivada y se hace el cálculo de los BMP cuando los días tienden a infinito.

Tabla 3: Resultados de BMP obtenidos para las muestras evaluadas

Muestra	BMP (mL biogás/g SV)
Lunes	848,63
Lunes HMG	510,75
Martes	768,75
Martes HMG	694,03
Miércoles	392,89
Miércoles HMG	489,91
Jueves	755,60
Jueves HMG	489,91
Viernes	732,41
Viernes HMG	574,03
Promedio	625,69
Desviación estándar	144,93

De acuerdo con la tabla 3, la muestra que proporciona un mejor valor de BMP es la del lunes, lo cual es consistente con el comportamiento observado en la gráfica 10. Por lo tanto, se determina que dicha muestra tiene un mayor potencial de producción de biogás, siendo su valor de pH una característica diferencial sobre las otras muestras, el cual es un poco más ácido. Por ello, se puede determinar que el pH bajo no afecta el potencial de producción de biogás, empero esta diferencia se puede deber principalmente a la composición de la muestra, lo cual es difícil de establecer dado que el almacenamiento de las muestras sesga un poco esta determinación.

Finalmente, los valores de BMP obtenidos se encuentran dentro del rango de los valores reportados por Davidson et al, 2007, para los residuos orgánicos sólidos (0,300 a 0,570 m³/Kg SV). Por lo tanto, se puede inferir que los sustratos evaluados en el presente proyecto, son buenos para la producción de metano y por lo tanto se esperarían grandes rendimientos en escala industrial.

2.5.3 Cuantificación de metano en el biogás producido

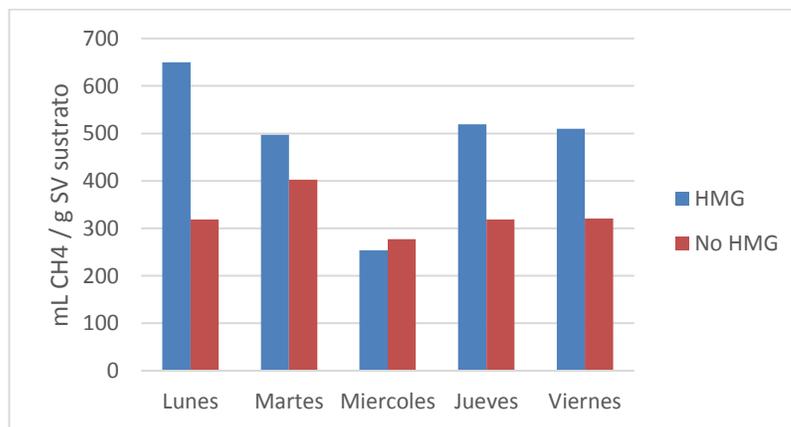
La cantidad de metano presente en el biogás producido, arrojada por el BIOGÁS 5000 para las muestras se consigna en la tabla 4. Donde, el valor mayor se obtuvo de la muestra tomada el día lunes. Además, se planteó con un 95% de confianza que no hay diferencia estadística significativa entre el volumen de gas generado y el porcentaje de metano obtenido (ver anexo 4), lo que se evidencia en la tabla 4, dado que no se observa un patrón en los resultados de estos dos parámetros evaluados. Ahora bien, esto se debe a que en la mezcla de gas producida lo que se tiene es una relación del metano con respecto al gas total y esta se va a

conservar en todo el contenido de gas para cada muestra. Las muestras de las que no se reporta dato, corresponden a las muestras de las que no se generó el volumen requerido para hacer la medición.

Tabla 4: Valores de metano obtenidos para las muestras, reportados en mililitros por gramos de sólidos volátiles añadidos y en porcentaje

Muestra	mL CH ₄ /g SV	%CH ₄
Lunes	529,851	62,436
Lunes HMG	390,969	76,548
Martes	471,275	61,304
Martes HMG	447,920	64,539
Miércoles	246,138	62,648
Jueves HMG	298,296	60,888
Viernes	409,425	55,901
Viernes HMG	364,888	63,566
Promedio	394,845	63,479
Desviación estándar	377,970	63,609

Los resultados del anexo 3, soportan las conclusiones de las pruebas estadísticas, dado que hay una tendencia marcada en el comportamiento de alguno de los tratamientos dados a las muestras. El compendio global de los resultados permite inferir que la muestra con mejores rendimientos corresponde a la del lunes y que el día de máxima producción de biogás es alrededor del día 8. Con base a ello, se estima que efectivamente, la muestra del lunes presentaba bajas cantidades de material orgánico complejo como las grasas y más bien, era una muestra rica en compuestos carbonados simples.



Gráfica 11: Diagrama de barras para presentar los BMP de los dos tratamientos. Donde, se ven favorecidas las muestras que fueron homogenizadas y el mayor rendimiento de la muestra del lunes. HMG hace referencia al tratamiento de la muestra.

Con la información aportada por la tabla 5, se relaciona la cantidad de metano producida, el BMP, los tratamientos de la muestra y el día en el que se alcanza la estabilización del proceso. Según esto, la muestra con mayor potencial de producción de biometano es la del lunes, el tratamiento que se favorece el homogenizado y el día en el que se hace insignificante la producción de biogás.

Finalmente, con base en los datos reportados por planta física de la Universidad Icesi, los requerimientos eléctricos de la misma, fueron en promedio de 412.771 KWh entre los meses de marzo a agosto del 2017. En ese orden de ideas, si se desea hacer un aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos generados dentro de la misma, se podría obtener hasta 4,620 KWh/Kg, partiendo de que por cada metro cúbico de metano se generan 11,70KWh.

De acuerdo con la proyección energética realizada, si se decidiera hacer uso del total de los residuos sólidos orgánicos de estas dos cafeterías (110 Kg semanales), se generarían alrededor de 101.540 KWh por mes, con lo cual se cubriría el 25% de la demanda energética de la Universidad. Adicionalmente, se disminuiría la cantidad de material orgánico a eliminar, lo que se traduce en un ahorro extra.

En ese orden de ideas, los KWh generados se podrían emplear en iluminación eléctrica, conociendo que una bombilla de 100 W que dura encendida 10 horas consume 1 KWh, se alcanzarían a cubrir los requerimientos de diez bombillas al mes. Lo cual es un gran aporte dada la cantidad de tiempo que permanecen encendidas y por lo tanto se traduciría en ahorro interesante a nivel económico.

2.6 Conclusiones

Los valores de BMP determinados, se encuentran dentro de los rangos esperados. Por lo que, los sustratos evaluados presentan un buen potencial para la producción de metano. En concordancia con las pruebas estadísticas, el rendimiento va a ser dependiente del tamaño de partículas del material orgánico. En este caso, la muestra que generó el mejor BMP es la del lunes, con un valor de 848,63 mL/ g SV. Adicionalmente, se estableció a partir de la segunda semana la producción de biogás deja de ser significativa, por lo tanto es considera parar el proceso en ese punto.

Por otra parte, en cuanto a la proyección energética de los sustratos evaluados, con la generación de 101.540 KWh/Kg, la Universidad puede suplir algunas de sus necesidades más demandantes de energía, pues con esa proyección energética se esperaría cubrir un 25% de la demanda mensual, de esa manera se da utilidad

a residuos que se producen en grandes cantidades y están siendo desaprovechados.

2.6 Recomendaciones

Se debe considerar la cuantificación del metano mediante una técnica diferente a la empleada con el BIOGÁS 5000, por ejemplo cromatografía de gases, dado que se requiere colectar un volumen considerable para que el equipo puede realizar una buena lectura y en este caso algunas de las muestras no generaron gran cantidad de biogás. Además, se comprobó que el porcentaje de metano no depende de la cantidad de biogás producido y esto pudo ser un generador de perdida de datos relevantes.

Para establecer las causas específicas en la estabilización de la producción de biogás, se sugiere realizar mediciones de los microorganismos, con el fin de establecer si dicha estabilización es debida al agotamiento de materia orgánica o una saturación de los microorganismos requeridos en el proceso.

En lo posible, se debe conocer la composición de las muestras, es decir establecer el menú del que provienen para identificar con mayor facilidad su digestibilidad. En este caso no fue posible, dado que el almacenamiento de los residuos no lo permite.

Adicionalmente, aunque se estableció que el tratamiento homogéneo incrementa la producción de biogás para un periodo de tiempo determinado, es importante evaluar si el porcentaje de la diferencia es lo suficientemente bueno como para invertir en el proceso de homogenización.

2.8 Referencias

- Amaya O., M. C.-T. (2013). Microbial biomass in batch and continuous system. *Environmental Engineering*, 449-474. Obtenido de www.intechopen.com/books/biomass-now-sustainable-growth-and-use/microbial-biomass-in-batch-and-continuous-system
- Aza, M. R. (2004). Manual Granja Integral Autosuficiente. En *Manual Granja Integral Autosuficiente* (págs. 193-197). Bogotá: San Pablo.
- Bermúdez, M., Cánovas, A., Manjon, J., & Howell, A. (1988). *La Digestión Anaerobia*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Biomasa: Digestores Anaerobios. (2007). *Energías Renovables*, 8-13.
- Cadavid, L., & Bolaños, I. (2015). Aprovechaamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad de Colombia. *Energética (46)*, 23-28.
- Cuixia Liu, S. R. (2016). *Diplosphaera* sp. MM1 – A microalga with phycoremediation and biomethane potential. *Bioresource Technology*, 1170-1177.
- Dinero, R. (2015). ¿Por qué es tan cara la energía eléctrica en Colombia? *Dinero*.
- Doran, P. M. (1995). *Bioprocess engineering fundamentals*. Londres: Academic Press.
- Ferrer, Y., & Pérez, H. (2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento. En *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* (págs. 9-20). ICIDCA.
- González, G. I., Rustrián, E., Houbon, E., & Zamora, A. (2008). Impacto de la tasa de humedad en la biodegradación de los residuos sólidos urbanos de la ciudad de Veracruz. *Revista Latinamericana. Recursos Naturales 4(3)*, 336-341.
- Haug, R. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers., 76.
- Hernández, A. (2003). *Microbiología Industrial*. Costa Rica: UNED.
- Hernández, F. (2015). *Biogás: 10 casos de éxito en el sector industrial*. Bogotá.

- Jaramillo, G., & Zapata, L. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. *Documento inédito*.
- Kleinheinz, G., & Hernández, J. (2016). Comparison of two laboratory methods for the determination of biomethane potential of organic feedstocks. *Journal of Microbiological Methods*, 54-60.
- Li, R., Chen, S., & Li, X. (2010). Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste with dairy manure in a two-phase digestion system. *Biotechnology* 160(2), 643-654.
- Liu, C., Wang, J., Ji, X., Qian, H., Huang, L., & Lu, X. (2015). Una estimación teórica y práctica de la producción de biometa en China. *Chiese Journal of Chemical Engineering* , 920-928.
- Lorenzo, A., & Abreu, O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA*, 35-48.
- Merlinsky, M. (2011). La acción colectiva ambiental y la construcción política del problema de los residuos sólidos urbanos. El cierre del relleno sanitario de Villa Domínico: controversias y aprendizajes. *Gris Público Americano*, 150-171.
- Minambiente. (12 de 06 de 2017). Obtenido de Ministerio de Ambiente : <http://www.minambiente.gov.co/>
- Moreno, M. T. (2011). Manual de Biogás . Santiago de Chile : Proyecto CHI/00/G32 .
- Preciogas* . (19 de 08 de 2017). Obtenido de <http://preciogas.com/faq/factor-conversion-gas-natural-kwh>
- Rodríguez, E., Gamboa, M., Hernández, F., & García, J. (2005). Bacteriología General: Principios y prácticas de laboratorio. Costa Rica: Universidad de Costa Rica .
- Rojas. Rebeca, M. L. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + limpia*, 74-94.
- Sawin, J. (27 de 03 de 2017). *REN21*. Obtenido de Energías Renovables 2016: Reporte de la Situación Mundial: <http://www.ren21.net>
- Scholwin, F. (2016). *Instituto de Biogás* . Obtenido de www.biogasundenergie.de.
- Skinner, J. H. (12 de Septiembre de 2000). Worldwide MSW Market Reaches \$100Billion. *Swana CEO Report*, pág. 17.

Stoecklein, A., & Suárez. (1998). *Gestión integral de residuos sólidos. Primer Seminario Regional de Capacitación en Residuos Sólidos*. Pereira: 17-84.

Torres, C. (19 de 01 de 2006). *Universidad Tecnológica de Panamá*. Obtenido de <http://www.utp.ac.pa/sites/default/files/PCUTP-CIHH-LSA-211-2006.pdf>

2.9 Anexos

2.9.1 Plan de muestreo

Anexo 1: Entrevista

Nombre de la institución: Universidad Icesi

Nombre del entrevistado: Juan David Uribe

Cargo: Analista de gestión ambiental de la oficina de Salud Ocupacional y Medio Ambiente (SOMA)

Entrevistadora: Yurany Arelis Medina

Lugar de la entrevista: Edificio K (antigua Casa Rocha) primer piso

Fecha de la entrevista: 15 de septiembre del 2017

Se le solicitó al entrevistado información sobre el manejo de los residuos sólidos orgánicos de las cafeterías de la universidad Icesi, en cuanto a cantidades, depósito final, costos, frecuencia de recolección, recipientes de almacenamiento y tratamientos a dichos residuos, a lo que respondió lo siguiente:

“En este momento lo que se genera dentro de la cafetería mientras se cocina por ejemplo: cáscaras y todo eso, gran parte se va como residuo ordinario, se va para relleno sanitario y otra parte más pequeña se está usando en la planta de compostaje para hacer abono con otros desechos orgánicos de hojas, ramas y todo eso... Lo que ya está cocinado, lo que sobra de los platos no se va para compostaje porque es más complicado de descomponerse y genera más olores.

La parte que se recoge de las mesas se está yendo también a relleno, no se está usando. La idea es implementar un compostaje externo con una empresa que se llama SURASURA, porque en este momento la planta de la universidad no tiene capacidad para estos residuos, pero ya está la propuesta para hacerlo externo, porque es mucho material que se está mandando a un relleno sanitario y no se está aprovechando, el problema es que va a ser costoso, la universidad no ha querido hacer eso, lo ideal es que lo hagan las concesiones de cafetería, porque ellos en el contrato tienen unos límites de generación, entonces la universidad les va a cubrir un límite de residuos al mes (10m³ de residuos) y la idea es que el exceso ya ellos lo paguen, toca llegar a esa negociación con ellos, en este momento la propuesta es de 600 pesos el kilo y pienso yo que eso mensualmente se puede ir casi que una tonelada en las cafeterías y pues siempre es la cosa de que a la cafetería se le suben los costos entonces van a tener que subir los precios y por eso vamos por ahí como suave...

Básicamente es eso, porque lo que más se genera en las cafeterías es eso y desechables que ahorita le estamos haciendo un reciclaje y cuando recogen de las mesas los muchachos de SUMAR, que son los que hacen esa recolección interna en el edificio por lo menos de cafeterías, ellos hacen la clasificación de los desechables para una campaña de cambia el rumbo del plástico cambia tu mundo, están haciendo madera plástica con los desechos plásticos livianos.

En cafetería se hace recolección 4 veces al día, hacen una a las 7am y otra a la 1pm, que son generales de la universidad y pasan por cafeterías. La otra a las 11am y a las 5pm que son sólo para cafeterías.

A diario se generan por cafetería aproximadamente, por ejemplo el día jueves que es de los días que más se genera:

Central: 35kg

Bristo casa SAE: 20Kg

Las dos del samán juntas: 38Kg

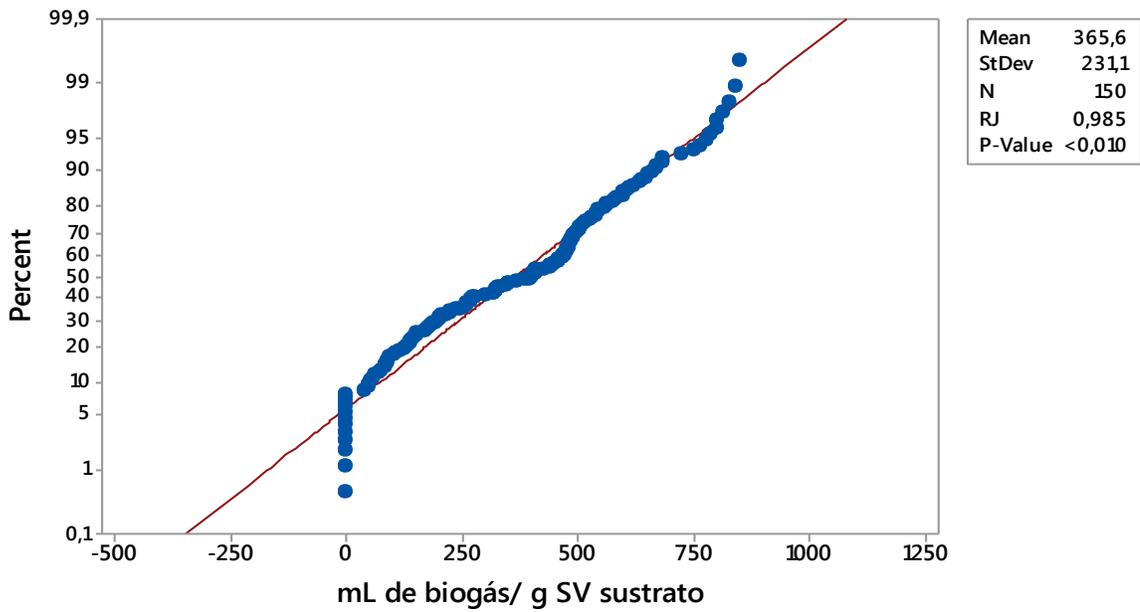
Entonces se tiene entre 20 y 35 Kg diarios por cafetería

Por fuera también hacen compostaje... hay otro proyecto de grado con una estudiante de ingeniería industrial con Erick Peterson para usarlos en biodigestores, es como la idea que tiene Erick también para usarlo para generar gas.

Los residuos sólo se recogen, se almacena y diariamente se despachan con Promoambiental.

El almacenamiento se hace en la UTR un edificio que queda al fondo y diariamente vienen los de Promoambiental y los recogen en la mañana.”

2.9.2 Pruebas estadísticas



Anexo 2: Supuesto de normalidad de Ryan-Joiner. Coeficiente de Ryan-Joiner de 0,985 y p-valor<0,05. No se cumple el supuesto de normalidad.

Kruskal-Wallis Test on mL/ g SV

grupo	N	Median	Ave Rank	Z
jueves	6	29,96	6,2	-3,60
jueves HMG	6	464,42	44,7	2,09
lunes	6	379,95	38,3	1,16
lunes HMG	6	396,60	40,0	1,40
martes	6	298,92	34,8	0,64
martes HMG	6	46,72	13,2	-2,56
mierc	6	559,83	49,7	2,83
mierc HMG	6	36,99	9,2	-3,15
viernes	6	275,36	31,7	0,17
viernes HMG	6	359,62	37,3	1,01
Overall	60		30,5	

H = 41,98 DF = 9 P = 0,000

H = 41,99 DF = 9 P = 0,000 (adjusted for ties)

Anexo 3: Resultados de la prueba Kruskal-Wallis para comparar el volumen de biogás producido en los dos tratamientos dados a las muestras. Se establece con un 95% de confianza que hay diferencia significativa entre la producción de biogás de las muestras homogenizadas y las no homogenizadas en la primera semana.

Kruskal-Wallis Test: VOL versus %CH4

Kruskal-Wallis Test on VOL

%CH4	N	Median	Ave	
			Rank	Z
63,5659	1	543,9	4,0	0,00
63,6034	1	505,0	3,0	-0,50
64,5390	1	650,3	6,0	1,00
64,6173	1	799,6	7,0	1,50
68,7166	1	494,5	2,0	-1,00
69,6477	1	486,5	1,0	-1,50
76,5478	1	559,1	5,0	0,50
Overall	7		4,0	

H = 6,00 DF = 6 P = 0,423

Anexo 4: Resultado de la prueba Kruskal-Wallis para comparar el volumen de biogás producido con el porcentaje de metano obtenido para cada muestra. Se establece con un 95% de confianza que no hay diferencia significativa entre el de volumen producido y el porcentaje de metano obtenido.

