



# Análisis preliminar de la viabilidad de obtención de bioetanol a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos\*

José Alejandro Martínez Sepúlveda\*\*, Nancy Johana Montoya Gómez\*\*\*

**Preliminary analysis of the feasibility to obtain bioethanol from the organic fraction of municipal solid waste**

**Análise preliminar da viabilidade de obtenção de bioetanol a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**

## RESUMEN

**Introducción.** El aprovechamiento no convencional de los residuos sólidos urbanos (RSU), y en particular, para las condiciones de América Latina en donde más del 54 % de los RSU corresponden a residuos de características orgánicas, termina siendo una posibilidad para agregar valor; generar crecimiento económico y crear condiciones de trabajo dignas para las personas vinculadas al aprovechamiento informal de residuos. Por ello, aprovechando el potencial de la biotecnología que ofrece diversas opciones para la generación de energías renovables, se busca abordar la producción de bioetanol a partir de procesos biológicos de metabolización de la materia orgánica mediante fermentación. **Objetivo.** Analizar de forma preliminar la producción de bioetanol a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), con el fin de suplir de una forma innovadora la demanda de este compuesto como biocombustible y como insumo para procesos industriales. **Materiales y métodos.** Se desarrollaron pruebas a escala en laboratorio a partir de una muestra sintética producida con base en

---

\* Artículo derivado de la investigación “Análisis de la viabilidad de obtención de bioetanol a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU)”, informe final de investigación realizado por la Ingeniera Nancy Johana Montoya G. para optar al título de Especialista en Gestión de Residuos Sólidos de la Universidad EAN, dirigido por el Ingeniero José Alejandro Martínez S. en el año 2012. \*\* Ingeniero químico, magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, doctorando en Administración estratégica de negocios (PUCP, Perú). Especialista en manejo de residuos sólidos y peligrosos (UNAM-JICA), en energías alternativas (CEDET, CIEMAT España) y diplomado en Educación Ambiental (PUJA, Colombia) y en Desarrollo sostenible (Lauphana, Alemania). Docente asociado y coordinador de programa en la Facultad de Postgrados de la Universidad EAN - Bogotá, Colombia. Investigador en Gestión Ambiental Empresarial. e-mail: jamartinez@ean.edu.co \*\*\* Ingeniera Ambiental, Especialista en Gerencia de Proyectos y Especialista en Gestión de Residuos Sólidos, Universidad EAN - Bogotá, Colombia. Especialista Universitario en manejo de Residuos Sólidos y remediación de Suelos Contaminados. Universidad Castilla de la Mancha – UCLM (Ciudad Real, España). Consultora.

D. J. Martin et al. (1997); se monitoreó pH, concentración de etanol, glucosa y DQO, y gases como  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , con sensores calibrados para tales fines. Las medidas de los parámetros convencionales se tomaron de acuerdo con los métodos normalizados de análisis (APHA, 1998), comúnmente utilizadas en el análisis de aguas. Para el caso de la determinación de los sólidos suspendidos totales (SST) y de los sólidos suspendidos volátiles se usó el método que se rige por las Normas 2540 D y 2540 E. **Resultados.** Tras colocar la FORSU en un reactor con agitación y recirculación constante, se obtuvo una mezcla con suficiente contenido de materia orgánica (DBO de 16100 mg/l) para la realización de la fermentación anaerobia; los análisis de las concentraciones reportaron crecimiento de los organismos productores de etanol y la producción del mismo. El rendimiento en la producción de etanol alcanzado fue de 0.5 gr etanol / gr de glucosa para el tiempo de prueba de cerca de 35 horas. **Conclusión:** Al hidrolizar la FORSU en un reactor con agitación y recirculación constante, se obtuvo suficiente contenido de materia orgánica para, posteriormente obtener por vía fermentativa anaerobia bioetanol de segunda generación a partir de la FORSU.

**Palabras clave:** residuos sólidos urbanos (RSU), bioetanol, aprovechamiento, fermentación anaerobia, biocombustibles.

## ABSTRACT

**Introduction.** Not conventional use of municipal solid waste, and particularly under the Latin American conditions –where more than 54% of such waste corresponds to waste with an organic origin- is a possibility to add value, generate economic growth and create decent work conditions for the people involved in the informal use of the waste. Therefore, and using the potential options bio technology offers to generate renewable energies, bioethanol production from biological metabolism processes of organic matter by means of fermentation is projected. **Objective.** To analyze, in a preliminary way, bioethanol production from the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) in order to supply in an innovative way the demand of such compound as a bio fuel and as an input for industrial processes. **Materials and methods.** Scale tests were performed in a laboratory, from a synthetic sample based on D.J. Marin et al. (1997). The pH, the ethanol concentration, the glucose and the CDO were monitored, and gases such as  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ , were measured with sensors adjusted for those purposes. The measurements of the conventional parameters were taken according to the normalized methods of analysis (APHA, 1998), usually used to analyze water. To determine the total suspended solids (TSS) and the volatile suspended solids, the method established by rules 2540 D and 2540 E. was used. **Results.** After putting the OFMSW in a reactor with agitation and constant re-circulation, a liquid mixture with enough organic matter (16100 mg/L of BOD) to have the anaerobic fermentation was obtained. The analysis of the concentrations reported the growth of the organisms that produce ethanol, and also the production of that ethanol. The performance achieved under ethanol production terms was 0.5 gr ethanol / gr of glucose for the testing time around 35 hours. **Conclusion.** After putting the OFMSW in a reactor with agitation and constant recirculation, a liquid mixture with enough organic matter content for the anaerobic fermentation was obtained, and this fact addressed a process in which bioethanol production through an anaerobic fermentative way from OFMSW was possible.

**Key words:** municipal solid waste (MSW), bioethanol, use, anaerobic fermentation, biofuel.

## RESUMO

**Introdução.** O aproveitamento não convencional dos resíduos sólidos urbanos (RSU), e em particular, para as condições da América Latina, onde mais de 54 % dos RSU correspondem a resíduos de características orgânicas, termina sendo uma possibilidade para agregar valor, gerar crescimento econômico e criar condições de trabalho dignas para as pessoas vinculadas ao aproveitamento informal de resíduos. Por isso, aproveitando o potencial da biotecnologia que oferece diversas opções para a geração de energias renováveis, procura-se abordar a produção de bioetanol a partir de processos biológicos de metabolização da matéria orgânica mediante fermentação. **Objetivo.** Analisar de forma preliminar a produção de bioetanol a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU), com o fim de suprir de uma forma inovadora a demanda deste composto como biocombustível e como insumo para processos industriais. **Materiais e métodos.** Desenvolveram-se provas a

escala en laboratorio a partir de una muestra sintética producida con base en D.J. Martin et al. (1997); se monitoró PH, concentración de etanol, glucosa e DQO, e gases como CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, con sensores calibrados para tales fines. As medidas dos parâmetros convencionais se tomaram de acordo com os métodos normalizados de análises (APHA, 1998), comumente utilizadas na análise de águas. Para o caso da determinação dos sólidos suspendidos totais (SST) e dos sólidos suspendidos voláteis se usou o método que se rege pelas Normas 2540 D e 2540 E. **Resultados.** Depois de colocar a FORSU num reator com agitação e recirculação constante, obteve-se um líquido, uma mistura com suficiente conteúdo de matéria orgânica (DBO de 16100 mg/L) para a realização da fermentação anaeróbia; as análises das concentrações reportaram crescimento dos organismos produtores de etanol e a produção do mesmo. O rendimento na produção de etanol atingido foi de 0.5 gr etanol / gr de glucosa para o tempo de prova de cerca de 35 horas. **Conclusão:** Depois de colocar a FORSU num reator com agitação e recirculação constante, obteve-se, uma mistura com suficiente conteúdo de matéria orgânica para a realização da fermentação anaeróbia, o qual conduziu a levar a cabo um processo no qual foi possível obter por via fermentativa anaeróbia bioetanol a partir da FORSU.

**Palavras importantes:** resíduos sólidos urbanos (RSU), bioetanol, aproveitamento, fermentação anaeróbia, biocombustível.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo del presente estudio de investigación, extractado del trabajo final de Montoya (2012) que se realizó en los laboratorios de la UCLM, consistió en analizar, a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), las probabilidades de obtención de bioetanol usado en la actualidad como alcohol carburante o biocombustible, así como insumo para algunos sectores industriales, reemplazando su origen de materiales que pueden tener otros usos estratégicos, como por ejemplo, la alimentación humana.

Si bien la implementación de la política nacional de producción y consumo colombiana y la política nacional de gestión integral de residuos sólidos han permitido que el país haya

... llegado a avances como el que actualmente el 79 % de los municipios del país dispongan sus residuos en sitios adecuados, tales como rellenos sanitarios y plantas integrales, siendo este porcentaje equivalente a 25.091 toneladas por día), así como el cierre preventivo y definitivo de sitios temporales de disposición en el territorio nacional que habían sido autorizados (o no) por la entidad competente respectiva... (Martínez, 2012).

Es claro que se requiere de opciones para reducir la cantidad de residuos que van a los rellenos y, de paso, aprovechar su potencial. El objetivo es investigar preliminarmente el proceso de producción de bioetanol y sus características durante la transformación de la materia orgánica, con miras al aprovechamiento no convencional de este material; en la actualidad, la materia orgánica se usa en la producción de compost o de humus a través de lumbricultivos; sin embargo, deben buscarse alternativas complementarias que permitan generar nuevos emprendimientos alrededor del tema.

Las características de uso de biocombustibles y sus normas en Colombia implican la necesidad de contener el 10 % como mínimo de etanol en la gasolina motor, con proyecciones de aumento a través del tiempo. Según el Ministerio de Minas y Energía (2010), el mercado objetivo principal corresponde al sector de la industria de los biocombustibles y los centros mayoristas de mezcla, que actualmente requieren mezclar diferentes concentraciones de etanol con el combustible fósil para motores. En Colombia, la Ley 693 de 2001 establece las características de uso de biocombustibles y los requerimientos del contenido de alcohol etanol en la gasolina motor. Colombia actualmente es el segundo productor de etanol en Latinoamérica después de Brasil; sin embargo, la materia prima compite fuertemente con el sector de alimentos en el mundo, lo que desata controversias de carácter técnico, social y ético.

El tema de las energías alternativas ha despertado una gran expectativa, en cuanto a las oportunidades que se tienen de aprovechar los residuos sólidos orgánicos, generar alto impacto ambiental, económico y social e impulsar el uso y desarrollo de los biocombustibles; la propuesta de innovación es producir bioetanol, como energías limpias alternativas, y subproductos, a partir de residuos que actualmente se desperdician y causan impactos negativos en los órdenes ambiental y social, y que no que no compiten con alimentos como materias primas para la generación de biocombustibles. Es ese, justamente, el asunto de que trata este artículo.

## Consecuencias del inadecuado manejo de residuos sólidos urbanos

Los residuos sólidos urbanos (RSU) tienen características físicas y químicas que, si se presenta un inadecuado manejo después de su generación, pueden generar problemas de salubridad y deterioro al ambiente. Los efectos más frecuentes provocados por el inadecuado manejo de los RSU son:

- **Contaminación atmosférica.** La fermentación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno genera metano que es un gas de efecto invernadero veinte veces más potente que el dióxido de carbono; es este gas metano ( $\text{CH}_4$ ) el que constituye el 50 % de las emisiones gaseosas producidas en los rellenos sanitarios. Otros gases que también son perjudiciales para la atmósfera y que pueden liberarse durante la disposición inadecuada de RSU son los compuestos orgánicos volátiles, el cloruro de vinilo y el cloruro de metilo.
- **Contaminación edáfica.** Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo se ven alteradas cuando sobre este se depositan residuos no biodegradables. Como consecuencia directa de una contaminación edáfica moderada se presenta la desaparición de la flora y la fauna de la región afectada, la alteración de los ciclos biogeoquímicos y la pérdida de nutrientes esenciales para la existencia de vida animal o vegetal. También se puede generar acidificación o salinización de los suelos, por cuenta de la acción de los lixiviados en el suelo. Se presenta también deterioro de la calidad microbiológica del suelo, por decrecimiento de los parámetros del mismo.
- **Contaminación de las aguas superficiales o subterráneas.** Los líquidos liberados por descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos –FORSU–, sumados a la percolación de la lluvia por un mal cubrimiento del sitio de disposición facilitan que sean arrastrados compuestos orgánicos, y a veces tóxicos, del material dispuesto, fenómeno que recibe el nombre de lixiviación; estas sustancias solubilizadas en los líquidos pueden afectar las características del suelo, así como las de las corrientes subterráneas de agua. Adicionalmente, pueden contener también metales pesados que cuentan con alto índice de toxicidad, perjudiciales para la salud. Los componentes más frecuentes que se encuentran en la caracterización de los lixiviados son el plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd), los cuales están presentes en materiales que se disponen de forma adecuada en los hogares, como pilas alcalinas, residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, entre otros.
- **Afectación por olores:** producto de la descomposición de la materia orgánica presente en gran parte de los RSU, principalmente el  $\text{H}_2\text{S}$ , se provoca una serie de malos olores, que se sienten con mayor facilidad dependiendo de la acción del viento y de la cercanía a sitios poblados.
- **Proliferación de plagas y aparición de focos infecciosos:** cuando se acumulan de forma incontrolada los RSU se favorece la proliferación de plagas como roedores e insectos y también la proliferación de aves carroñeras, entre otros vectores que pueden ser origen de focos de infecciones.

## Residuos sólidos urbanos en el mundo y en Bogotá

Hoy en día, como se menciona en Martínez (2012), cerca de 3 mil millones de habitantes generan en promedio 1.2 Kg por persona por día de RSU, para una generación mundial total de cerca de 1300

millones de toneladas por año; de esa cantidad, América Latina genera cerca de 160 millones de toneladas por año.

La composición de los RSU varía en todo el mundo de región a región, algo similar a lo que ocurre con el índice de generación de RSU per cápita; en particular, en América Latina el último informe del Banco Mundial estima que la fracción orgánica de los RSU es un 54 % del total de RSU; el papel tiene el 16 %, y el plástico, con el 12 %, distribución que corresponde a valores de países pobres y de ingresos medios, según menciona Betancourt & Martínez (2012).

El manejo de los residuos sólidos podría llegar a convertirse, entonces, en un problema ambiental para las ciudades, dado el proceso de urbanización que en el mundo se viene presentando en los últimos veinte años; en Colombia, de las más de 25.000 toneladas por día que se generan de residuos sólidos urbanos (RSU), solo Bogotá produce más del 26 %, esto es según la UAESP (2012) 6.600 toneladas diarias ... las cuales se disponen en el Relleno Sanitario Doña Juana (opción centralizada), adicional a las 1.200 toneladas día aproximadamente que no van a disposición final sino que se desvían a través de opciones no centralizadas de aprovechamiento (cooperativas de recicladores, opciones privadas de manejo postproducción, etc.)...” (Martínez, 2012). Esos RSU de la ciudad de Bogotá se disponen de manera mezclada, dañando el potencial de aprovechamiento de algunos materiales y agotando su capacidad y vida útil, con graves inconvenientes ambientales y sociales hacia futuro, por esta situación.

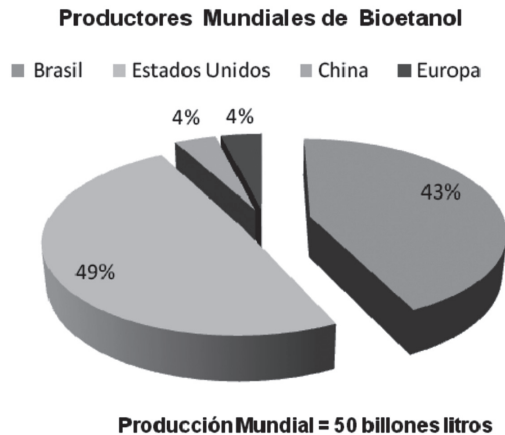
De esa cantidad que se dispone diariamente en la ciudad de Bogotá, más del 65 % corresponde a residuos orgánicos, lo cual es una cifra suficientemente grande como para interesar a autoridades locales y a inversionistas privados.

La Gestión Integral de los RSU, según la normativa vigente referente, comprende todas las actividades desde generación, recolección, transporte y almacenamiento, hasta separación y disposición final de los RSU. En general, en la actualidad, los componentes de la FORSU pueden ser transformados con el fin de obtener a partir de ellos nuevos productos con otras aplicaciones competitivas, como por ejemplo, los procesos de biometanización y compostaje, técnicas mediante las cuales se pueden obtener fuentes generadoras de energía que pueden usarse como combustible alternativo (para el primer caso) o productos de valor agregado con bajo impacto ambiental (en el segundo). Otros procesos que pueden encargarse de aprovechar energéticamente los RSU (incluyendo otras fracciones diferentes a la orgánica) son la gasificación, la hidrogenación, la pirólisis y la oxidación, muy usadas en los países desarrollados y que aún no son implementadas en nuestro país.

## Generación de bioetanol en Colombia

La producción de bioetanol en el mundo es manejada por algunas naciones como Estados Unidos, Brasil y Europa (figura 1); de Latinoamérica, según una entrevista de América Economía (2013),

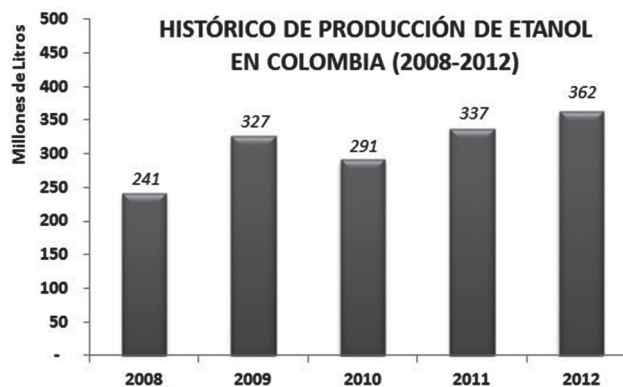
[...] se destacan Brasil, Argentina y Colombia como líderes en la producción de bio-combustibles en la región; desde el año 2000, su producción en el mundo ha crecido a un ritmo anual de 10 %, totalizando 90 187 millones de litros en 2009; de ese total, 82 % corresponde a bioetanol y 18 % a biodiésel; Brasil es el segundo productor de bioetanol del mundo, con 33,2 % de participación en el mercado, detrás de Estados Unidos (datos de 2009). Colombia, en tanto, figura en el décimo lugar de países productores, con 0,4 %. Argentina, es el segundo productor mundial de biodiesel, con 13,1 % del mercado, después de Estados Unidos que lidera con 14,3 %; Brasil se ubica en quinto lugar, con 9,7 % de participación...



**Figura 1. Principales productores de bioetanol en el mundo mundial**

Fuente: Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo de México (2010)

En Colombia 19 departamentos consumen mezcla de gasolina con 10 % de etanol, y cubren el 75 % de la demanda nacional, equivalente a aproximadamente 69 000 barriles/día, con posibilidades de incrementar la mezcla a 20 % y el cubrimiento al 100 % del país para el año 2015, según la Federación Nacional de Biocombustibles; en la figura 2 se puede observar el histórico de la producción de bioetanol en Colombia en los últimos años.



**Figura 2. Producción histórica de etanol en Colombia**

Fuente: Federación Nacional de Biocombustibles (2012)

En el país el principal productor de etanol es la industria azucarera a partir de la caña de azúcar con cinco plantas en operación (en Valle del Cauca, en Cauca y Risaralda), que producen en total 1 millón litros/diarios de alcohol carburante.

Existen otros proyectos de producción de etanol que se encuentran en etapa de desarrollo e investigación: uno para producir 20 000 L/día a partir de yuca en Puerto López, Meta; dos plantas más en el Valle de 150 000 L/día a partir de caña de azúcar; dos proyectos en el Meta con capacidad de 400 000 L/día también con caña de azúcar; y uno en Quindío con capacidad de 150 000 L/día con la misma materia

prima; entre otros proyectos se encuentran el de Boyacá, ubicado en la hoya del río Suárez (en límites entre Boyacá y Santander); además de lo localizados en la costa atlántica, Antioquia y Tolima.

El mercado objetivo en el país cada vez es más amplio. La alta demanda actual y la poca oferta hacen que el producto con óptimas características, bajos costos de producción con relación a otros procesos similares, y la creciente demanda por el auge ambiental en el mercado global favorezcan su aceptación en el mercado.

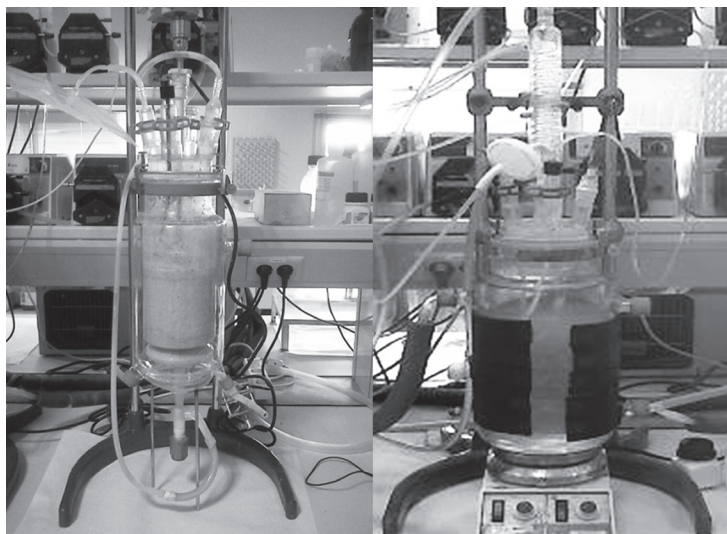
### **Materiales y métodos de la investigación**

Para el estudio preliminar de investigación se identificaron unos componentes de la FORSU que pueden ser transformados a bioetanol, previo desarrollo de un proceso llamado hidrólisis. Con el uso de esta etapa se puede llevar a cabo un proceso básico en el que la biomasa se transforma a moléculas de azúcares, las cuales pueden ser fermentadas y desde allí, ser transformadas a alcohol, en el cual, con su posterior destilación, se logrará obtener la pureza deseada.

La investigación experimental se llevó a cabo en los laboratorios de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) de España, en donde se implementó el diseño metodológico con base en estudios como los de Cinzia (2011), Jeon et al. (2007), Havva (2008) y Vázquez (2007), entre otros, incluyendo así diferentes fases experimentales requeridas para la evaluación del proceso con el fin de realizar el análisis al comportamiento de la FORSU mediante procedimientos biológicos y comprobar las probabilidades de la obtención de bioetanol y evaluar los resultados finales.

Durante el proceso global se llevaron a cabo cuatro fases experimentales, desarrolladas mediante la instalación a escala de laboratorio de un sistema biológico para cada proceso, a saber:

- Hidrólisis / solubilización de la FORSU
- Fermentación de glucosa sin control de pH
- Fermentación de glucosa con control de pH
- Fermentación de la FORSU



**Imágenes 1 y 2. Pruebas y puesta en marcha del biorreactor para el desarrollo de las fases de fermentación de la FORSU. Laboratorios UCLM – Ciudad Real, España.**

Para cada una de las fases (imágenes 1 y 2) se realizaron muestreos continuos del líquido, así como el análisis periódico de los gases; la descripción de las fases en detalle se presenta continuación:

### **Fase 1. Hidrólisis / solubilización de la FORSU**

En esta primera fase se realizó la preparación de la muestra mediante la cual se desarrolla el resto de procedimientos experimentales. La preparación de la muestra se ha realizado con base en una simulación de la composición de la FORSU, según Martín et al. (1997).

Inicialmente se procedió con la compilación de todos los componentes necesarios y posteriormente se realizó la trituración de los residuos orgánicos. Se efectuó la composición mezclada de los diferentes tipos de componentes orgánicos con un contenido de carga según se especifica a continuación en la tabla I.

**Tabla I. Características de la composición de la FORSU**

Componente	Cantidad (gr)	Componente	Cantidad (gr)
Papa	62	Naranja	49
Zanahoria	28	Tomate	20
Guisantes	13	Carne	22
Manzana	49	Pasta hervida	23
Banana	35	Arroz hervido	23
Repollo	51	Pan	35
Cebolla	30	Papel	50
Coliflor	10	<b>TOTAL</b>	<b>500 gr</b>

Adicionalmente se diluyó agua a la composición mezclada de materia orgánica, con una adición de agua destilada; la anterior mezcla se llevó a cabo en un biorreactor por un período de 14 días, con el objetivo de realizar la extracción de la materia orgánica por medio de hidrólisis y solubilización de la misma, con agitación continua de la mezcla por medio de un sistema de agitador mecánico. También se implementó un sistema de recirculación del líquido con el fin de garantizar la homogeneidad de la masa orgánica, del proceso y de las muestras analizadas.

Para hacer el respectivo análisis de los gases se adicionó nitrógeno con el fin de evacuar el oxígeno y evaluar los gases generados, producto de la fermentación.

### **Fase 2. Fermentación de glucosa sin control de pH**

En esta fase se llevó a cabo la instalación experimental para la fermentación de la glucosa (45 gr), sin control de pH, en una preparación del sustrato diluido, sales (340 ml) y levadura (4 gr) en agua destilada hasta completar 5 litros, con una temperatura controlada. La agitación del biorreactor se realizó mediante un agitador magnético colocado debajo del reactor debido a su diseño exterior con fondo plano.

### **Fase 3. Fermentación de glucosa con control de pH**

En esta fase se realizó la instalación experimental de la glucosa (27 gr) con control de pH, en una preparación del sustrato diluido, sales (200 mL) y levadura (2.4 gr) en agua destilada (hasta 3 litros), con temperatura controlada y con pH controlado en 5 para la estabilidad de los microorganismos.



#### Fase 4. Fermentación de la FORSU

Para el desarrollo de esta fase se usó la preparación de FORSU (186.5 mL) obtenida en la fase uno, con levadura (2.4 gr) y diluida hasta 3 litros en agua destilada, con control de pH (5.0) y una temperatura controlada.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases experimentales y sus respectivos análisis.

#### Fase I. Hidrólisis / solubilización de la FORSU

Para los resultados obtenidos de DQO, cada toma de muestra fue diluida en agua destilada, y se obtuvo el resultado que se aprecia en la figura 3.

Mediante cromatografía de gases se tomaron los datos para las mediciones de los compuestos evaluados presentes en los gases de las muestras. Después de analizar los datos arrojados por el sistema y de realizar las respectivas restas de calibrados se presentaron los siguientes resultados, en los que se detectó únicamente concentración de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ .

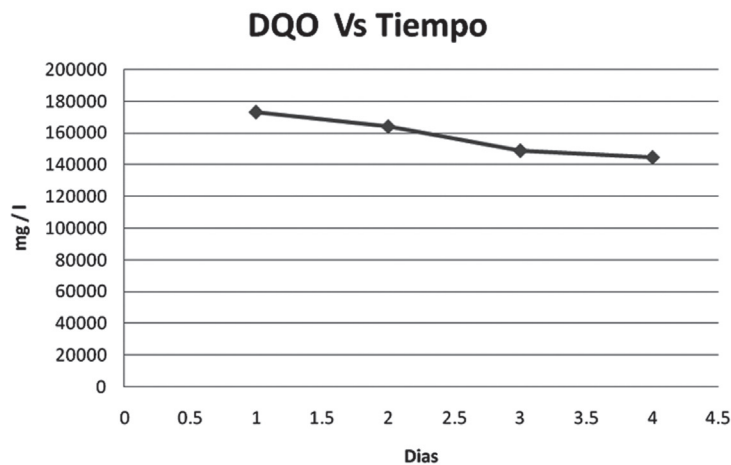
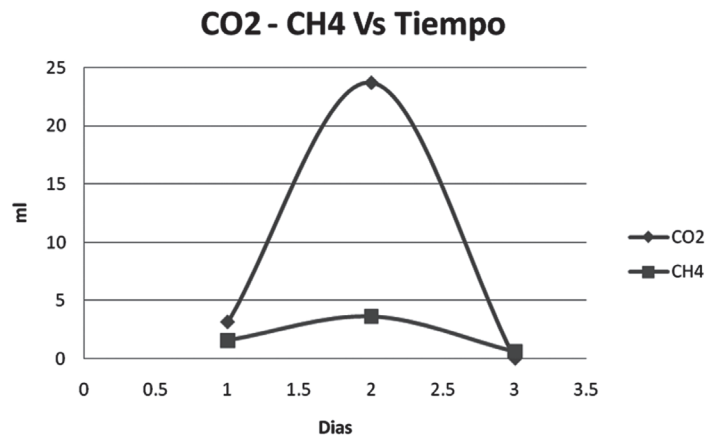


Figura 3. Variación DQO frente a Tiempo

Los resultados obtenidos de la DQO, como lo muestra la tabla 6, son valores altos que se encuentran por encima del promedio de lo que sería un relleno sanitario joven (< 2 años), en el cual la DQO oscila entre 3000 y 60 000 (mg/l); sin embargo, la solubilización de los compuestos orgánicos en el agua fue muy rápida, como lo muestra la gráfica de DQO. Como se puede apreciar, se destaca el descenso de la DQO en el tiempo, lo que podría ser debido a transformaciones anaerobias ocurridas durante este proceso, situación que se verifica con la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) y de  $\text{CO}_2$  del sistema, como se aprecia en la figura 4.

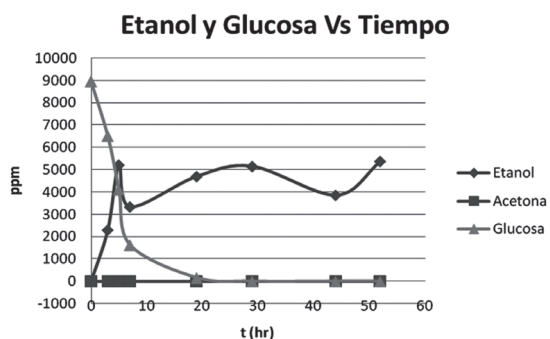


**Figura 4. Producción de gases frente a tiempo**

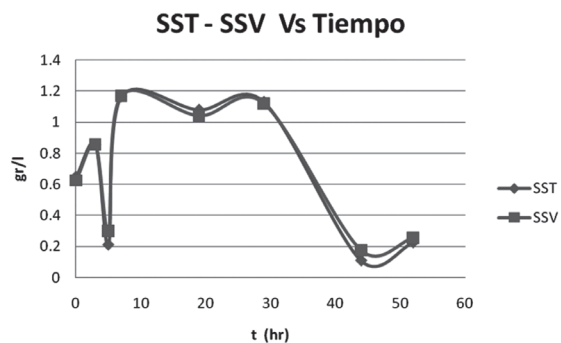
### **Fase 2. Fermentación de glucosa sin control de pH**

Las medidas de los parámetros convencionales se tomaron de acuerdo con los métodos normalizados de análisis (APHA, 1998), mediante técnicas comúnmente utilizadas en el análisis de aguas. Para el caso de la determinación de los sólidos suspendidos totales (SST) y de los sólidos suspendidos volátiles, se usó el método que se rige por las normas 2540 D y 2540 E, respectivamente. Los resultados obtenidos se presentan a continuación en las figuras 5 y 6.

En esta fase, realizados los experimentos sin control de pH, se observó producción de etanol; sin embargo, debido a la acidificación que sufrió el medio, provocó al mismo tiempo un descenso de la concentración de la biomasa, como se puede ver en la gráfica con respecto al tiempo. La concentración de biomasa aumentó hasta un valor máximo a partir del cual disminuyó considerablemente su concentración.



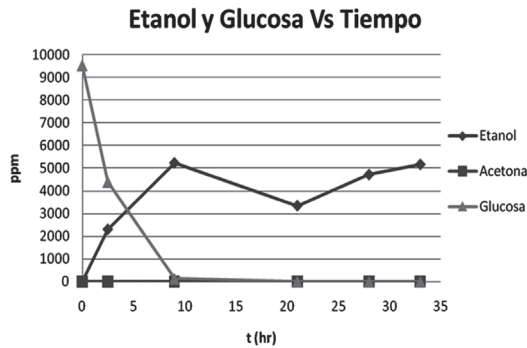
**Figura 5. Comportamiento del etanol producido y la glucosa frente a tiempo**



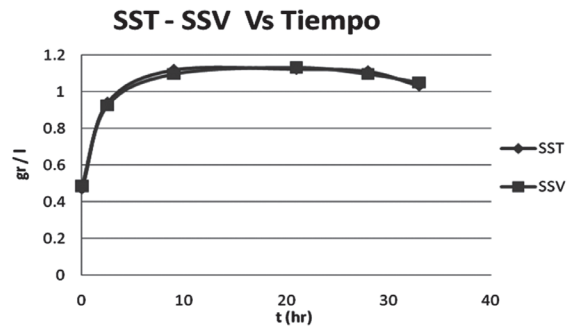
**Figura 6. Comportamiento de los SST y SSV frente a tiempo**

### **Fase 3. Fermentación de glucosa con control de pH**

Los resultados obtenidos de SST, SSV, glucosa y etanol, medidos previamente en el laboratorio, se presentan en las figuras 7 y 8.



**Figura 7. Comportamiento del etanol producido y la glucosa frente a tiempo**

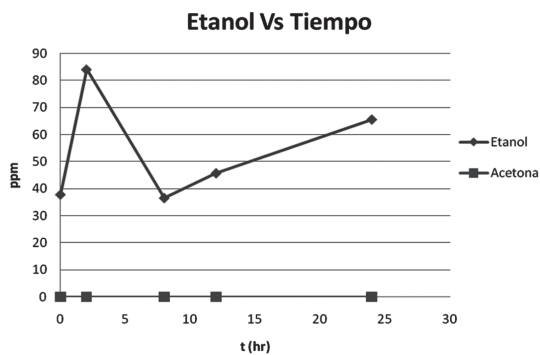


**Figura 8. Comportamiento de los SST y SSV frente a tiempo**

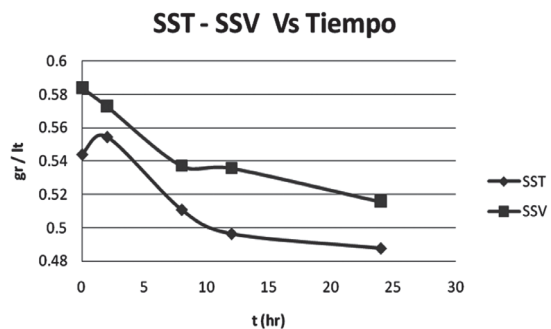
La prueba con control de pH garantizó el valor de este parámetro en 5.0. Esto favoreció el crecimiento de los organismos productores de etanol y, por lo tanto, aumentó la producción de este producto; el rendimiento de etanol alcanzado fue de 0.5 gr etanol / gr de glucosa, con producción de  $\text{CO}_2$  e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ).

#### Fase 4. Fermentación de la FORSU

Debido a que en esta fase se experimentó con la FORSU, previamente preparada, se analizó la medición de la DQO a partir de cada toma de muestra, de manera directa, y no fue necesario utilizar dilución con agua destilada; en la figura 9 se presentan los resultados arrojados de la presencia de DQO; de igual forma que en la fase anterior, se analizaron los resultados obtenidos de SST, SSV, glucosa y etanol, que se observan en la figura 10.



**Figura 9. Comportamiento de los SST y SSV frente a tiempo**



**Figura 10. Comportamiento de la producción de etanol vs tiempo**

El comportamiento observado para la producción de etanol a través del tiempo, en esta fase puede deberse a posibilidades:

- Posiblemente existió una reacción metabólica colateral desarrollada entre las 0 y 7 horas que permitió que se generara como metabolismo intermedio el etanol (o moléculas que podrían dar positivo a los análisis de etanol realizados), el cual fue degradado posteriormente y usado como material para producir etanol de forma continua y persistente a partir de la hora 7.

- Hubo un problema de medición en el experimento, por lo que lo recomendable es que se elimine el resultado No. 2 de la concentración de etanol.

Analizando la evolución de los gases se puede observar que aparecen picos altos y seguidamente valles en la generación de los gases detectados, lo que podría ser debido a la necesidad de etapas previas de transformación para la fermentación a etanol; estos resultados indican que sería necesario aplicar y realizar tratamientos previos, como por ejemplo, digestión, acidez u otros métodos que permitan modificar la composición del efluente y facilitar su posterior transformación a etanol.

## CONCLUSIONES

- El aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos –FORSU– genera un alto impacto ambiental positivo en países en vías de desarrollo, y por lo tanto, la contribución para generar productos de valor agregado a partir de estos residuos permitirá desarrollar opciones que aporten al desarrollo (no carbono) dependiente de estos países. Esto, sumado a que la FORSU es muy alta en Latinoamérica y tan solo una mínima parte de ellos es empleada y valorizada mediante actividades como alimentación animal y producción de compost (biofertilizantes), hace vital el desarrollar procesos que valoricen este material y permitan la creación de cadenas productivas diferentes.
- El bioetanol posee un mercado que en la actualidad está siendo derivado desde la caña de azúcar como materia principal, así como desde el almidón de maíz, ambos insumos que pueden afectar la sostenibilidad alimentaria de los territorios o afectar por vía demanda el precio de los alimentos; por ello, existe un alto interés en analizar formas alternas de obtener bioetanol como fuente energética y para consumo industrial.
- A través del proyecto de investigación desarrollado en la Especialización en Gestión de Residuos Sólidos de la Universidad EAN (Colombia) se pudo llevar a cabo un proceso en el cual fue posible simular a través de una muestra de origen sintético el equivalente de una FORSU, y a partir de ella, obtener por vía fermentativa bioetanol en concentraciones cercanas a las 65 ppm desde las 25 horas de proceso, obteniendo un rendimiento de 0.5 gr etanol/gr de glucosa para un tiempo de prueba total de 35 horas.
- Con el fin de estandarizar un protocolo y verificar tanto las cinéticas como el rendimiento de la reacción, se considera prudente realizar más pruebas y sus respectivos análisis, incluyendo posibilidades de evaluación de hidrólisis ácida u oxidaciones parciales que permitan preparar la disponibilidad de azúcares a partir de la FORSU inicial, debido a que está constituida por moléculas complejas que así lo requieren.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- América Economía. (2013). *Alquimia energética*. Entrevista a expertos en Latinoamérica. Chile.
- Betancourt; R. & Martínez, J. (2012). Analysis of use of leachate from a landfill in an intermediate city in Colombia. *Memorias del XXVII Congreso Centroamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. AIDIS El Salvador.
- Cinzia Buratti, F. (2011). *Anaerobic digestion of mechanically treated of MSW: Experimental data on biogas/methane production and residues characterization*. Italy: University of Perugia, Biomass Research Centre (CRB).

- Martin, D.; Potts, L. & Reeves, A. (1997). *Small-scale simulation of waste degradation in landfills*. *Biotechnology Letters*, 19, (7), 683-685
- Jeon, E.; Bae, S.; Lee, D.; Seo, D.; Chun, S.; Lee, N. & Kim, J. (2007). Methane Generation Potential and Biodegradability Of MSW Components. *Sardinia*.
- Havva Balata, C. (2008). Progress in Bioethanol processing. Turkey.
- Vázquez, H. & Dacosta, O. (2007). Alcoholic fermentation: An option for renewable energy production from agricultural residues. México: Departamento de Sistemas, Universidad Autónoma Metropolitana,
- Martínez, J. (2012). Propuesta para el desarrollo de un spin off en residuos sólidos en Bogotá – Colombia. *Revista Ciencia y tecnología del ejército*, 3(2) 64-75.
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2010). Fuente de desarrollo sostenible para Colombia. *Revista Biocombustibles*.
- Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo. (2010). *Recomendaciones de especificaciones técnicas para el etanol y sus mezclas (E6) y la infraestructura para su manejo en México*. México: MFCED.
- Montoya, N. (2012). Análisis de la viabilidad de obtención de bioetanol a partir de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU). Trabajo de especialista en gestión de residuos. España: La Mancha UCLM, España – Universidad EAN.
- UAESP. (2012). Diagnóstico Residuos Sólidos dispuestos en el Relleno Sanitario Doña Juana. Bogotá.