

DOI:10.18684/BSAA(14)78-86

# BIORREFINERÍA A PARTIR DE BANANO DE RECHAZO: UN SISTEMA INTEGRADO PARA LA CO-PRODUCCIÓN DE ETANOL, PROTEÍNA UNICELULAR, BIOGÁS Y COMPOST

## BIOREFINERY FROM BANANA REJECTED: INTEGRATED SYSTEM FOR ETHANOL, SINGLE CELL PROTEIN, BIOGAS AND COMPOST CO-PRODUCTION

## BIORREFINARIA DE BANANAS DE REJEIÇÃO: UMA ABORDAGEM INTEGRADA PARA A CO-PRODUÇÃO DE ETANOL, PROTEÍNA UNICELULAR, BIOGÁS E DO SISTEMA DE COMPOSTAGEM

CARLOS A. GUEVARA-BRAVO<sup>1</sup>, JOSÉ M. ACEVEDO-RUIZ<sup>2</sup>, CARLOS A. PELÁEZ-JARAMILLO<sup>3</sup>

### RESUMEN

*La producción de etanol, proteína unicelular, biogás y compost a partir de banana de rechazo de la zona de Urabá, fue realizada bajo el concepto de una biorrefinería. Inicialmente el banano verde fue sometido a hidrólisis endógena para degradar los polisacáridos, después los azúcares fermentables fueron extraídos para obtener jugos con un contenido de sólidos solubles entre 14 y 16 °Brix. La fracción insoluble fue utilizada para la producción de compost. Los jugos fueron fermentados para obtener un fermento con contenidos de alcohol entre 7 y 8%*

**Recibido para evaluación:** 3 de Febrero de 2015. . **Aprobado para publicación:** 10 de Agosto de 2015

- 1 Universidad del Quindío, Programa de Química. Dr. Ciencias Químicas. Armenia, Colombia
- 2 Universidad de Antioquia, Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares. Biólogo. Medellín, Colombia
- 3 Universidad de Antioquia, Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares. Dr. Química. Medellín, Colombia

**correspondencia:** caguevara@uniquindio.edu.co

v/v y adicionalmente proteína unicelular (levadura). La destilación del fermento produce una solución de etanol entre 40-50% como producto final y vinaza, que fue utilizada para la producción de biogás ( $3 \text{ m}^3$  de biogás/ $\text{m}^3$  de vinaza). Este combustible, puede ser usado como fuente de energía en la misma destilación del fermento. Finalmente con los resultados, se realizaron estimaciones de la cantidad de los productos en un proceso a mayor escala.

## ABSTRACT

*Ethanol, single cell protein, biogas and compost production from Uraba's bananas rejected, was developed under a biorefinery concept. Green bananas were initially subjected to endogenous hydrolysis to break the polysaccharides, after the fermentable sugars were extracted to get a juice with a soluble solids content between 14-16 °Brix. Insoluble fraction was used to produce compost. The juices were fermented in order to get a ferment with alcohol content between 7-8 % v/v and additionally single cell protein (yeast). Ferment distillation produces a solution with 40-50% of ethanol, as a final product and stillage, which was employed for the production of biogas ( $3\text{m}^3$  biogas/ $\text{m}^3$  stillage). This fuel can be used as energy source in the ferment distillation. Finally with results were realized estimates to determine the amount of products in a larger scale process.*

## RESUMO

*A produção de etanol, a proteína unicelular, biogás e composto a partir de banana de rejeição da região de Urabá, foi conduzido sob o conceito de biorrefinaria. Inicialmente, a banana verdes ofereceram hidrólise endógena para degradar os polissacarídeos, após os açúcares fermentáveis foram extraídos para obter sucos contendo sólidos solúveis de 14 a 16 °Brix. A fração insolúvel foi usada para a produção de composto. Os sucos foram fermentadas para se obter um fermento com teores de álcool entre 7 e 8% v/v e adicionalmente proteína unicelular (levadura). Destilação fermento produz uma solução de etanol entre 40-50% como produto final e vinhaça, o qual foi utilizado para a produção de biogás ( $3 \text{ m}^3$  de biogás/ $\text{m}^3$  de vinhaça). Este combustível pode ser usado como uma fonte de energia na mesma destilação fermento. Finalmente, os resultados, as estimativas da quantidade do produto foi realizada num processo em maior escala.*

## INTRODUCCION

Continuamente, una gran cantidad de banano de rechazo, es producido en la zona de Urabá. Entre el 20 y 25% del banano producido, no cumple con las especificaciones o normas de calidad y es considerado no apto para su comercialización internacional. Por lo tanto la cantidad de éste tipo de biomasa puede llegar a 250.000 toneladas anuales [1], de las cuales 140.000 se dedican para el consumo humano en la región y las restantes 110.000 son utilizadas para producir compost o como alimento crudo para el ganado [2]; sin embargo estas actividades no son suficientemente eficientes

## PALABRAS CLAVE:

Biodegradación, Recuperación energética, Banano verde, Etanol, Biogás.

## KEYWORDS:

Biodegradation, Energy recovery, Green banana, Ethanol, Biogas.

## PALAVRAS CHAVE:

Biodegradação, Recuperação de energia, Banana verde, Etanol, Biogás.

e impiden el máximo aprovechamiento de éste valioso material. Es decir, el uso de banano verde para la alimentación animal es contraproducente, porque los taninos de la cáscara evitan la absorción de las proteínas y disminuyen la asimilación de nutrientes [3]. La producción de compost es necesaria, para hacer retornar parte de los nutrientes extraídos al suelo [4], pero si éste se produce a partir de la fruta verde, gran parte de los carbohidratos que podrían servir para la producción de sustancias de mayor valor, serán degradados por los microorganismos presentes y convertidos en dióxido de carbono [5].

Para tratar de obtener el máximo aprovechamiento energético y material a partir del banano verde de rechazo, es posible proponer y desarrollar una biorrefinería. Este concepto es análogo al de las refinerías de petróleo, donde gracias a una infraestructura flexible, es posible convertir la biomasa en diversos productos como combustibles, energía y co-productos con valor agregado [6]. De ésta manera se puede maximizar el valor económico de la biomasa usada, mientras se reducen las cantidades de los residuos producidos. Este tipo de concepto industrial ha concentrado la atención en los últimos años y ha sido identificado como el camino más prometedor para la creación de una nueva industria basada en la biomasa [7].

De acuerdo con lo anterior, es posible desarrollar una biorrefinería de segunda generación, basada en la fermentación del banano de rechazo [6, 8]. En ésta biorrefinería se utilizan los frutos, como sustrato en una fermentación, para la producción de etanol y con los residuos resultantes se produce biogás [9], compost y gran variedad de subproductos. Si se desea, obtener un mayor aprovechamiento, entonces es posible desarrollar una biorrefinería de tercera generación, donde sea posible utilizar el CO<sub>2</sub> producido durante la fermentación y las vinazas como fuentes de carbono y minerales en la producción de micro o macro algas [10, 11, 12], u hongos [13, 14].

El etanol y la proteína unicelular (levadura) fueron producidos durante la fermentación de jugos ricos en azúcares fermentables, procedentes de la hidrólisis endógena del almidón y demás polisacáridos del banano. El compost fue obtenido a partir de los residuos sólidos resultantes, después de la extracción de los azúcares fermentables [15]. Por digestión anaerobia de las vinazas, provenientes de la destilación del fermento, se obtuvo biogás [9]. Los biocombustibles y co-productos fueron debidamente cuantificados y caracterizados en

ésta investigación. Finalmente con los resultados, se obtuvo una estimación de la cantidad de los productos que se obtendrían, si el proceso se realizara a una escala de 1000 Kg. En ésta investigación, se desarrolló una biorrefinería de segunda generación, a partir de 40 Kg de banano de rechazo. En éste proceso fueron obtenidos: etanol, levadura, biogás y compost.

## MÉTODO

### Descripción del proceso

El diagrama del proceso integrado, de la biorrefinería, para la obtención de etanol, proteína unicelular, biogás y compost, se muestra en la figura 1. Se utilizaron 40 Kg de banano como materia prima y los ensayos se hicieron por triplicado.

### Material vegetal

Los bananos verdes, provenientes de la zona de Urbá, sin golpes o magulladuras, fueron comprados en la Central Minorista de Medellín; asegurándose de que hubiere transcurrido el menor tiempo posible desde su recolección en la plantación, mediante el monitoreo de la llegada de camiones.

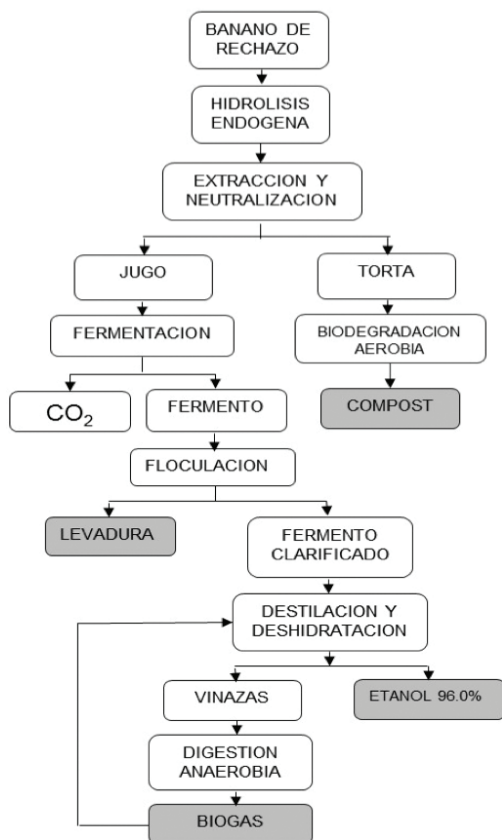
### Hidrólisis endógena

Se realizó en una cámara adecuada para realizar la hidrólisis, equipado con termo higrómetro, fuente de calentamiento y extractor de gases. Los bananos verdes desgajados, pesados y lavados con solución de hipoclorito 0,1%, fueron colocados en la cámara. Posteriormente se inyectó una mezcla comercial de etileno hasta alcanzar 50 ppm, en el recipiente, que se mantuvo sellado durante 24 horas, a una temperatura de 25°C, manteniendo la humedad relativa por encima del 85%; pasado éste tiempo se abrió el recipiente para permitir el intercambio de gases, se cerró nuevamente y se aumentó la temperatura a 33°C, condiciones que se mantuvieron por 48 horas más, permitiendo el intercambio de gases con la atmósfera cada 24 horas.

### Extracción de azúcares y obtención de los jugos

El banano hidrolizado, obtenido después de 72 horas de tratamiento fue molido en un molino de tornillo sin fin. El banano molido fue mezclado con lechada de cal caliente (100 mL de lechada de cal al 10% / Kg de banano, a 70°C), agitando ocasionalmente durante

Figura 1. Diagrama de proceso.



15 minutos. La centrifugación de la mezcla a 800 rpm durante 5 minutos permitió obtener el primer jugo. El sólido resultante de la centrifugación, todavía rico en azúcares, fue mezclado con agua caliente (200 mL/Kg de banano), agitando ocasionalmente durante 15 minutos y finalmente centrifugación a 800 rpm durante 5 minutos, para obtener un segundo jugo. El primer y segundo jugo fueron unidos y neutralizados con ácido cítrico hasta llevar el pH hasta 5,5; posteriormente pasteurización y nuevamente centrifugación para obtener un jugo clarificado que fue utilizado en la fermentación. El sólido resultante en la última centrifugación y agotado (torta) resultante fue empleado para la producción de compost.

### Fermentación

Los jugos clarificados y pasteurizados fueron inoculados con  $4,0 \pm 0,3$  g/L de levadura LEG-06 (Aislada en el laboratorio del GIEM a partir de fermentaciones espontáneas de jugos de banano). Esta levadura tiene capacidad flocculante y se separa del fermento una

vez terminada la fermentación. Las fermentaciones se realizaron en un reactor tubular de 50 L de capacidad, equipado con agitador rotatorio, chaqueta para calentamiento y enfriamiento, dotado con medidores en línea de pH, Oxígeno disuelto y temperatura. Las fermentaciones fueron realizadas durante 48 horas.

### Obtención del Etanol y levadura

Terminada la fermentación, se dejó en reposo el fermento durante 2 horas. Finalizado éste tiempo, la levadura flocculó y fue evacuada por el fondo del reactor. La levadura fue filtrada y secada en estufa de recirculación de aire a 70°C, para posteriormente cuantificar la biomasa producida y realizar los análisis físico-químicos. El fermento sin levadura fue destilado en una torre de destilación empacada de 1,5 m de altura y 15 cm de diámetro interno. Fue obtenida una flema con un porcentaje de alcohol entre el 40 y 50% v/v y una vinaza que fue utilizada para la producción de biogás. Posteriormente la flema fue rectificada hasta alcanzar un porcentaje de etanol del 90% v/v. La concentración final de etanol en el fermento fue determinada por cromatografía de gases.

### Obtención del Compost

La torta (residuo sólido), resultante de la extracción de azúcares fermentables, fue secada al ambiente hasta alcanzar 60% de humedad, luego se sometió a volteos manuales con pala, semanalmente, durante un mes.

### Obtención de Biogás

Las vinazas resultantes de la destilación del fermento fueron sometidas a degradación anaerobia, en un reactor híbrido UASB-Filtro anaerobio-UASB de 97 L, con tres etapas en serie y con un flujo continuo de 2 L/día (figura 2). Se determinó la cantidad de biogás producido por volumetría y la concentración de metano en el biogás fue determinada por prueba cualitativa de ignición que indica una concentración mayor al 65% v/v de metano. Los resultados fueron tomados cuando se obtuvo estabilización del pH y de la población de microorganismo dentro del reactor. El volumen es expresado en presión estándar (1 atm) y temperatura (0°C), condiciones STP.

### Métodos analíticos

La concentración de etanol en el fermento fue estimada por cromatografía de gases (Cromatografo Agilent

Figura 2. Reactor anaerobio.



6890 con detector FID) Columna Carbowax 20 M de 50 m de longitud y 1  $\mu\text{m}$  de diámetro interno, volumen de inyección 1  $\mu\text{L}$ , Split de 1:50. Temperatura del inyector 200°C y flujo de 20 mL/min de  $\text{H}_2$ . Bajo la Norma Técnica Colombiana (NTC) fueron cuantificados, el Nitrógeno por Kjeldahl (NTC 370), Fósforo, por Fotometría (NTC 234), Carbono orgánico por oxidación (NTC 5167), Densidad por gravimetría (NTC 5167), Humedad y cenizas por gravimetría (NTC 1807), Capacidad de retención de agua (CRA) por gravimetría (NTC 5167), Capacidad de Intercambio catiónico (CIC) por volumetría (NTC 5167) Conductividad y pH bajo norma SSLMM-42-2-92: Soil Survey Laboratory Methods Manual Reporte N°42, Versión 2.0, 1992. Potasio, Sodio, Calcio, Magnesio, Zinc y Aluminio por la técnica de Electroforésis capilar. Azufre por gravimetría bajo la norma AOAC 98002 (Association of Official Analytical Chemists). Sólidos totales por gravimetría bajo norma APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) y WPCF (Water Pollution Control Federation). Grados Brix por polarimetría. Extracto etéreo por gravimetría. Calorías por técnica calorimétrica. Respirimetría por método barométrico usando Oxitop.

## RESULTADOS

### Análisis físico-químicos

Como se observa en el cuadro 1, el contenido de humedad del banano verde es cercana al 80%. La materia seca corresponde en un alto porcentaje a carbohidratos (celulosa, hemicelulosa, almidón), expresados como % de Carbono orgánico (CO). El almidón es la mayor forma de almacenamiento de carbono en bananos verdes. Los sólidos solubles, que representan en gran proporción a los azúcares fermentables es bajo (1,5%) y por tanto es necesaria la hidrólisis. Las amilasas pueden transformar el almidón en azúcares durante la hidrólisis endógena por despolimerización de las cadenas de polisacáridos. El almidón es convertido en azúcares (sacarina, glucosa, fructosa y pequeñas cantidades de maltosa y ramnosa), en su mayoría fermentables [16]. Posterior a la hidrólisis, debe realizarse una extracción acuosa eficiente, para retirar la mayor cantidad de azúcares fermentables posibles, sin afectar la concentración de estos en el jugo; que de acuerdo a los procesos desarrollados con caña de azúcar, deben estar entre 13 y 15°Brix. El jugo obtenido en esta investigación tuvo en promedio 15,3°Brix. Además el jugo presentó un contenido de cenizas mayor al banano verde, debido a la adición de Calcio, proveniente del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  usado para la extracción y el potasio extraído del banano hidrolizado. El Nitrógeno presente en el jugo es bajo, comparado con el encontrado en el banano verde, posiblemente debido a que estaba representado en proteínas de alto peso molecular que fueron precipitadas durante la extracción. El jugo de banano fue fermentado usando aproximadamente 4 g/L de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, durante 48 horas a 25°C. Al final del proceso se obtuvo un rendimiento del 84% en la producción de alcohol a partir de los sólidos solubles reportados (tomados como azúcares fermentables) y un porcentaje de floculación de la levadura del 85%. A partir de la fermentación fue posible obtener levadura (proteína unicelular) y etanol, con una concentración en el fermento de entre 7-8% v/v. Posteriormente el fermento fue destilado hasta alcanzar una flemma con contenido de etanol entre el 40 y 50% v/v.

Terminada la fermentación, La concentración de levadura fue de 10 g/L, es decir 2,5 veces más que la concentración inicial y por lo tanto una ganancia neta en peso de 240 g. El contenido de Nitrógeno en la le-

**Cuadro 1.** Análisis fisicoquímicos de materia prima, productos y co-productos.

Parámetro	Banano verde	Jugo Neutralizado	Levadura seca	Compost	Vinaza
Nitrógeno %	0,90 ± 0,02	0,40 ± 0,010	9,01±0,27	1,42 ± 0,14	0,02 ± 0,01
Fósforo %	N.D	N.D	--	N.D.	0,009 ± 0,001
Potasio %	1,15 ± 0,12	0,83 ± 0,41	--	7,71 ± 0,23	0,79 ± 0,03
Sodio %	--	N.D	--	0,07 ± 0,005	0,58 ± 0,03
Calcio %	0,02 ± 0,002	0,75 ± 0,02	--	14,34 ± 0,32	0,46 ± 0,098
Magnesio %	--	N.D	--	1,89 ± 0,025	0,110 ± 0,001
Zinc %	--	N.D	--	0,065 ± 0,005	N.D.
Aluminio %	--	N.D	--	N.D.	N.D.
CO %	38,8 ± 1,50	39,1 ± 0,37	44,3 ± 0,7	22,78 ± 1,23	11,8 ± 0,7
Azufre %	--	0,21 ± 0,15	--	--	--
Relación C/N	--	153,60	--	8,37	--
pH	5,94 ± 0,01	5,64 ± 0,01	--	8,46 ± 0,01	4,25 ± 0,02
Conductividad (mS/cm)	--	8,17 ± 0,02	--	15,10	--
Densidad (g/mL)	0,60 ± 0,05	1,05 ± 0,01	--	0,47± 0,01	--
Sólidos solubles %	1,5 ± 0,1	15,3 ± 0,3	--	--	1,3 ± 0.2
CRA %	197,0 ± 0,2	--	--	167,0±0,2	--
CIC (meq/100 g)	--	--	--	9,86	--
CIC/CO (meq/100 g CO)	--	--	--	403,27	--
Respirometría (mg O <sub>2</sub> /g)	--	--	--	1,164	--
Humedad %	79,9 ± 0,19	84,7 ± 0,20	8,35±0,04	58,73 ± 0,66	96.5± 0,66
Cenizas %	1,1 ± 0,05	1,58 ± 0,3	6,5 ± 0,29	15,58 ± 0,55	6,9 ± 0,05
Extracto etéreo	0,45 ± 0,05	--	3,25 ± 0,03	--	--
Calorías (Kcal/100 g)	--	--	479,6 ± 1,9	--	--

ND: No detectable; CO: Carbono orgánico; CRA: Capacidad de Retención de Agua; CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico; CIC/CO. CIC en términos de CO;C/N: Relación carbono/nitrógeno, g: gramos, meq: miliequivalentes, mS: milisimens. Nota: Los cálculos de las variables fisicoquímicas se hacen sobre base seca, excepto los sólidos solubles que se dan en base húmeda.

vadura fue del 9,0%. Este elemento está presente tanto en las proteínas, como en los ácidos nucleicos. Descontando el Nitrógeno presente en los ácidos nucleicos, se calculó el contenido proteico en la levadura, en un 48%. El extracto etéreo, que es representativo del contenido de lípidos en la levadura, fue de 3,25%. Este valor se considera bajo si se toma en cuenta que el contenido normal de lípidos se encuentra entre 4 y 7%, con una alta proporción de ácidos grasos insaturados como oleico y linoléico. Las cenizas corresponden a la concentración de minerales presentes (6,5%); por lo tanto ésta levadura seca puede considerarse una buena fuente de estos elementos (generalmente Potasio

y Fosfatos). La humedad encontrada fue de 8,35%. Se considera que bajo estas condiciones, se inhibe el crecimiento de organismos patógenos, permitiendo su almacenamiento para consumo posterior. Por su contenido nutricional, la levadura obtenida a partir del crecimiento aeróbico en jugo de banano, puede ser utilizada en la alimentación animal.

Las vinazas resultantes de la destilación del fermento contienen 2% de cenizas, principalmente compuestas de K, Ca y Na. Además las vinazas contienen sólidos solubles con un valor de 1,3°Brix, que posiblemente corresponden a algunos azúcares no fermentables o

productos de desecho del metabolismo de las levaduras. Tienen un bajo contenido de Nitrógeno en relación al jugo de banano, debido a la incorporación de éste elemento al metabolismo de las levaduras en su reproducción y crecimiento. La DQO (Demanda Química de Oxígeno) inicial de la vinaza fue de 20.000 mg/L y el tiempo estimado de residencia en el reactor, para su degradación, fue de 19 días. Después de la estabilización del pH y las poblaciones microbianas en el reactor, fueron obtenidos porcentajes de remoción del 85% de la materia orgánica proveniente de la vinaza. En óptimas condiciones la relación de producción de biogás con respecto a la vinaza fue de 3 a 1 en términos de m<sup>3</sup>. En éste punto cabe anotar que la cantidad de m<sup>3</sup> de biogás obtenido por m<sup>3</sup> a partir de vinaza está entre 5 y 15 [17].

El compost obtenido tiene las siguientes características: Material sólido, húmedo, color café, textura gruesa heterogénea, con olor dulce. Alto contenido de cenizas (por la adición de Ca(OH)<sub>2</sub> para la extracción de jugos). Respirometría (1,162 mgO<sub>2</sub>/g), que indican alta estabilidad y madurez del producto Usando como parámetros de calidad de un compost, la norma NTC 5167 se pueden realizar las siguientes apreciaciones: Los valores de la capacidad de intercambio catiónico CIC son altos y convenientes porque determinan la capacidad de retención de los fertilizantes de síntesis una vez aplicados en el campo. El carbono orgánico (CO) es lo suficientemente alto para considerarse como un buen abono orgánico, pero lo suficientemente bajo como para garantizar que ha sufrido un proceso hasta obtener un material orgánico recalcitrante con presencia de ácidos pre-húmicos. La relación CIC/CO es significativamente alto lo que indica una alta oxidación de la materia orgánica presente y una muy buena capacidad para la retención de fertilizantes. El valor para el CRA (capacidad de retención de agua) es alto, por lo tanto el compost puede retener significativamente el agua, favoreciendo la disminución de la densidad del suelo, actuando como una esponja.

La humedad del compost obtenido (aprox. 60%) es aún alta. Para ser utilizado como producto comercial es necesario disminuir la humedad hasta el 35%. En el cuadro 2, se muestra el análisis microbiológico del compost obtenido. Se detecta la presencia de diversos tipos de microorganismos entre ellos las enterobacterias, por lo que aún el compost no se considera maduro y no cumple con la Norma Técnica Colombiana.

**Cuadro 2.** Análisis microbiológico del compost.

Microorganismo	Unidad	Cantidad
Mesófilos	u.f.c./g	2,8 x 10 <sup>9</sup>
Termófilos	u.f.c./g	7,0 x 10 <sup>8</sup>
Mohos	u.f.c./g	2,0 x 10 <sup>2</sup>
Levaduras	u.f.c./g	0,0
Nematodos y protozoos	u.f.c./g	Ausentes
Enterobacterias	g <sup>-1</sup>	8,2 x 10 <sup>2</sup>
Salmonella	En 25 g	Ausente

u.f.c./g. Unidades formadoras de colonia por gramo

### Cantidad de productos

El desarrollo de la metodología antes descrita, permitió determinar la cantidad de productos, residuos y co-productos, que se presentan en el cuadro 3.

La hidrólisis del banano verde es endógena así que es producto de la actividad metabólica propia de la fruta. Esta actividad produce CO<sub>2</sub> y pérdida de agua que se ve reflejada en la pérdida de peso de la fruta. Después de la molienda de la fruta hidrolizada y la extracción acuosa, se obtuvo un volumen de jugo de banano de 38,0 L, por lo tanto, se logró una relación cercana al valor de 1 con respecto al banano entero.

La fermentación del jugo produjo un fermento con aproximadamente del 7% (v/v). Además un aumento neto de la cantidad de la levadura de 10 g/L, de la cual se recuperó en un 85%, a pesar de la alta tendencia a la floculación de la levadura y por tanto la cantidad de levadura obtenida corresponde a 0,28 kg. Posterior a la floculación de la levadura, se procedió a realizar la destilación y rectificación del fermento, obteniéndose un volumen de etanol de 2,8 L al 96% (v/v). El volumen del residuo de la destilación (las vinazas) fue de 31,2

**Cuadro 3.** Cantidad de productos y residuos de la biorefinería.

Sustancia	Cantidad
Banano verde (Kg)	40,0
Banano hidrolizado (Kg)	38,4
Jugo de banano (L)	38,0
Torta (kg)	11,4
Vinaza (L)	31,2
Etanol 90% (L)	2,7
Levadura (kg)	0,32
Compost (kg)	7,9
Biogás (L)	93,6

L, con lo que se tendría una relación de 11 L de vinaza por litro de alcohol.

La producción de metano a partir de las vinazas fue expresada por volumen de vinaza (L CH<sub>4</sub>/L de vinaza). Para calcular la bio-degradabilidad, la producción teórica de metano (350,0 L/Kg de DQO) fue considerado. En Brasil, la vinaza obtenida después de la destilación, presenta un DQO entre 15 a 33 g O<sub>2</sub>/L de vinaza y cuando la fermentación es realizada con jugo de caña de azúcar [18, 19]. En 31,2 L de vinaza hay 0,62 Kg de DQO, lo que teóricamente produciría 218,4 L de metano. En el presente estudio fueron producidos 93,6 L de Biogás que corresponderían a 65,5 L de metano (70% de metano en biogás). Por tanto, el rendimiento es del 30%.

A partir de los datos en el cuadro 3 es posible inferir que llevando éste proceso a una escala de 1000 Kg de banano verde, aproximadamente se producirían 69,95 L de etanol al 96,5% (a partir de caña se obtienen 86 L de etanol anhidro), 8,0 Kg de levadura, 197,5 Kg de compost y 2340 L de biogás con un contenido de metano del 70%. Si se realiza una prospección de estos resultados, se tendría que a partir de 110.000 ton/año de banano de rechazo de la zona de Urabá, se podrían obtener, 7.694.500 L de etanol al 96,5%, 880 ton de levadura, 21.725 ton de compost y 257 millones de L de biogás.

## CONCLUSIONES

Fueron obtenidos etanol, biogás, levadura (proteína unicelular) y compost a partir del banano de rechazo de la zona de Urabá, donde todo el proceso fue enmarcado en el concepto de biorrefinería. El etanol y el biogás son productos energéticos obtenidos con eficiencias aceptables, comparándolas con las obtenidas en caña de azúcar. Además los co-productos como levadura cumplen con las características nutricionales necesarias para ser empleada como alimento. El compost no cumple con con la Norma Técnica, por su alta humedad y se recomienda someterlo a un proceso de secado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias por la financiación de éste estudio.

## REFERENCIAS

- [1] MEJIA, G.A. y GÓMEZ, J.S. Centro de Investigaciones del banano CENIBANANO. Los desechos generados por la industria bananera colombiana [online]. 2009. Disponible: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal/xxix.pdf> [Citado 11 de Noviembre 2014].
- [2] AFANADOR, A.M. El banano verde de rechazo en la producción de alcohol carburante. *Revista EIA*, 3, 2005, p. 51-68.
- [3] PÉREZ, E., RUIZ, M. y DANILO, P. Suplementación de bovinos con banano verde IV: Efecto sobre algunos parámetros de fermentación ruminal. *Agronomía costarricense*, 14, 1990, p. 67-72.
- [4] KALEMELAWA, F., NISHIHARA, E., ENDO, T., AHMAD, Z., YEASMIN, R., TENYWA, M. and YAMAMOTO, S. An evaluation of aerobic and anaerobic composting of banana peels treated with different inoculums for soil nutrient replenishment. *Biore-source Technology*, 126, 2012, p. 375-382.
- [5] CHANAKYA, H. and SREESHA, M. Anaerobic retting of banana and arecanut wastes in a plug flow digester for recovery of fiber, biogas and compost. *Energy for Sustainable Development*, 16(2), 2012, p. 231-235.
- [6] PARAJULI, R., DALGAARD, T., JORGENSEN, U., ADAMSEN, A., TRYDEMAN, M., BIRKVED, M., GYLLING, M. and KOFOD, J. Biorefining in the prevailing energy and materials crisis: a review of sustainable pathways for biorefinery value chains and sustainability assessment methodologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 2015, p. 244-263.
- [7] SANTCHURN, D., RAMDOYAL, K., BADALOO, M.G.H. and LABUSCHAGNE, M.T. From sugar industry to cane industry: evaluation and simultaneous selection of different types of high biomass canes. *Biomass and Bioenergy*, 61, 2014, p. 82-92.
- [8] OLESKOWICZ, P., KÁDÁR, Z., HEISKE, S., KLEIN, D., SIMMONS, B., BLANCH, H.W. and SCHMIDT, J.E. Co-production of ethanol, biogas, protein fodder and natural fertilizer in organic farming-Evaluation of a concept for a farm-scale biorefinery. *Biore-source Technology*, 104, 2012, p. 440-446.
- [9] GUEVARA, C., ARENAS, H., MEJIA, A. y PELAEZ, C. Obtención de Etanol y Biogás a partir de Banano de Rechazo. *Información Tecnológica*, 23(2), 2012, p. 19-30.



- [10] SOUSA, E., GORENSTIN, L. and COSTA, P. Some important catalytic challenges in the bioethanol integrated biorefinery. *Catalysis Today*, 234, 2014, p. 13-23.
- [11] COCA, M., BARROCAL, V., LUCAS, S., GARCIA, T. and GONZALEZ, G. Protein production in *Spirulina platensis* biomass using beet vinasse-supplemented culture media. *Food and Bioproducts Processing*, 94, 2015, p. 306-312..
- [12] GONG, J. and YOU, F. Sustainable design and synthesis of algal biorefinery for biofuel production. *Computer Aided Chemical Engineering*, 33, 2014, p. 1429-1434.
- [13] KAMAT, S., KHOT, M., ZINJARDE, S., RAVIKUMAR, A. and NAMDEO, W. Coupled production of single cell oil as biodiesel feedstock, xylitol and xylanase from sugarcane bagasse in a biorefinery concept using fungi from the tropical mangrove wetlands. *Bioresource Technology*, 135, 2013, p. 246-253.
- [14] DEUK-SIL, O., YOUNG-JUN, S. and JAE-WON, L. Study on the possibility of waste mushroom medium as a biomass resource for biorefinery. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19, 2013, p. 1535-1539.
- [15] WESTERHOL, M., HANSSON, M. and SCHNURER, A. Improved biogas production from whole stillage by co-digestion with cattle manure. *Bioresource technology*, 114, 2012, p. 314-319.
- [16] PERONI, F., CARDOSO, M., AGOPIAN, R., LOURO, R., NASCIMENTO, J., PURGATTO, E., TAVARES, M., LAJOLO, F. and CORDENOUNSI, B. The cold storage of green bananas affects the starch degradation during ripening at higher temperature. *Carbohydrate polymers*, 96(1), 2013, p. 137-147.
- [17] SMITH BAEZ CONSULTING, INC. Anaerobic Digestion of Vinasse for the Production Of Methane in the Sugar Cane Distillery [online]. 2006. Disponible:<http://www.smithbaez.com/Download%20page%20files/MethaneProductionfrom-Vinasse.pdf>. [Citado 12 de 1 de 2015.]
- [18] SYAICHURROZI, I., BUDIYONO, S. and SUMARDIONO, S. Predicting Kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: Biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. *Bioresource Technology*, 149, 2013, p. 390-397.
- [19] CAMARGO, G., MELEGARI, S., CAVALER, S. and LESSA, R. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 2015, p. 300-305.