

Análisis tecno-económico de una biorefinería a partir de residuos del plátano

Julio César Sánchez Rendón ¹, Laura Vanessa Daza Serna ¹, Valentina Hernández Piedrahita ¹, Eulogio Castro Galiano ², Carlos Ariel Cardona Alzate ¹

¹ Instituto de Biotecnología y Agroindustria Universidad Nacional de Colombia
sede Manizales, ccardonaal@unal.edu.co

² Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales, Campus Las
Lagunillas

Recibido: 19-09-15. Aceptado después de revisión: 23-11-2015

Resumen: El pseudotallo de plátano es un residuo lignocelulósico disponible en grandes cantidades en Colombia debido a la amplia demanda que se tiene del fruto de plátano. Este material es desaprovechado y dispuesto de manera incorrecta generando contaminación en suelos y fuentes acuíferas. El presente trabajo describe la simulación y evaluación tecno-económica bajo el concepto de biorefinería de la producción de etanol, furfural, ácido láctico y xilitol utilizando pseudotallo de plátano como materia prima considerando dos escenarios: el caso base (producción de los compuestos mencionados) anteriormente y un segundo escenario que emplea los sólidos remanentes del primer escenario a través de un sistema de cogeneración. El análisis de costos y márgenes de ganancia obtenidos muestran la viabilidad de la producción de furfural, xilitol y ácido láctico a partir de pseudotallo de plátano, lo cual permitiría alcanzar márgenes de ganancia positivos.

Palabras clave: biorrefinería, evaluación económica, pseudotallo de plátano.

Abstract. Banana pseudostem is a lignocellulosic material highly available in Colombia due to the large demand of plantain bunches. This material is incorrectly wasted and disposed causing both soil and water source contamination. The present work describes the simulation and techno-economic evaluation of furfural, ethanol, xylitol and acetic acid production under biorefinery concept, by using banana pseudostem as raw material in two process stages: base case in which only previous chemicals production is made, and another where besides raw material remainder solid fraction is used for energy cogeneration through gasification system. The cost obtained and gain margin analysis show furfural, xylitol and lactic acid production viability from banana pseudostem; and energy cogeneration positive influence inside banana pseudostem's biorefinery.

Keywords: banana pseudostem, biorefinery, economical evaluation.

1. Introducción

La matriz energética empleada en la actualidad se alimenta de combustibles fósiles y petroquímicos. Esta matriz enfrenta obstáculos tales como la escasez progresiva de reservas de petróleo y gas natural, contaminación ambiental, representando riesgos para la salud, adicionalmente la estabilidad de esta depende de relaciones económicas y geopolíticas, razones por las cuales se pone en entredicho la sustentabilidad en un corto y mediano plazo. Para remediar esta situación han sido enfocados esfuerzos en la investigación y desarrollo de energías renovables a partir de biomasa, especialmente aquella obtenida a partir de residuos agroindustriales llevando no solo a la producción de combustibles verdes como etanol, biodiésel, butanol, biohidrógeno, entre otros, sino también a sustancias químicas como furfural y lactato, las cuales son plataformas para la formación de otros compuestos de alto valor agregado [1]. En Colombia uno de estos

residuos se obtiene a partir de plantas comúnmente conocidas con el nombre de jengibres o bananas las cuales se encuentran en la familia *Musaceae* o de las musáceas y que se distribuyen ampliamente por regiones tropicales que comprenden desde África hasta el sudeste asiático y el norte de Australia pasando por Suramérica [2]. Económicamente estas plantas son aprovechadas para fines alimenticios por sus numerosos frutos y para obtención de textiles elaborados a partir de sus fibras, razón por la cual su cultivo es catalogado como el cuarto más importante a nivel mundial, considerado además como un producto básico y de exportación [3].

De acuerdo a la Asociación de bananeros de Colombia (AUGURA) se cultivan y cosechan cinco tipos de variedades de plátano: Dominico, Dominico Hartón, Hartón, Cachaco y Pelipita con predominancia en el tipo Dominico. Estas plantaciones se encuentran desde el nivel del mar hasta los 2,000 metros de altura en un rango de temperatura de 17 a 35°C y una duración de 6 a 15 años dependiendo de las condiciones ambientales y los cuidados del cultivo. Estas plantas tienen preferencia por los suelos ricos en potasio, arcillosos o calizos y una alta tolerancia a la acidez (pH entre 4.5 y 8.0). En Colombia la Región Andina y la zona de Urabá corresponden a las mayores productoras nacionales de plátano y plátano de exportación, respectivamente [4]. La producción de este fruto en Colombia en el año 2013 superó los 3 millones de toneladas con un área total cosechada de 379,453 hectáreas y un rendimiento de 8.1 toneladas/hectárea, lo que demuestra la importancia nacional de este cultivo [5].

Los residuos de plátano conformados por el pseudotallo, el vástago y la cascara de la fruta principalmente, son generados por el proceso de tala de las plantaciones al cumplir su vida útil, que al no ser dispuestos de manera correcta conllevan a contaminación tanto del suelo como de fuentes de agua aledañas a los cultivos. Adicionalmente al tratarse de materiales en su mayoría lignocelulósicos, pueden aprovecharse como materia prima de segunda generación para la biosíntesis de moléculas de valor agregado mediante la implementación de biorrefinerías adaptadas a estos residuos. El siguiente trabajo propone el uso del pseudotallo de plátano como materia prima en la producción de etanol, furfural, xilitol y ácido láctico y su evaluación económica mediante simulación con el uso de los paquetes ASPEN Plus v8.4 (Aspen Technology, Inc., USA) y Aspen Economic Evaluator v8.0 (Aspen Technology, Inc., USA), respectivamente.

2. Metodología

2.1 Caracterización del pseudotallo de plátano

La caracterización del pseudotallo de plátano fue obtenida de la literatura [6], la cual proporciona el contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas que será usado posteriormente en la simulación.

Tabla 1. Caracterización de pseudotallo de plátano.

Parámetro ^a (%)	Pseudotallo de plátano
Humedad	96.7
Celulosa	46.3
Hemicelulosa	12.5
Lignina	15.8
Cenizas	10.7

^a Contenidos de celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas en base seca.

2.2 *Diseño conceptual*

El esquema de biorefinería propuesto para el aprovechamiento del pseudotallo de plátano se plantea a través de la utilización de los monómeros presentes en este material lignocelulósico. Debido a que está compuesto mayoritariamente de hexosas y pentosas se realizó la producción de etanol y ácido láctico a partir de glucosa y la producción de furfural y xilitol a partir de la xilosa. Primero se realiza la ruptura de las cadenas de polisacáridos mediante pretratamiento con ácido diluido, el cual ha demostrado tener altos rendimientos, posteriormente las corrientes ricas en cada carbohidrato son distribuidas como sustrato para microorganismos capaces de producir los compuestos deseados, excepto en el caso del furfural el cual es obtenido a partir de reacción química. Finalmente los productos de cada planta son separados y purificados con tecnologías específicas para cada sustancia. Considerando el escenario con cogeneración de energía el residuo sólido generado en el proceso de hidrólisis ácida es llevado a un sistema de gasificación en donde se obtiene vapor de alta temperatura.

2.3 *Simulación del proceso*

El paquete comercial Aspen Plus v8.4 (Aspen Technology, Inc. USA) fue utilizado en la simulación de los procesos descritos debido a la variedad de equipos de proceso convencionales que posee junto con sus respectivos modelos termodinámicos y matemáticos, con el objetivo de generar los balances de materia y energía necesarios para calcular los requerimientos de materia prima, consumibles y servicios. Adicionalmente, se utilizó el paquete especializado Matlab® para otros modelos matemáticos específicos, especialmente cinéticas de reacciones químicas y bioquímicas. El modelo termodinámico NRTL (Non-Random Two-Liquid) fue utilizado para calcular los coeficientes de actividad de la fase líquida y la ecuación de estado de Hayden-O'Connell fue utilizada para la descripción de la fase de vapor. Los costos de capital y de operación fueron calculados utilizando el software Aspen Economic Analyzer v8.0 (Aspen Technologies, Inc., USA), bajo condiciones específicas para Colombia los cuales comprenden costos de materia prima, impuesto sobre la renta (33%), tasa de interés anual (17%) y salarios laborales, entre otros. Este análisis fue estimado en USD dólares para un periodo de 10 años. La depreciación de capital fue calculada utilizando el método de la línea recta.

2.3.1 *Extracción de azúcares*

La materia prima es inicialmente enviada a un proceso consistente en dos etapas de hidrólisis cuya función es extraer los azúcares fermentables. En la primera etapa la fracción hemicelulósica es hidrolizada con ácido sulfúrico al 4% en peso en relación 1:20 (Sólido a líquido) a 100°C [7]. El resultado de esta hidrólisis es una fracción sólida rica en celulosa y lignina y una fracción líquida rica en pentosas (principalmente xilosa). La corriente resultante es separada por filtración. La fracción sólida rica en celulosa y lignina es enviada a una hidrólisis enzimática a 37°C de acuerdo con las condiciones reportadas por [8] para obtener un licor rico en hexosas (principalmente glucosa) y un residuo sólido rico en lignina.

Como resultado de la descomposición de las pentosas durante la hidrólisis ácida se obtiene el subproducto furfural. Para evitar inhibición y daño a la biomasa por acción del ácido y el furfural durante las etapas subsecuentes de fermentación, se realiza un proceso de detoxificación basado en overliming [9, 10].

La corriente rica en xilosa es fraccionada, el 80% de la misma se destina a la producción de xilitol, mientras que el 20% restante es enviado a la producción de furfural. La corriente rica en glucosa sufre el mismo proceso, el 80% es utilizado en la producción de etanol y el 20% restante en la producción de ácido láctico.

2.3.2 Producción de xilitol

El xilitol es sintetizado a partir de xilosa por la levadura *Candida mogii*. Inicialmente, el licor es enviado a un proceso de esterilización a 121°C para neutralizar cualquier actividad biológica. Posterior a la esterilización del medio de cultivo, se realiza la fermentación con *C. mogii* de acuerdo con la cinética reportada por [11], a 30°C bajo condiciones aeróbicas (Concentración de oxígeno disuelto del 20%). Después de la fermentación, la corriente resultante es filtrada para separar la biomasa. La separación del metabolito se realiza por evaporación a una temperatura de 40°C y una presión de 0.05 bar para eliminar exceso de agua, se realiza cristalización a 50°C con adición de etanol que se adiciona para sobresaturar la solución de xilitol debido a la disminución de solubilidad provocada por el alcohol [12].

2.3.3 Producción de furfural

El furfural se obtiene a partir del licor rico en xilosa vía ciclo deshidratación utilizando aire como agente de arrastre para remover el producto mientras es obtenido [13]. Primero, el licor es enviado a un reactor a temperatura de 180°C y presión de 10 bar, donde el aire es alimentado en una relación 30:1 (aire a alimento). La corriente resultante es despresurizada para recuperar la fracción líquida. Después, la mezcla es enviada a un proceso de extracción líquido-líquido utilizando tolueno como solvente en una relación 1:1 en volumen para recuperar el furfural del agua. Finalmente, la corriente furfural-solvente es enviada a un proceso de destilación donde el furfural es obtenido como producto de fondos.

2.3.4 Producción de etanol

Inicialmente el licor rico en glucosa es esterilizado a 121°C para neutralizar la actividad biológica. El proceso de fermentación es modelado de acuerdo con la cinética reportada por [14] a 30°C utilizando *Zymomonas mobilis*. La biomasa es separada del caldo de fermentación por filtración. Después de la etapa de fermentación, el caldo de cultivo es llevado a la zona de separación, que consiste en dos columnas de destilación. En la primera columna, el etanol es concentrado hasta 50-55% en peso. En la segunda columna, el etanol es concentrado hasta el punto isotrópico (96% en peso), posteriormente es deshidratado con tamices moleculares para obtener el alcohol a una concentración del 99.7% en peso [15].

2.3.5 Producción de ácido láctico

El licor rico en glucosa destinado para la obtención de ácido láctico es primero esterilizado a 121°C para evitar contaminación microbiológica. La fermentación es modelada de acuerdo con la cinética reportada por [16] utilizando *Lactobacillus delbrueckii* a 37 °C. La corriente resultante es precalentada a 50°C y el microorganismo es separado por filtración. Después, se aplica hidróxido de calcio para obtener lactato de calcio a 50°C. El yeso formado por el exceso de hidróxido de calcio es removido por filtración. La solución de lactato es mezclada con etanol para disminuir su solubilidad en

medio acuoso, a su vez el ácido láctico es recuperado mediante adición de ácido sulfúrico. Posteriormente, la mayoría de las impurezas junto con el agua son removidas del ácido láctico en una columna de resina de intercambio iónico. Por último, la corriente pasa a través de una columna de adsorción empacada con carbón activado, obteniéndose ácido láctico con una pureza del 99.3%.

2.3.6 Cogeneración de energía

Para esta sección se utiliza la tecnología de ciclo combinado de gasificación integrado de biomasa (biomass integrated gasification combined cycle BIGCC) [17, 18]. Entre los elementos básicos del BIGCC se encuentran: secado de la biomasa, cámara de gasificación, turbina de gas y generador de vapor por recuperación de calor (heat steam recovery generator HRSG).

2.4 Descripción de escenarios

Para efectos de comparación dos escenarios fueron propuestos para la biorefinería de pseudotallo de plátano: En el primero considera la producción de furfural, xilitol, ácido láctico y etanol. En el segundo escenario, se presenta, además, la producción de energía a partir de los residuos sólidos provenientes de los procesos anteriores por medio de un sistema de gasificación.

3. Resultados y discusión

Los costos totales referentes a la biorefinería planteada en este trabajo son presentados en la Tabla 2, la distribución de costos de las plantas fue calculada considerando la composición de las materias primas y la capacidad de cada una de las plantas para transformar determinadas fracciones de estas.

Los costos presentados incluyen materias primas, utilidades, labores generales y operacionales (mantenimiento, cargas y labores operativas, gastos administrativos entre otros). Considerando la configuración de los dos escenarios evaluados (con y sin cogeneración) no se presentan diferencias en los costos asociados a las materias primas. Sin embargo, la implementación del sistema de cogeneración representa una redistribución de costos generando incrementos en los costos de producción de xilitol y furfural (producidos a partir de azúcares de 5 carbonos) y reducciones en los costos de producción de etanol y ácido láctico (producidos a partir de azúcares de 6 carbonos).

El efecto del sistema de cogeneración es evidente al tener en cuenta que en el escenario que no presenta dicho sistema, los costos operativos son equitativos porcentualmente para las cuatro plantas de producción, es decir, el costo operativo total es distribuido dentro biorefinería en donde cada planta asume una fracción de los costos de operación que representa la planta de obtención de azúcares; en el caso del escenario en donde se implementa el sistema de cogeneración los costos operativos cambian abruptamente su comportamiento: la planta de furfural concentra la mayor parte de estos costos (63%) en tanto para las plantas de etanol y xilitol se disminuyen a valores de 3% y 6%, respectivamente, debido a la redistribución de los costos de los equipos necesarios para el proceso de cogeneración. Además de los costos operativos, el costo generado por utilidades también se modifica en ambos escenarios por efecto del ahorro en consumo de energía eléctrica brindado por el sistema de cogeneración; la planta de xilitol pasa de representar el 23% de estos costos en el escenario sin cogeneración, a representar el 38%

en el escenario con cogeneración mientras que para las plantas restantes se presenta el caso contrario.

Tabla 2. Costos asociados a la biorrefinería.

Costos asociados a la biorrefinería [USD/kg]	Líneas de producción							
	Xilitol		Etanol		Furfural		Ácido Láctico	
	Con cogeneración	Sin cogeneración	Con cogeneración	Sin cogeneración	Con cogeneración	Sin cogeneración	Con cogeneración	Sin cogeneración
Total, Materias Primas	0,88	0,88	0,36	0,36	0,52	0,52	0,61	0,61
Costos Utilidades	1,61	0,48	0,87	0,55	1,53	0,93	0,19	0,12
Costos Labores Operativas	0,05	0,04	0,01	0,04	0,10	0,04	0,00	0,04
Costos Mantenimiento	0,11	0,06	0,03	0,06	0,26	0,06	0,00	0,06
Cargas Operativas	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00 ^a	0,01
Gastos Generales	0,08	0,05	0,02	0,05	0,18	0,05	0,01	0,05
Costos Generales y Administrativos	0,33	0,21	0,07	0,21	0,73	0,21	0,03	0,21
Costos de Depreciación	0,86	0,57	0,19	0,57	1,93	0,57	0,08	0,57
Total	3,93	2,29	1,56	1,84	5,27	2,38	0,94	1,65

^a Con cogeneración, ^b Sin cogeneración

El pseudotallo de plátano presenta dificultades en su cadena logística lo cual podría aumentar los costos asociados a transporte y recolección; una mejora para una posterior implementación de esta materia prima conllevaría a creación de rutas de transporte y centros de acopio adecuados.

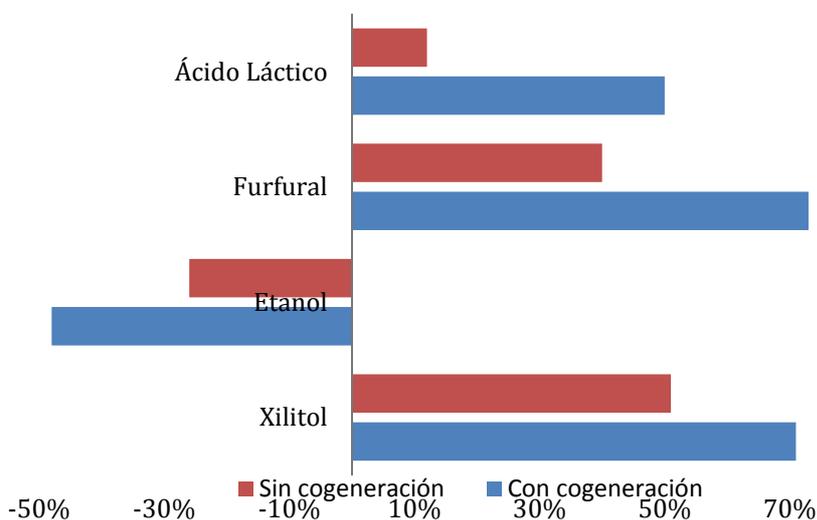


Figura 1. Distribución de margen de ganancia.

La Figura 1 muestra la distribución del margen de ganancia de las diferentes líneas de producción plantas de la biorrefinería hecha a partir de pseudotallo de plátano. Es destacable el caso del etanol puesto que ya sea con o sin cogeneración, el costo de producción excede al precio de venta competitivo lo cual no es extraño pues la producción

de etanol vía fermentativa es uno de los procesos más maduros que existen en la actualidad. Sin embargo, las tres plantas restantes presentan viabilidad económica con márgenes de ganancia cercanos al 70% cuando existe cogeneración en la biorrefinería.

4. Conclusiones

El pseudotallo de plátano es una materia prima atractiva para ser aprovechada bajo el esquema de biorefinería debido a su elevada disponibilidad. Los resultados obtenidos a través de este trabajo permiten identificar el potencial de este residuo para la producción de furfural, xilitol y ácido láctico. Por otro lado, la implementación de un sistema de cogeneración representó disminuciones en los costos de producción, sin embargo, es necesario seguir explorando alternativas de integración másica y energética que permitan incrementar los rendimientos de las plantas formuladas. Finalmente este trabajo sirve como base para futuras investigaciones en escalamiento de proceso a partir de materiales lignocelulósicos.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, a la convocatoria 617 de 2013 Jóvenes Investigadores de COLCIENCIAS y, a la Dirección de Investigación y Extensión, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, a los proyectos de Investigación Diseño de Biorrefinerías Sostenibles (código 157) y Procesos Químicos, Catalíticos y Biotecnológicos (código 16081) de la Dirección de Investigaciones de Manizales (DIMA), a la Escuela Internacional de Doctorados en Agroalimentación y a la Universidad de Jaén por financiar este trabajo.

Referencias

- [1] A. Demirbas, «Biorefineries: Current activities and future developments», *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 2782-2801, 2009.
- [2] M. G. Simpson, *Plant systematics*, Academic Press, 2010.
- [3] M. A. Carbajal Manrique y D. A. Rivera Galvis, Aprovechamiento de los residuos del pseudotallo del banano común (*Musa sp AAA*) y del bocadillo (*Musa sp AA*) para la extracción de fibras textiles., Universidad Tecnológica de Pereira, 2012.
- [4] C. F. Espinal, H. J. Martínez Covaleda y Y. Peña Marín, «La cadena de plátano en Colombia: una mirada global de su estructura y dinámica 1991 - 2005», Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006.
- [5] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, «Reporte producción anual de plátano en Colombia 2000 - 2013», 10 septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.agronet.gov.co>. [Último acceso: 10 septiembre 2015].
- [6] J. S. Jayaprabha, M. Brahmakumar y V. B. Manilal, «Banana pseudostem characterization and its fiber property evaluation on physical bioextraction», *Journal of Natural Fibers*, vol. 8, pp. 149-160, 2011.
- [7] Q. Jin, H. Zang, L. Yang, L. Qu y H. Huang, «Kinetic characterization for hemicellulose hydrolysis of corn stover in a dilute acid cycle spray flow-through reactor at moderate conditions», *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. 4158-4164, 2011.
- [8] R. Morales-Rodríguez, K. V. Gernaey, A. S. Meyer y G. Sin, «a mathematical model for simultaneous saccharification and co-fermentation (SSCF) of C6 and C5 sugars», *Chinese journal of chemical engineering*, vol. 35, pp. 185-191, 2011.

- [9] A. Martínez, M. E. Rodríguez, L. Wells, S. W. York, J. F. Preston y L. Ingram, «Detoxification of dilute acid hydrolysates of lignocellulose with lime», *Biotechnology progress*, vol. 17, pp. 287-293, 2001.
- [10] R. Purwadi, C. Niklasson y M. J. Taherzadeh, «Kinetic study of detoxification of dilute-acid hydrolysates by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ », *Journal of biotechnology*, vol. 114, pp. 187-198, 2004.
- [11] S. Sirisansaneeyakul, W. Vanichsriratana, P. Srinophakun, H. Bakker y Y. Chisti, «A model of xylitol production by the yeast *Candida mongii*», *Bioprocess and biosystems engineering*, vol. 28, nº 3, pp. 175-183, 2005.
- [12] J. C. Parajó, H. Domínguez y J. M. Domínguez, «Biotechnological production of xylitol. Part 2: Operation in culture media made with commercial sugars», *Biosource technology*, vol. 65, nº 3, pp. 203-212, 1998.
- [13] I. Agirrezabal-Tellería, I. Gandarias y P. L. Arias, «Production of furfural from pensotan-rich biomass: Analysis of process parameters during simultaneous furfural stripping», *Bioresource technology*, vol. 143, pp. 258-264, 2013.
- [14] N. Leksawasdi, E. L. Joachimsthal y P. L. Rogers, «Mathematical modeling of ethanol production from glucose/xylose mixtures by recombinant *Zymomonas mobilis*», *Biotechnology letters*, vol. 23, pp. 1087-1093, 2001.
- [15] J. W. Pitt, G. Haag y D. Leed, «Recovery of ethanol from fermentation broths using selective sorption-desorption», *Biotechnology and bioengineering*, vol. 25, pp. 123-131, 1983.
- [16] S. I. Mussatto, M. Fernandez, I. M. Manchilha y I. C. Roberto, «Effects of medium supplementation and pH control on lactic production from brewer's spent grain», *Biochemical Engineering Journal*, vol. 40, pp. 437-444, 2008.
- [17] L. E. Rincon, L. A. Becerra, J. Moncada y C. A. Cardona, «Techno-economic analysis of the use of fired cogeneration systems based on sugar cane bagasse in south eastern and mid-western regions of Mexico», *Waste and biomass valorization*, vol. 5, nº 2, pp. 189-198, 2014.
- [18] L. E. Rincon, J. Moncada y C. A. Cardona, «Analysis of cogeneration as a tool to improve the viability of oilseed based biorefineries», *Catalytic systems for integral transformations of oil plants through biorefinery concept*, Universidad Nacional de Colombia, 2013.