

Análisis tecno-económico y ambiental de la obtención de biofertilizantes bajo el concepto de biorefinería a partir de residuos cítricos

Valentina Hernández ¹, Christian Botero ¹, Valentina Aristizábal ¹, Eulogio Castro ², Carlos A. Cardona ¹

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

² Departamento de Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales, Campus Las Lagunillas, 23071, Jaén, España, ecastro@ujaen.es

Recibido: 30-09-15. Aceptado después de revisión: 12-11-2015

Resumen: Los altos costos de los fertilizantes inorgánicos en Colombia han generado un grave problema económico para la clase agraria, pues estos agroinsumos resultan ser indispensables para la obtención de altos rendimientos en la producción. Por este motivo, se requiere el planteamiento de alternativas que permitan reducir los costos asociados a la actividad agrícola en el país. En este trabajo se presenta un análisis económico y ambiental de la producción de biofertilizantes a partir de residuos cítricos por digestión anaerobia. Se presentan dos escenarios: en el primero se evalúa la obtención de limoneno y pectina a partir de cáscaras de naranja. En el segundo, adicionalmente a los productos mencionados para el escenario uno, se obtienen biofertilizantes a partir de los residuos sólidos obtenidos en las etapas de producción de limoneno y pectina. En el escenario uno se obtiene márgenes de rentabilidad del 93% y 57% para pectina y limoneno, respectivamente. Para el segundo escenario los márgenes de ganancia son de 94%, 48% y 61% para pectina, limoneno y biofertilizantes, respectivamente. Esto demuestra que el segundo escenario es más viable desde el punto de vista económico. También se demostró que el escenario dos genera un menor potencial de impacto ambiental logrando ser más amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: biofertilizantes, biorefinería, digestión anaerobia, residuos cítricos.

Abstract. High costs of inorganic fertilizers in Colombia have caused serious economic problems for the agrarian class, because these agricultural supplies are indispensable to obtain high production yields. Therefore, it is required to considerate alternatives in order reduce the costs associated with the agricultural activity in the country. This paper presents an economic and environmental analysis of the production of biofertilizers from citrus waste through anaerobic digestion. Two scenarios are studied: (1) the first one evaluates the production of limonene and pectin from orange peel, and (2) in the second one, in addition to the mentioned products in the first scenario, biofertilizers are obtained from the solid waste resulting from limonene and pectin production processes. In the first scenario, profit margins of 93% and 57% for pectin and limonene are obtained, respectively. For the second scenario, profit margins of 94%, 48% and 61% for pectin, limonene and bio-fertilizers were obtained, respectively. These results demonstrate that the second scenario is the best from the economic point of view. It is also shown that scenario two generates lower potential environmental impact, being the most environmentally friendly.

Keywords: anaerobic digestion, biofertilizers, biorefinery, citrus waste.

1. Introducción

De acuerdo con las proyecciones de las Naciones Unidas, para el año 2050 la población mundial podría alcanzar 9,15 billones de personas [1], lo cual representa un importante reto para la agricultura, debido a que será necesario suplir la demanda alimentaria tanto en calidad como en cantidad y, según la FAO, como mínimo el 50% de éste incremento deberá provenir de suelos ya cultivados [2]. Estas prácticas intensivas de cultivo resultan

en el empobrecimiento paulatino del suelo por la extracción de los nutrientes requeridos por las plantas en las cosechas [3], haciéndose indispensable reemplazar estos elementos esenciales por medio de la aplicación de fertilizantes. El consumo de estos agroquímicos está influenciado no solo por el incremento de la población, otros factores determinantes son el crecimiento económico, la producción agrícola, los precios y las políticas gubernamentales [4]. En 2010, la demanda mundial de fertilizantes fue de aproximadamente 170,7 millones de toneladas y alcanzó 175,7 millones de toneladas en 2011. De esta forma, con un crecimiento promedio anual del 2%, para finales del 2015 se espera que el consumo de fertilizantes a nivel mundial sea de 190,4 millones de toneladas, aproximadamente [5].

A pesar de los mencionados beneficios del uso de agroquímicos en las prácticas agrícolas, su excesivo y los métodos de aplicación de los fertilizantes pueden causar efectos secundarios no deseados. Uno de ellos es el alto costo ambiental, pues su uso regular puede deteriorar el suelo reduciendo su porosidad así como contaminar el agua subterránea y contribuir a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [6]. Otro efecto secundario es la volatilidad en los precios, tendiendo a altos debido a la dependencia del petróleo en el caso de los fertilizantes nitrogenados y la escasez de los depósitos y el alto costo de extracción en el caso de los fertilizantes potásicos y fosfatados [7]. Especialmente para Colombia, los precios mayoristas de agroquímicos como la urea, el fosfato diamónico (DAP) y el cloruro de potasio (KCl) varía entre el 25 al 35% por encima de los precios internacionales, mientras que los precios minoristas son 15% mayores que los precios mayoristas [8]. Estos factores sumados al uso ineficiente y no sostenible de los fertilizantes (Aproximadamente 70-75% de las aplicaciones de nitrógeno y fósforo, respectivamente, se pierden por fijación en el suelo [7] y el porcentaje de participación de estos agroquímicos en los costos de producción por hectárea (15-30%), han puesto en riesgo de convertir en inviable a la agricultura Colombiana.

De acuerdo con la FAOSTAT, para el 2011 fueron producidas aproximadamente 120 millones de toneladas de cítricos a nivel mundial, donde la naranja representó aproximadamente 63.1 millones de toneladas. Los cinco países con mayor producción de cítricos en el mundo para el 2013 fueron Brasil (aproximadamente 1/3 de la producción mundial), seguido por Estados Unidos, China, India y México. Para el 2009 207.727 toneladas de naranja fueron producidas en Colombia, provenientes de 31.751 hectáreas cultivadas, lo que implicó un rendimiento de 11 toneladas por hectárea [9].

Los principales productos obtenidos del procesamiento de la naranja son jugos, mermeladas, aceites esenciales, flavonoides y pectina. Durante los procesos de producción, solo aproximadamente el 50% de la fruta es transformada, obteniendo grandes cantidades de residuos [10]. Estos residuos están compuestos principalmente por cáscaras, semillas y membranas y, en la mayoría de los casos, son utilizados para esparcir sobre los suelos, producir alimento animal o ser quemados [11]. Sin embargo, estos métodos de disposición convencionales pueden ocasionar efectos negativos sobre el suelo y las aguas superficiales [12]. Además, varios productos de alto valor agregado como fitoquímicos, productos alimenticios, aceites esenciales, pectina y fibras dietarias, entre otros, pueden ser obtenidos a partir de estos residuos [13]. El mayor componente del aceite esencial proveniente de la cáscara de naranja es el limoneno (4-isopropenil-1-metilciclohexeno) [14] con una concentración entre 90 a 96%. Este componente es el terpeno más extendido en el mundo con una producción anual aproximada de 36 millones de kilogramos. El limoneno es ampliamente utilizado como solvente biodegradable [15].

Adicionalmente, los residuos provenientes de las industrias cítricas son fuentes ricas en pectina [16]. La pectina es uno de los productos más comunes del procesamiento de cítricos con una demanda anual de 30.000 toneladas, aproximadamente [16]. La pectina es un polímero utilizado como aditivo, espesante, texturizador, emulsificador, estabilizador y agente gelificante en las industrias alimenticias, cosméticas y farmacéuticas [16].

El objetivo de este artículo fue realizar la evaluación tecno-económica y ambiental de la valorización de residuos cítricos mediante la obtención de limoneno, pectina y biofertilizantes.

2. Metodología

Se evaluaron dos escenarios: i) La producción de limoneno y pectina y ii) La producción integrada de limoneno, pectina y biofertilizantes. Cada escenario fue evaluado desde el punto de vista tecno-económico y ambiental. La composición fisicoquímica de la cascara de naranja empelada en este trabajo se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición fisicoquímica de la cáscara de naranja [17].

Parámetro	Valor
Sólidos solubles (°Brix)	7,1 ± 1,2
Ph	3,93 ± 0,03
Acidez total	0,29 ± 0,03
Índice de formol	34 ± 2;4
Humedad %	85,9 ± 1,6
Grasas % (BS)	1,55 ± 0,17
Cenizas % (BS)	3,29 ± 0,19
Proteína % (BS)	6,16 ± 0,23
Carbohidratos % (BS)	89,0 ± 1,1
Fibra soluble % (BS)	
Azúcar neutrón	3,8 ± 0,3
Ácido urónico	7,1 ± 0,9
Lignina	3,2 ± 0,4
Pectina % (BS)	17 ± 5

Para la producción de limoneno y pectina se utilizaron los rendimientos experimentales reportados en [17]. La etapa de pretratamiento alcalino con hidróxido de amonio fue modelada utilizando el rendimiento reportado en [18]. La producción de biofertilizantes por digestión anaerobia fue modelada usando la cinética reportada por [19]. Los procesos simulados en este trabajo son descritos en detalle en las siguientes secciones.

2.1 Descripción del proceso

2.1.1 Producción de limonen

El contenido de limoneno en el aceite esencial proveniente de la cáscara de naranja es aproximadamente del 98% [17]. En esta etapa, la cáscara de naranja es sometida a un proceso de molienda para reducir su tamaño hasta 2 mm. Luego es enviada a una destilación a vapor a 90°C para extraer el aceite, evitando la degradación térmica del aceite esencial. A partir de este proceso, se obtiene una emulsión compuesta por agua y

aceite. La composición final del limoneno en el aceite esencial es de 95.6% en peso, de acuerdo con los resultados reportados por [17]. El proceso de extracción de limoneno se esquematiza en la Figura 1.

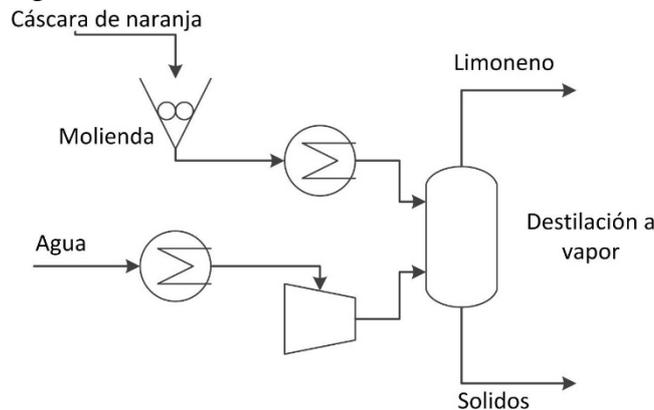


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de extracción de limoneno.

2.1.2 Producción de pectina

En la Figura 2 se presenta el proceso de producción de pectina. Los sólidos provenientes del proceso de extracción de limoneno son enviados al proceso de extracción de pectina. La hidrólisis es llevada a cabo con ácido cítrico durante 60 min a 80°C, de acuerdo con el proceso descrito en [17]. La pectina es decantada utilizando etanol al 95% en una relación 1:2 (corriente de salida a etanol), con el objetivo de separar la pectina. Por último, la pectina es separada del material lignocelulósico.

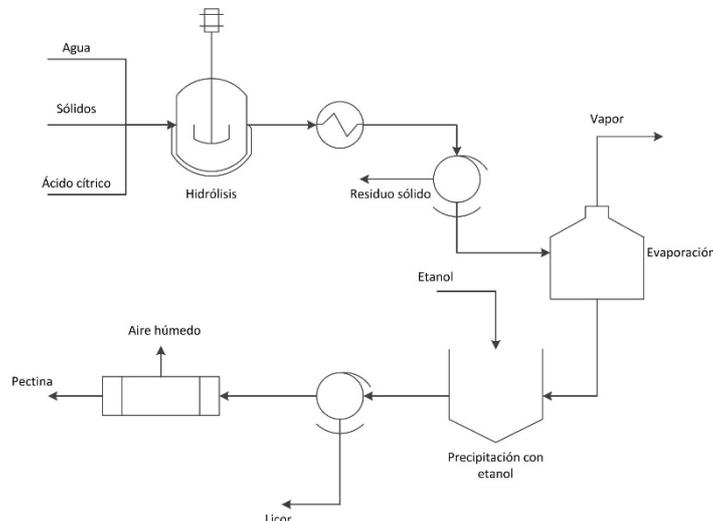


Figura 2. Esquema de la producción de pectina.

2.1.3 Producción de biofertilizantes

La producción de biofertilizantes es considerada en el segundo escenario con el objetivo de procesar los residuos sólidos provenientes de las etapas anteriores de extracción de aceite esencial y pectina en el primer escenario, este proceso es presentado a continuación en la Figura 3. El proceso comienza con un pretratamiento con hidróxido de amonio para remover parte de la lignina y mejorar la hidrólisis de la biomasa, preservando la mayor parte de la fracción fermentable [18]. De acuerdo con [18] el proceso de pretratamiento

es llevado a cabo a 51°C con hidróxido de amonio al 14.8% con una relación 1:10 sólido a líquido y un tiempo de residencia de 27h. Después, la corriente resultante es filtrada y sometida al proceso de digestión anaerobia, el cual es llevado a cabo de acuerdo con el modelo cinético descrito en [19], en un tanque agitado a 35°C durante 20 días.

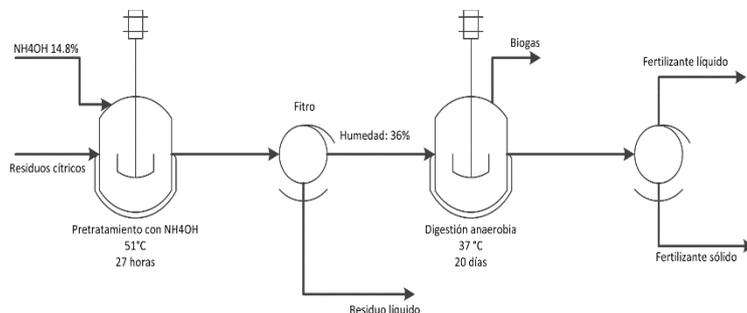


Figura 3. Esquema de la producción de biofertilizantes.

2.2 Proceso de simulación

Con el fin de obtener los balances de materia y energía para llevar a cabo los análisis técnico, económico y ambiental se debe definir la estructura, especificar y simular los diversos esquemas tecnológicos propuestos para transformar la cáscara de naranja en limoneno, pectina y biofertilizantes por medio del paquete comercial Aspen Plus v8.2 siendo este la principal herramienta utilizada. Los más complejos y detallados esquemas tecnológicos se obtienen a través de simulaciones rigurosas que implican el análisis de sensibilidad y de la búsqueda de las condiciones de operación óptimas. Además, el paquete especializado Matlab se utilizó para realizar cálculos matemáticos, incluyendo los necesarios para el análisis cinético. Las propiedades termodinámicas para las moléculas convencionales se obtuvieron a partir (Wooley and Putsche, 1996a) y la base de datos NIST. Mientras tanto, la biomasa se introdujo en la base de datos del simulador de acuerdo con las composiciones químicas mostradas en la Tabla 1. Los modelos termodinámicos utilizados para la simulación fueron UNIFAC Dortmund y Soave Redlich Kwong con Bosto Mathias (RKS-BM) método modificado (Batista et al., 1999, Mathias et al., 1984) para las fases de líquido y vapor, respectivamente. Por otro lado, para las simulaciones que implican etanol, el modelo NRTL se empleó usando propiedades físicas específicas obtenidas a partir de (Wooley y Putsche, 1996b, Wooley et al., 1999). Las Estimaciones de consumo de energía se realizaron con los balances de materia y energía generados por el simulador Aspen. De modo que por medio de este simulador, se calculó la energía térmica requerida por intercambiadores de calor y las necesidades de energía eléctrica de las bombas, compresores, molinos y otros equipos.

2.2.1 Evaluación económica

Los costos de capital y de operación se calcularon utilizando el software Aspen Economic Analyzer v8.2 (Aspen Technologies, Inc.). Parámetros específicos relativos a las condiciones de Colombia como el impuesto sobre la renta (17%), tasa de interés anual (25%) y los salarios laborales, entre otros, fueron incorporados a fin de calcular los costos de producción por unidad de masa para ambos escenarios de biorefinería. Este análisis se estimó en dólares estadounidenses por un período de 10 años el uso de un método de amortización de capital de línea recta.

2.2.2 Evaluación ambiental

El algoritmo de reducción de residuos WAR, desarrollado por el Laboratorio de Investigación Nacional de Gestión de Riesgos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) fue el método de cálculo de PEI (Potencial de Impacto Ambiental). El PEI para una cantidad de masa o energía determinado se define como el efecto que la energía y la masa en el medio ambiente si son descargados arbitrariamente. El impacto ambiental es una magnitud que no se puede medir directamente, sin embargo, puede calcularse a partir de indicadores medibles. Las Categorías de impacto ambiental usadas en el WAR GUI software incluyen: potencial de toxicidad humana (HEPI), potencial de toxicidad terrestre (TTP), potencial de toxicidad acuática (ATP), potencial de toxicidad humano por inhalación o exposición dérmica (HTPE), potencial de acidificación (AP), Potencial de oxidación fotoquímica (PCOP), potencial deterioro de la capa de ozono (ODP), potencial calentamiento global (GWP). Esta herramienta considera el impacto de los efluentes de masas y el impacto de los requerimientos energéticos de un proceso químico, con base en los balances de masa y energía generados en Aspen Plus.

3. Resultados y discusión

3.1 Evaluación técnica y económica

En la Tabla 2 se presenta la distribución de costos de producción para los dos escenarios simulados en este trabajo. El segundo escenario presenta un costo de producción superior, debido a la inclusión del proceso de producción de biofertilizantes. Siendo los costos operacionales, el costo de materia prima y el costo de utilidades las categorías económicas más afectadas por la obtención de biofertilizantes. No obstante el segundo escenario no se debe descartar, ya que los altos costos de los fertilizantes en Colombia hace ineludible la necesidad de un proceso que genere estos insumos a bajo precio, ocasionando que los campesinos colombianos puedan reducir los costos de producción y, asimismo disminuir el valor de los alimentos en la canasta familiar colombiana.

De la Tabla 2 se puede evidenciar que el producto con mayor margen de ganancia es la pectina, por lo cual define que el proceso se debe de enfocar en tener una producción eficiente y de buena calidad de este producto, obteniéndose como subproducto limoneno. También fue posible demostrar por medio de la simulación, que aunque los gastos en el escenario uno son altos, no resultan ser decisivos, pues los grandes márgenes de rentabilidad que se obtienen para los dos productos hace viable el proceso. El alto costo de venta de la pectina influencia directamente en las ganancias y por lo tanto la obtención de este producto puede ser una idea de negocio atractiva para inversores que quieran sacar provecho económico, teniendo como valor agregado una producción de limoneno con buen margen de rentabilidad.

Se puede afirmar observando la Tabla 2, que para el segundo escenario, los costos de la planta de producción de pectina bajan y que los de limoneno aumenta, efectuando un alza en el margen de ganancia de la pectina y una disminución en la del limoneno. Este movimiento de costos resulta ser importante, ya que la pectina es el producto principal, por lo cual este aumento del margen de rentabilidad representa una ventaja para el segundo escenario.

Tabla 2. Costos de producción y distribución de costos para los dos esquemas de biorefinería evaluados.

Parámetro económico	Escenario I		Escenario II	
	Costo anualizado (Millones USD/año)	Distribución n (%)	Costo anualizado (Millones USD/año)	Distribución n (%)
Depreciación de capital	0.41	29	0.55	32
Materia prima	0.66	46	0.75	43
Utilidades	0.06	5	0.08	5
Operación	0.29	20	0.36	20
Total	1.43	100	1.73	100
Producción Anual (kg)				
Limóneno	639.176		639.176	
Pectina	490.14		490.14	
Biofertilizantes	-		1391.91	
Costo por planta (USD/año)				
Limóneno	748.919,50		899.269,30	
Pectina	6.740.275,50		5.395.615,80	
Biofertilizantes	-		2.697.807,90	
Costo de producción unitario (USD/kg)				
Limóneno	1,17		1,41	
Pectina	1,38		1,10	
Biofertilizantes	-		0,19	
Precio de venta (USD/kg)				
Limóneno	2,69		2,69	
Pectina	20,00		20,00	
Biofertilizantes	-		0,50	
Margen de rentabilidad (%)				
Limóneno	57%		48%	
Pectina	93%		94%	
Biofertilizantes	-		61%	

Otra mejora que ofrece el segundo escenario, es el elevado margen de ganancia que tiene la producción de fertilizantes, atenuando de forma clara la disminución del margen de ganancias del limóneno y demostrando notoriamente que este proceso ofrece mejores ventajas económicas en comparación con el escenario uno.

Aunque el proceso de producción de biofertilizantes genera ganancias económicas, también es un proceso que provee avance técnico y social en nuestro país, pues de este modo se protegerá al campesino colombiano de los cambios que presenta el dólar en el momento y la volatilidad de precios del petróleo. Así mismo, se ingresaría una competencia a fertilizantes importados que son de alto costo por los excesivos aranceles que pagan, y el monopolio que ejercen algunas empresas sobre estos insumos en Colombia, obligando a las empresas a bajar sus precios o la disminución del consumo de estos agroinsumos por parte de la clase agraria del país

3.2 Evaluación ambiental

En la Figura 4 se identifica el impacto ambiental que genera los dos escenarios agrupándolos en diferentes categorías. Como se puede observar ninguno de los dos escenarios, crea potencial impacto sobre la capa de ozono (ODP), y que para el escenario uno el potencial de oxidación fotoquímica (PCOP) y potencial de toxicidad humano por inhalación o exposición dérmica (HTPE) son muy bajos, siendo estos mismos para el

escenario dos, nulos. Esto demuestra que ambos escenarios resultan ser seguros para el personal operativo y comunidad aledaña, sin tener mayores repercusiones sobre la salud por entrar en contacto con alguno de los residuos.

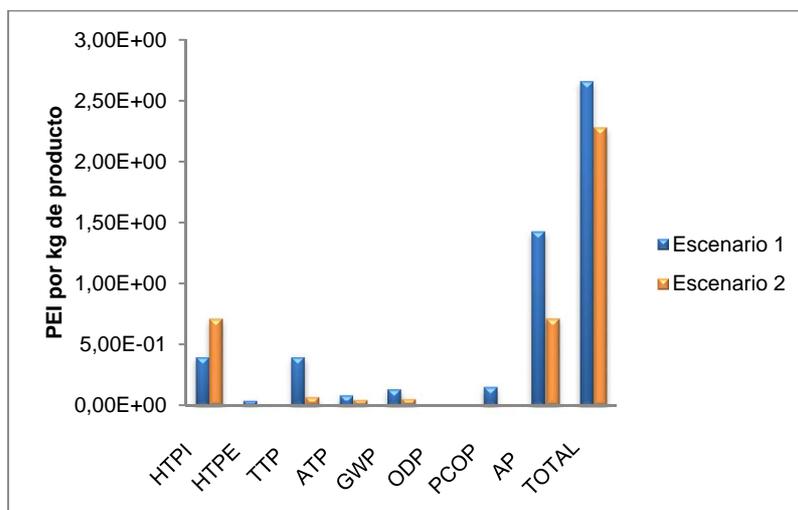


Figura 4. Potencial de Impacto Ambiental Escenario 1: Producción de pectina y limoneno Escenario 2: Producción de pectina, limoneno y biofertilizantes.

Por otro lado la categoría que ocasiona mayor impacto ambiental en el escenario dos, es el potencial de toxicidad humana por ingestión (HTPI), indicando esto, que se debe de tener precauciones a la hora del manejo y depósito de los residuos, alejándolos de comunidades susceptibles para no tener incidentes con personas que puedan ingerir los mismos.

La Figura 4 permite inferir que el mayor problema ambiental que causa ambos escenarios es el potencial de acidificación (AP) siendo mayor para el escenario uno. La acidificación del medio ambiente puede ser un problema de gran importancia ya que provoca tierra no apta para sembrar y otras consecuencias. Para evitar estos problemas se debe de tener un plan de tratamiento y de disposición de los residuos obtenidos en ambos escenarios. Por último se puede comprobar que el escenario dos genera menor total de potencial impacto ambiental que el escenario uno, lo que demuestra que este proceso es amigable con el medio ambiente y que puede ser llevado a cabo con las respectivas precauciones.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados, los residuos de la naranja se pueden considerar como una buena opción de materia prima para la obtención de productos de alto valor agregado, como lo son los biofertilizantes bajo el concepto de biorefinería. Los resultados económicos demostraron que para ambos escenarios y todos los productos, los márgenes de rentabilidad son positivos siendo mayores para el segundo escenario. Así mismo, de acuerdo con el análisis ambiental, el segundo escenario es más amigable con el ambiente que el escenario uno, demostrando que en los dos casos el segundo escenario es superior.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, 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 Biorefinerías Sostenibles (código 157) and 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] Food and Agriculture Organization of the United Nations 2012. World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 revision.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations & International Fertilizer Agency 2002. *Los Fertilizantes y su Uso*. Cuarta edición.
- [3] R. Rasool, S. S. Kukul y G. S. Hira, «Soil physical fertility and crop performance as affected by long term application of FYM and inorganic fertilizers in rice–wheat system», *Soil and Tillage Research*, vol. 96, pp. 64-72, 2007.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations 2008. Current World Fertilizer Trends and Outlook to 2011/12.
- [5] Food and Agriculture Organization of the United Nations 2011. Current World Fertilizer Trends and Outlook to 2015.
- [6] N. Chirinda, J. E. Olesen, J. R. Porter y P. Schjønnning, «Soil properties, crop production and greenhouse gas emissions from organic and inorganic fertilizer-based arable cropping systems», *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 139, pp. 584-594, 2010.
- [7] Consejo Nacional de Política Económica y Social 2009. Política Nacional para la Nacionalización del Componente de Costos de Producción Asociado a los Fertilizantes en el Sector Agropecuario. Documento Conpes 3577.
- [8] A. Suárez, «Campeón Mundial en Precio de Fertilizantes». *El Espectador*, 2010. [Online]. Available: <http://www.elespectador.com/noticias/nacional/colombia-campeon-mundial-precio-de-fertilizantes-articulo-440962> [Accessed 02 de Septiembre].
- [9] Dane, Encuesta Nacional Agrícola 2009.
- [10] A. G. Nassar, A. A. Abdel-Hamied y E. A. EL-Naggar, J.-S. «Effect of Citrus by-Products Flour Incorporation on Chemical, Rheological and Organoleptic Characteristics of Biscuits». *World Journal of Agricultural Sciences*, vol. 4, pp. 612-616, 2008.
- [11] C. A. Cardona y J.-S. Lee, Renewable Fuels. Developments in Bioethanol and Biodiesel Production, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. COLCIENCIAS.
- [12] S. S. Dhillon, R. K. Gill, S. S. Gill y M. Singh, «Studies on the utilization of citrus peel for pectinase production using fungus *Aspergillus niger*», *International Journal of Environmental Studies*, vol. 61, pp. 199-210, 2004.
- [13] S. A. Rezzoug, Z. Maache-Rezzoug, F. Sannier y A. Allaf, «Thermomechanical Preprocessing For Pectin Extraction From Orange Peel. Optimisation by Response Surface Methodology», *International Journal of Food Engineering*, vol. 4, 2008.
- [14] A. Z. M. Badee, S. A. Helmy y N. F. S. Morsy, «Utilization of orange peel in the production of α -terpineol by *Penicillium digitatum* (NRRL 1202) », *Food Chemistry*, vol. 126, pp. 849-854, 2011.
- [15] W. De Jong y G. Marcotullio, «Overview of Biorefineries based on Co-Production of Furfural, Existing Concepts and Novel Developments» *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 8, 2010.
- [16] M. A. Martín-Luengo, M. Yates, M. J. Martínez Domingo, B. Casal, M. Iglesias, M. Esteban y E. Ruiz-Hitzky, «Synthesis of p-cymene from limonene, a renewable feedstock», *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 81, pp. 218-224, 2008.
- [17] I. X. Cerón y C. A. Cardona, «Evaluación del proceso integral para la obtención de aceite esencial y pectina a partir de cáscara de naranja», *Ingeniería y ciencia*, 7, 65-86, 2011.
- [18] Li, Y., Merrettig-Bruns, U., Strauch, S., Kabasci, S. y Chen, H. 2014. «Optimization of ammonia pretreatment of wheat straw for biogas production», *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, n/a-n/a.
- [19] Borja, R., Martín, A., Sánchez, E., Rincón, B. y Raposo, F. 2005. «Kinetic modelling of the hydrolysis, acidogenic and methanogenic steps in the anaerobic digestion of two-phase olive pomace (TPOP) », *Process Biochemistry*, vol. 40, pp.1841-1847.