

## Bioenergía y biorrefinerías para caña de azúcar y palma de aceite\*

### Bioenergy and Biorefineries for Sugar Cane and Oil Palm

**AUTORES:** Electo Eduardo Silva Lora<sup>1</sup>, José Carlos Escobar Palacio<sup>1</sup>, Jesús Alberto García Núñez<sup>2</sup>, Juan Camilo Barrera Hernandez<sup>2</sup>.

**CITACIÓN:** Silva, E., Escobar, J., Garcia-Nunez, J. A., & Barrera, J. (2016). Bioenergía y biorrefinerías para caña de azúcar y palma de aceite. *Palmas*, 37(Especial Tomo II), pp. 119-136.

**PALABRAS CLAVE:** caña de azúcar, bioenergía, biorrefinería, biodiésel, metanol.

**KEYWORDS:** Sugar cane, bioenergy, biorefinery, biodiesel, methanol.

\*Artículo original recibido en español.

1 Universidad Federal de Itajubá, Brasil

2 Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma.



**ELECTO EDUARDO SILVA LORA**  
Investigador, Universidad  
Federal de Itajubá  
Researcher, Universidade  
Federal de Itajubá-UNIFEI  
silva.electo52@gmail.com

## Resumen

En este trabajo se exponen las potenciales ventajas de la posible interacción de las biorrefinerías basadas en dos cultivos con gran disponibilidad de biomasa: la caña de azúcar y la palma de aceite. Inicialmente se explica el concepto de biorrefinería y su clasificación. Dado que una biorrefinería debe caracterizarse por la conversión sostenible de biomasa, es necesario establecer una metodología que permita cuantificar su sostenibilidad. En este caso, se explica como el análisis de ciclo de vida (ACV) y los indicadores energéticos y ambientales se integran en la evaluación de la sostenibilidad de este tipo de instalación industrial. Se hace énfasis en las consideraciones que se deben tener en una evaluación energética y económica. Se referencia la productividad y el potencial energético de la caña de azúcar y la palma de aceite. Finalmente, se expone la posible interacción entre biorrefinerías basadas en la palma de aceite y la caña de azúcar, a través de la producción de biodiésel de palma y el metanol de caña de azúcar.

## Abstract

This paper examines the potential benefits of the possible interaction of biorefineries based on two crops with high availability of biomass: sugar cane and palm oil. Initially the concept of biorefineries and their classification is explained. As a biorefinery should be characterized by sustainable biomass conversion, it is necessary to establish a methodology to quantify sustainability. In this case, it is explained as the life-cycle assessment (LCA) and energy and environmental indicators are integrated into the evaluation of the sustainability of this type of industrial installation. Emphasis is put on the considerations to be taken into account for an energetic and economic evaluation. Productivity and energy potential of sugar cane and oil palm are referenced. Finally, the possible interaction between biorefineries based on oil palm and sugar cane is exposed, through the production of palm oil biodiesel and methanol from sugar cane.

□

## Introducción

Actualmente el crecimiento de la demanda mundial de energía, la reducción de las reservas de combustibles fósiles, el aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero junto al cambio climático, han intensificado las investigaciones y la implementación de proyectos relacionadas con el uso de fuentes de energía renovables en general, y en específico de la biomasa y los biocombustibles. Desde el punto de vista energético la biomasa se define como cualquier recurso renovable derivado de materia orgánica (origen animal o vegetal), producto de la fotosíntesis, que se puede utilizar en la producción de energía (Chiradeja & Ramakumar, 2004).

Como economías emergentes de impacto global, Brasil y Colombia tienen un espacio muy importante en la búsqueda de la autosuficiencia energética, la producción de alimentos, y la preservación del medio ambiente.

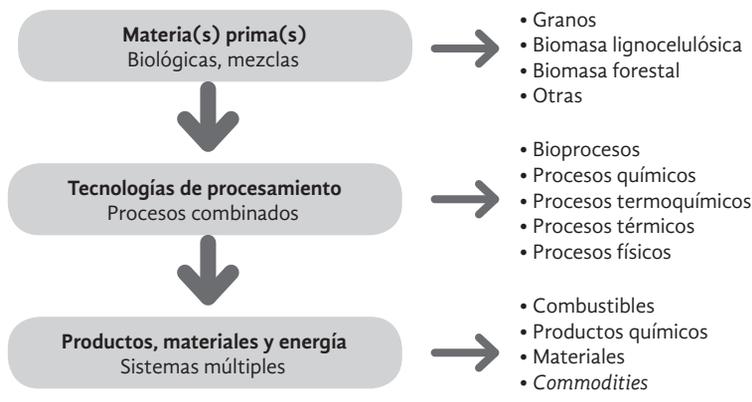
El uso eficiente y sostenible de la energía de la biomasa para la generación de electricidad, la producción de biocombustibles, productos químicos y alimentos en complejos industriales llamados biorrefinerías, está demostrando ser una estrategia económica y políticamente correcta. Brasil alcanzó el reconocimiento en todo el mundo en relación con las tecnologías y las políticas de incentivo para el uso de las fuentes alternativas de energía y la producción de biocombustibles de primera generación. La experien-

cia brasileña con el etanol es la iniciativa más grande y de mayor éxito de la producción y uso de biocombustibles en gran escala y de carácter sostenible.

Brasil y Colombia tienen la oportunidad de convertirse en líderes mundiales en la producción de biocombustibles y electricidad en un mundo que se mueve hacia el futuro de las energías limpias. Sin embargo, los países desarrollados llevan a cabo importantes inversiones en Investigación y Desarrollo (I+D) de nuevos complejos industriales multiproducto-biorrefinerías. Actualmente el uso de residuos de caña de azúcar se debate entre la producción de electricidad o de biocombustibles de segunda generación (etanol lignocelulósico, butanol, metanol, etc.), así como productos químicos, alimento humano y animal.

## Concepto de biorrefinerías, clasificación y estado del arte

El concepto de biorrefinería es análogo al de las refinerías de petróleo que producen múltiples combustibles y productos (Cherubini, 2010). Las biorrefinerías industriales han sido identificadas como la vía más prometedora para la creación de una nueva bioindustria (Kamm & Kamm, 2007). La Figura 1 muestra el esquema general de una biorrefinería.



**Figura 1.** Esquema general de una biorrefinería (Kamm & Kamm, 2004).

Las biorrefinerías son ahora uno de los conceptos más importantes de integración productiva y en relación con su diseño, modelación y evaluación, existe un gran número de publicaciones (Pereira *et al.*, 2014); (Renó *et al.*, 2014); (Rabelo *et al.*, 2011); (Dias *et al.*, 2007); (Chandel *et al.*, 2012); (Gheewala, 2011); (Maitty, 2015); (Parajuli *et al.*, 2015); (Keller *et al.*, 2015).

Una variedad de combustibles puede ser producida a partir de residuos de biomasa incluyendo combustibles líquidos, tales como, etanol, metanol, biodiésel, líquidos Fischer-Tropsch, y combustibles gaseosos tales como hidrógeno y metano. Las materias primas con mayor potencial para la producción de biocombustibles son las compuestas por materiales lignocelulósicos, incluidos los residuos agrícolas (por ejemplo, bagazo), cultivos herbáceos (por ejemplo, la hierba elefante), desechos de papel y otros desechos (municipales e industriales). Las biorrefinerías son parte de la agenda de I+D de los países más desarrollados y en desarrollo, como Brasil y Colombia. La movilización de los esfuerzos públicos y privados y las grandes cantidades de recursos centrados en el uso optimizado de las materias primas, agregan valor a las cadenas de suministro de biomasa y reducen los posibles impactos medioambientales de las mismas (Vaz Jr, 2011).

La Agencia Internacional de Energía (IEA) tiene un grupo de trabajo dedicado específicamente a los estudios tecnológicos y de mercado en el tema de biorrefinerías; la Tarea 42 – Biorrefinería (IEA, 2015). Proyectos en el tema se están ejecutando en la Unión Europea (BIOCORE, 2014). Un informe fue elaborado sobre los impactos económicos del biorrefinerías tropicales en la provincia de Queensland, en Australia (Deloitte, 2014). Esto indica la importancia del tema.

En el contexto brasileño el Centro de Tecnologías en Bioetanol, CTBE; el Núcleo de Excelencia en Generación Termoeléctrica y Distribuida, NEST, de la Universidad Federal de Itajubá; Universidad de Campinas, Unicamp; están llevando a cabo trabajos de investigación y desarrollo sobre posibles esquemas de biorrefinerías para el sector del azúcar y el alcohol.

A continuación se presentan algunas definiciones del concepto de biorrefinería:

- Según la fuerza tarea 42 de la IEA, una biorrefinería se caracteriza por la conversión sostenible de biomasa en una gama de productos comerciales y energía. Por lo tanto, una biorrefinería puede estar constituida por un proceso, una planta o un conjunto de instalaciones.
- Una biorrefinería se puede definir como una instalación industrial que integra tecnologías de conversión de biomasa y procesos para la producción simultánea de combustibles, energía y productos químicos a partir de biomasa (National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2008).
- De acuerdo con la Red Holandesa de Biorrefinerías Bio2Value el término biorrefinería se refiere al fraccionamiento de la biomasa en varios productos separados que posiblemente se someten adicionalmente a procesamientos químico-biológicos, químico-físicos y/o térmicos, y a la separación. Por medio de la coproducción de productos químicos de alto valor agregado (por ejemplo productos de química fina, productos farmacéuticos, polímeros), los costos de producción de vectores energéticos secundarios (por ejemplo,

combustibles para el transporte, calor, potencia) potencialmente podrían llegar a ser competitivos en el mercado, especialmente cuando la biorrefinería se integra en industrias químicas, de materiales y energéticas existentes (Bio2Value, 2015).

- El concepto de biorrefinerías se relaciona con conceptos más amplios que definen una modalidad de desarrollo basada en productos biológicos como la bioeconomía o economía verde.

Entre las potenciales ventajas de la implementación de las biorrefinerías tenemos:

- Eficiencia energética: debido a la estrecha integración entre la generación de energía y la síntesis química, el uso de energía en una biorrefinería con multiproductos tiene mayor eficiencia que los sistemas independientes que producen los mismos productos.
- Combustibles alternativos: los productos químicos producidos pueden ser utilizados para reemplazar combustibles líquidos tradicionales. Por ejemplo el metanol es un sustituto de la gasolina.
- Reducción de emisiones: el uso de biomasa y residuos considerando la captura de carbono típico de la etapa agrícola presenta reducciones considerables de las emisiones de gases de efecto invernadero.

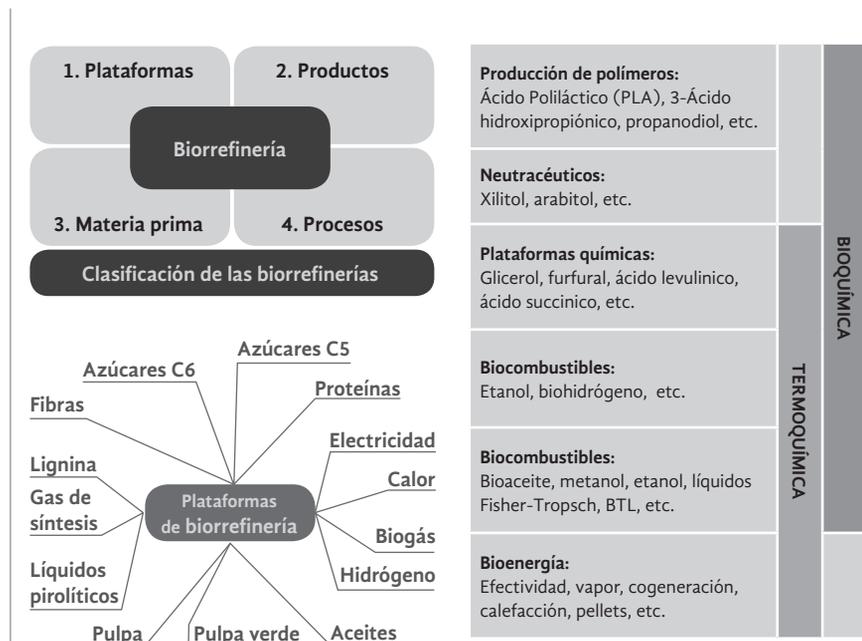
- Reducción de costos: un sistema multiproducto se caracteriza por una reducción de los costos de los productos finales, y depende menos de las fluctuaciones de precios en el mercado.
- Aumento de la sostenibilidad en el uso de biomasa y residuos. Todas las biorrefinerías deben ser evaluadas en toda su cadena de producción, desde el punto de vista ambiental, económico y social, cubriendo así todo el ciclo de vida (construcción, operación y desmonte).

La definición de biorrefinerías muestra que estas no necesariamente incluyen un único proceso o tecnología, y que diferentes rutas pueden desarrollarse en función de las materias primas utilizadas y los productos a obtener (dependiendo de la composición inicial de la biomasa utilizada).

La clasificación de las biorrefinerías en diferentes tipos es abordada por Cherubini *et al.*, (2009).

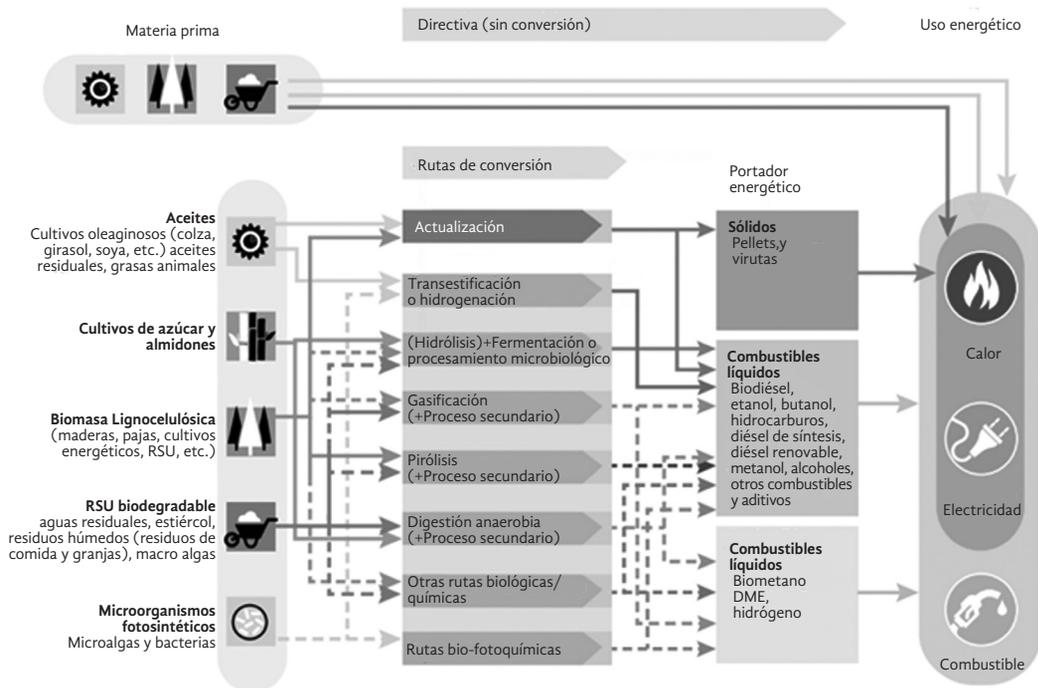
El principal criterio de la clasificación de biorrefinerías es la ruta que conduce al producto final. La clasificación consiste en cuatro características principales, las cuales son capaces de identificar, clasificar y describir los diferentes sistemas de biorrefinerías, tales son: plataformas, productos (energía, biomateriales y químicos), materias primas y procesos de conversión (Figura 2).

**Figura 2.** Criterios para la clasificación de las biorrefinerías. Adaptado de diferentes autores.

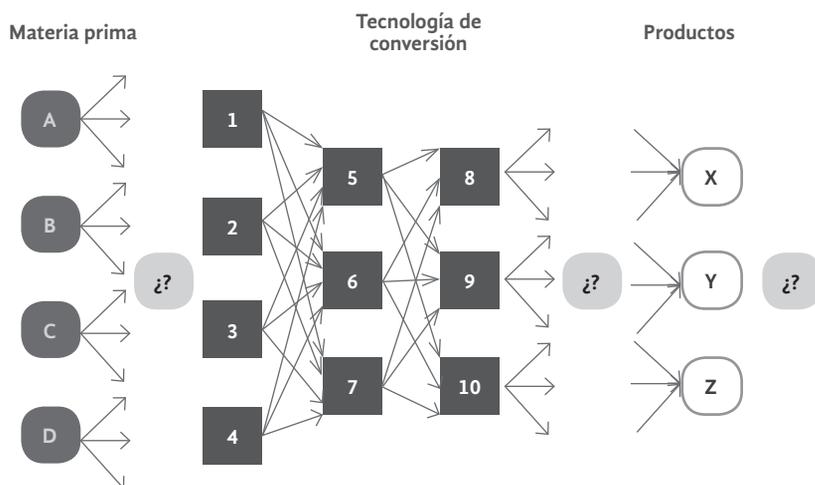


Las plataformas (azúcares C5/C6, gas de síntesis, biogás) son productos intermedios capaces de conectar diferentes sistemas de biorrefinerías y procesos. Las plataformas (bioquímica y/o termoquímica) también están relacionadas con los productos finales. Los dos grupos de productos de una biorrefinería son energía (bioetanol, biodiésel, combustibles sintéticos) y productos (químicos, materiales, alimentos y materia prima). Las principales materias primas son los “cultivos energéticos” y los residuos de la agricultura, silvicultura, comercio e industria (paja, cortezas, virutas de madera, aceites, bagazo de caña, etc.).

En el sistema de clasificación la diferenciación se ha realizado por cuatro procesos de conversión principales, los cuales incluyen los bioquímicos (fermentación, conversión enzimática), termoquímicos (gasificación, pirólisis), químicos (hidrólisis ácida, síntesis, esterificación), y procesos mecánicos (fraccionamiento, prensado, reducción de tamaños) como los mostrados en la Figura 3. El diseño de una biorrefinería pasa por la selección de una ruta optimizada entre una variedad de materias primas, procesos de conversión y productos (Figura 4). Diferentes métodos de optimización pueden ser aplicados.



**Figura 3.** Rutas de conversión de la biomasa en energía y combustibles (REN21, s.f.)



**Figura 4.** Factores a considerar durante la optimización del diseño de una biorrefinería: materias primas, tecnologías de conversión y productos (Murillo –Alvarado, 2013).

Algunos ejemplos de la clasificación de las biorrefinerías son los siguientes (Jong & Jungmeler, 2015):

- Biorrefinerías que utilizan aceites de cultivos oleaginosos para la producción de biodiésel, glicerina y alimentos.
- Biorrefinerías de azúcares C6 y cultivos amiláceos para la producción de bioetanol y alimento animal.
- Biorrefinerías de gas de síntesis para producción de diésel, gasolina, nafta, metanol etc.
- Biorrefinerías de ligninas usando maderas, azúcares C5 y C6, electricidad y calor, para producción de etanol, electricidad, calor y fenoles.

## Aplicación del Análisis del Ciclo de Vida - ACV en biorrefinerías. Indicadores energéticos y ambientales

Siendo la sostenibilidad una característica propia de una biorrefinería, es necesario disponer de una herramienta que permita evaluar los impactos que provoca el proceso de conversión de la biomasa en su entorno. En este punto, el ACV es una herramienta objetiva para el análisis o cuantificación de las consecuencias ambientales de los productos y servicios durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas a través de la producción industrial, incluyendo la etapa de su utilización, y su disposición final. De acuerdo con la ISO 14040, el ACV es un método para evaluar los aspectos ambientales y los impactos ambientales asociados con productos o servicios que permite:

- Identificar y priorizar las oportunidades de mejora de un sistema de producción.
- Caracterizar o comparar (*benchmarking*) sistemas de producción y sus unidades de producción en el tiempo.
- Realizar comparaciones relativas entre sistemas de productos basados en indicadores seleccionados por categorías.
- Indicar eventos ambientales para los cuales otras técnicas pueden complementar información para tomar decisiones.

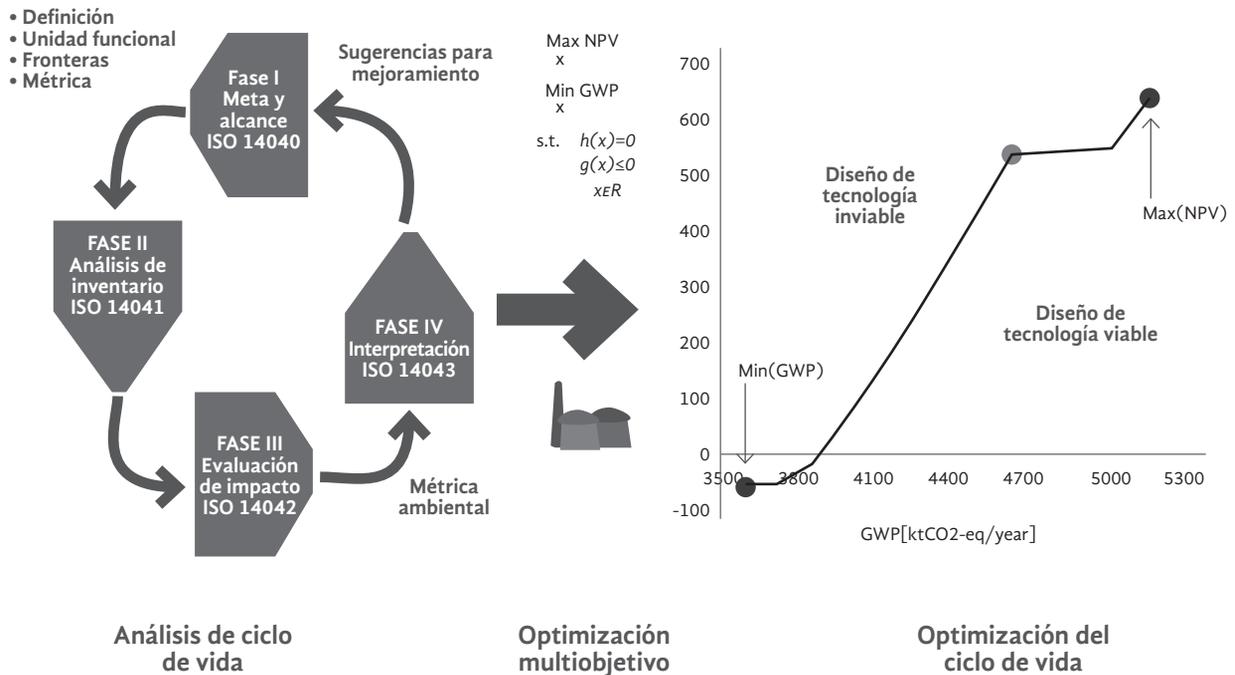
Durante el análisis de ciclo de vida, los datos del inventario (consumo de materias primas y emisiones) se agrupan por categorías de impactos ambientales. Metodologías de evaluación permiten derivar estos impactos en categorías finales: daños a la salud humana, al ecosistema y agotamiento de recursos naturales. Un menor valor de los indicadores de estas categorías finales indica una mayor sostenibilidad del proceso o producto en análisis.

Adicionalmente, para evaluar la sostenibilidad de una biorrefinería, se utiliza una serie de indicadores que permitan cuantificar el estado de desarrollo de la tecnología. Entre ellos tenemos:

- Indicadores económicos (costos de producción)
- Entrada y salida de energía o relación neta de energía (Net Energy Ratio – NER)
- Combustible fósil sustituido por hectárea
- Huella de carbono: emisiones de efecto invernadero evitadas (reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente)
- Impactos ambientales (indicadores por categorías de impactos)
- Emisiones de carbono debido a cambios en el uso de suelos
- Indicadores de renovabilidad (exergía)
- Indicadores sociales

La utilización del ACV en la evaluación de la sostenibilidad de biorrefinerías presenta una serie de dificultades, dado su carácter multiproducto, ampliamente discutidas en (Ahlgren *et al.*, 2013) y (Pawelzik *et al.*, 2013). El ACV puede utilizarse en conjunto con métodos de optimización. Una curva de Pareto es trazada considerando como indicadores las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (en kg/año) y el lucro líquido (USD/año) – (Andiappan *et al.*, 2015). La Figura 5 muestra un esquema de la metodología de optimización del ciclo de vida de una biorrefinería base microalgas aplicando la optimización multipropósito (máximo VPL o valor presente líquido y mínimo GWP o potencial de calentamiento global).

**Figura 5.** Acoplamiento del ACV y la optimización multiobjetivo en el diseño de biorrefinerías (Berhane *et al.*, 2013).



## Algunas consideraciones sobre la evaluación económica y de sostenibilidad

Para determinar qué tipo de biorrefinería es la ideal para procesar una biomasa disponible, debe realizarse la evaluación económica y de sostenibilidad de diferentes conceptos o alternativas.

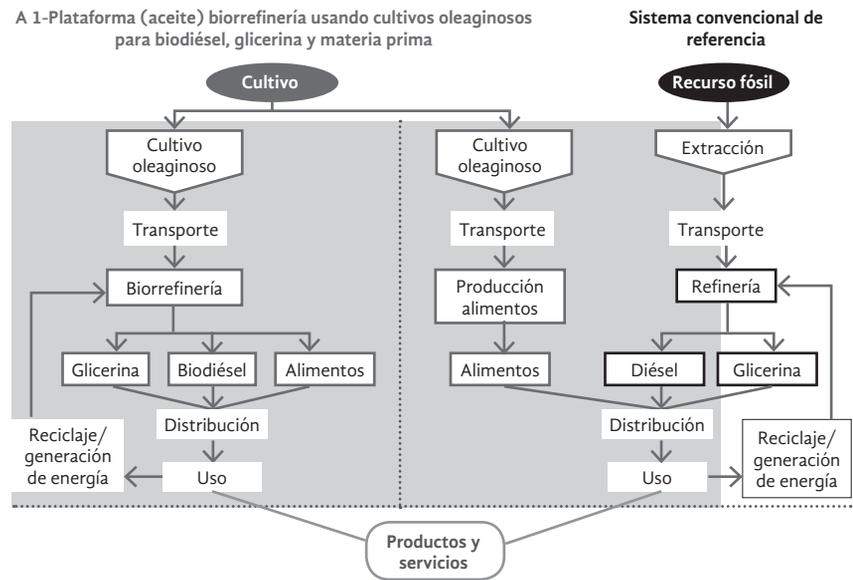
Es necesario comenzar por el balance de masa y energía del proceso, que debe ser lo más riguroso posible (Figura 6).

Jungmeier *et al.*, (2012) y Sacramento-Rivero (2012) discuten posibles metodologías para la evaluación de la sostenibilidad en biorrefinerías considerando que estas son sistemas multiproductos, y que estos poseen diferente naturaleza: energéticos, alimentos, productos químicos y biomateriales. En las publicaciones sobre esta cuestión es posible distinguir tres abordajes:

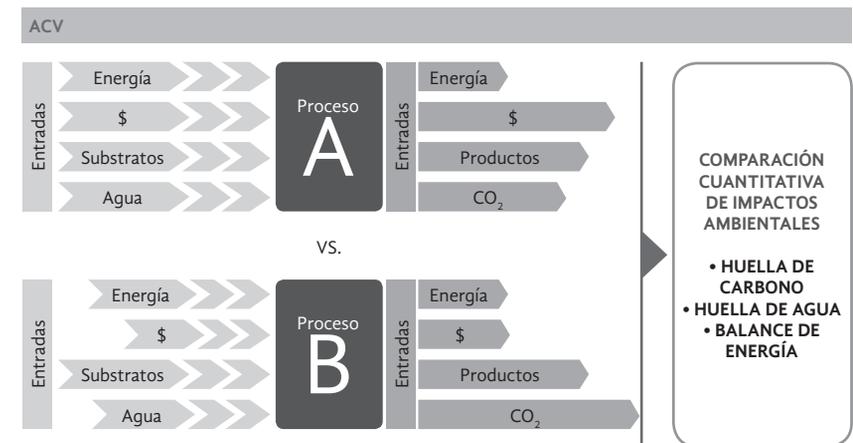
- Comparación de los indicadores de diferentes conceptos de biorrefinerías con una referencia convencional de producción de los mismos productos (Figura 7).
- Comparación de los indicadores de conceptos de biorrefinerías previamente definidos (Figura 8).
- Establecer valores ideales y críticos de indicadores en una escala normalizada de sostenibilidad. Finalmente se diagrama un gráfico de radar que indica el valor alcanzado por cada uno de los indicadores como se muestra en la Figura 9 de Navarro *et al.*, (2014) y Sacramento-Rivero (2012).

Azapagic (2014) presenta los resultados de un estudio comparativo de diferentes tipos de biorrefinerías para la producción de bioetanol (Figura 10). La mayoría de los conceptos analizados tiene emisiones de GEI (CO<sub>2</sub> equivalente) en el ciclo de vida mucho menores que el caso de referencia e inclusive negativas.

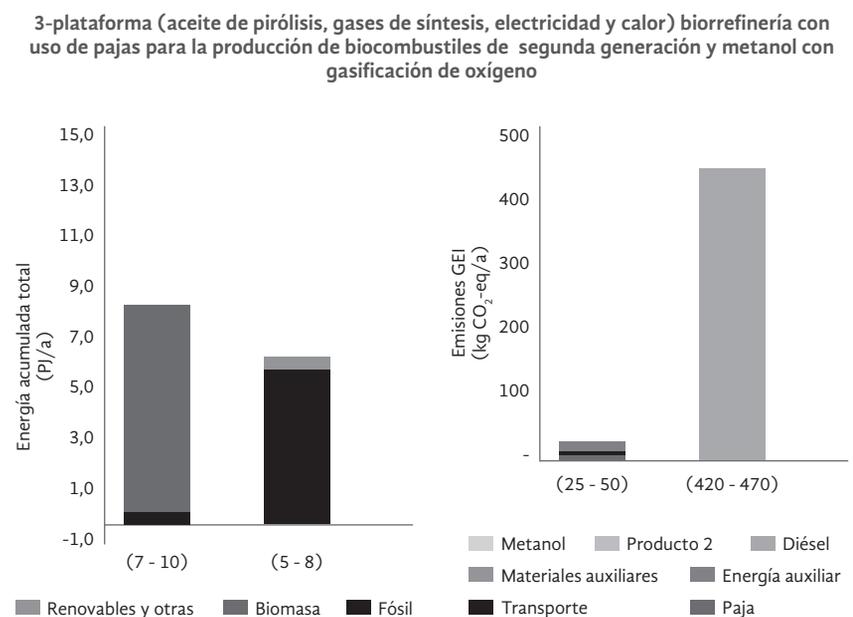
**Figura 6.** Definición del sistema de referencia durante la evaluación de sostenibilidad de biorrefinerías (Cherubini & Jungmeier, 2009)

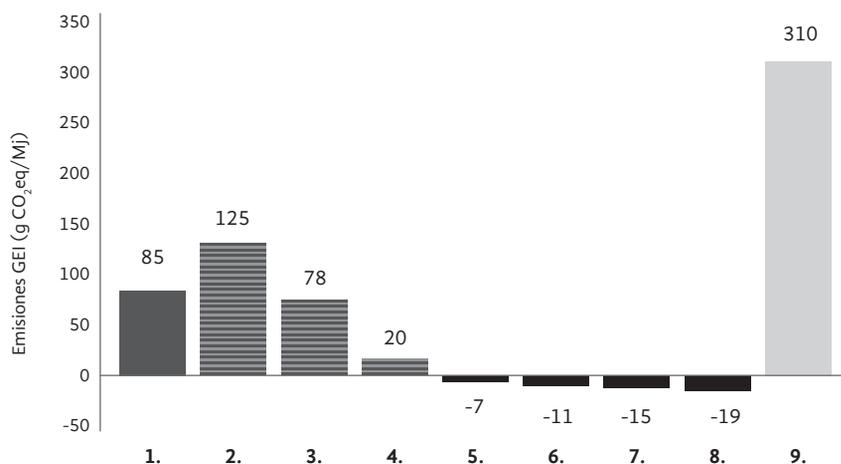


**Figura 7.** Factores a considerar durante la comparación de alternativas de biorrefinerías utilizando el ACV (Bauzá, 2015)



**Figura 8.** Comparación utilizando el balance de energía y de GEI entre un concepto de biorrefinería y el sistema de referencia (Jungmeier et al., 2012)

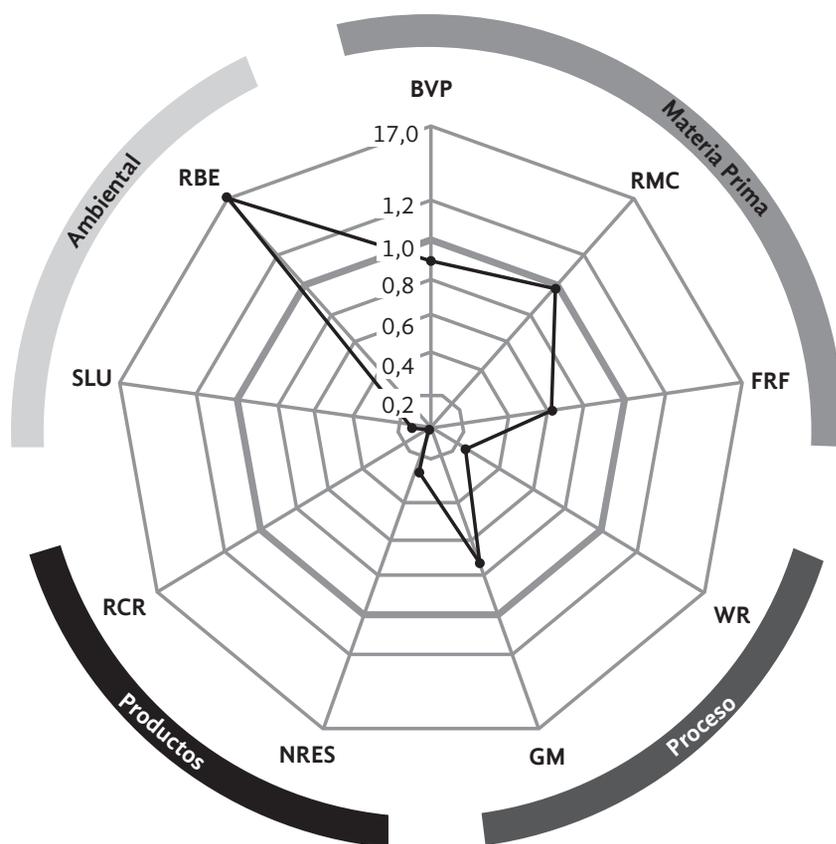




1. Petróleo (Refinería de combustible fósil)
2. Etanol de EEUU
3. Etanol de trigo RU
4. Etanol de caña de azúcar brasileña
5. Etanol de paja de trigo UK

6. Etanol a partir de miscanthus UK
7. Etanol a partir de residuos forestales UK
8. Etanol a partir de populus UK
9. Etanol a partir de miscanthus. Integración de biorrefinería de 2ª generación

**Figura 9.** Emisiones de GEI en el ciclo de vida de la producción de bioetanol en biorrefinerías de primera (bloques de rayas) y segunda generación (Negra) (1G y 2G) (Azapagic, 2014).



**Figura 10.** Diagrama de radar para la evaluación de la sostenibilidad de biorrefinerías. (Navarro *et al.*, 2014).

### Siglas

- BVP:** Potencial biotecnológico de valorización. **RMC:** Consumo de materias primas  
**WR:** Reducción de uso de agua. **RCR:** Tasa de costo de materias primas  
**FRF:** Fracción de ingresos por materia prima. **GM:** Margen bruto  
**NRES:** Compartimento de energía no renovable. **RBE:** Reducción emisiones de línea base  
**SLU:** Uso sostenible de terrenos

## Productividad energética de la caña de azúcar y la palma de aceite. Disponibilidad y caracterización de la biomasa residual

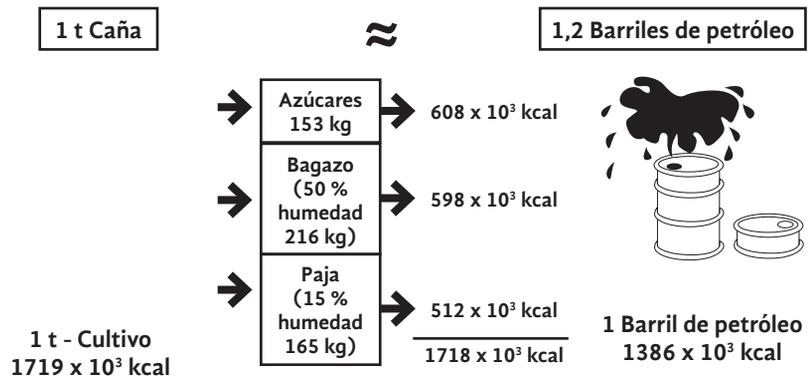
La caña de azúcar se compone principalmente de fibra y caldo en el que se disuelve la sacarosa. Después de la extracción de jugo de caña de azúcar en procesos de molienda y extracción, que recuperan la sacarosa, se obtiene como residuo fibroso el bagazo. El contenido de fibra en la caña de azúcar varía alrededor de 15 % y el valor calorífico inferior del bagazo húmedo es de aproximadamente 9536,4 kJ/kg. En base energética 1 tonelada de caña de azúcar equivale aproximadamente a 1,2 barriles de petróleo (Figura 11) (Olivério,

2003), siendo que 58 % de la energía contenida en la caña está en forma de bagazo y paja.

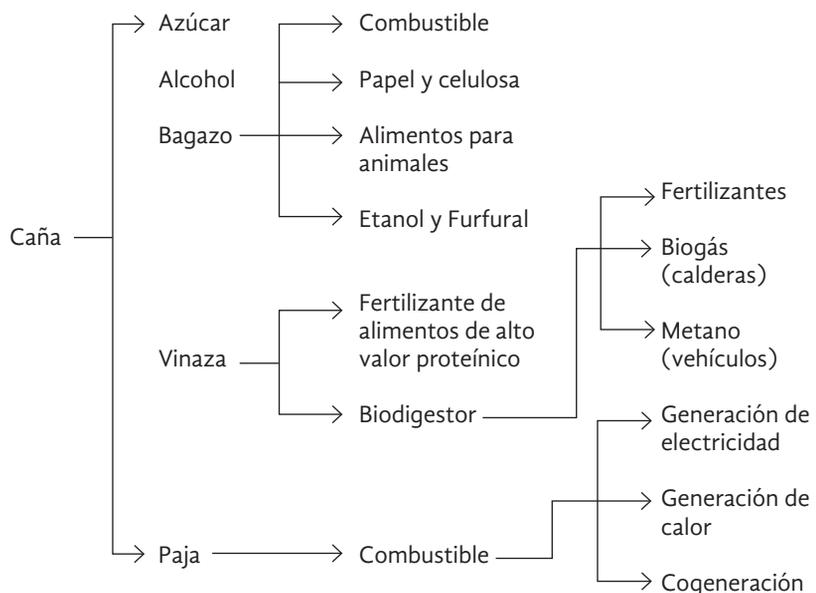
De acuerdo con (Botha, 2009) la energía proporcionada por los residuos de la caña de azúcar está en el rango de 218 a 324 GJ/ha en dependencia de la productividad de biomasa (total) por hectárea (80 y 120 t/ha respectivamente). Considerando apenas el bagazo de caña estos valores serían de 218 y 146 GJ/ha respectivamente.

La Figura 12 muestra los principales productos y subproductos que se pueden obtener a partir de caña de azúcar. La contaminación atmosférica resultante de la quema de la paja de caña de azúcar durante la cosecha, y su potencial energético, hacen que su uso sea una de las metas futuras de este sector.

**Figura 11.** Contenido energético de la caña de azúcar (Olivério, 2003).



**Figura 12.** Productos y subproductos de la caña de azúcar (Olivério, 2003).



En las plantas de beneficio de aceite de palma los residuos de biomasa se cuantifican en porcentaje en masa del peso de los racimos de frutos frescos – RFF. Los principales residuos a considerar son los racimos vacíos o tusa (20-23 % de los RFF), fibra (11-14 %), cuesco (5-7 %). Todos sumados tienen un potencial energético de 124,8 GJ/ha/año (Figura 13). De acuerdo con (Osorio, 2013) la energía contenida en los residuos de una extractora de aceite, incluyendo el biogás obtenido a partir de los efluentes líquidos, corresponde a 42 % de la energía de los RFF (299 GJ/ha/año). En 2010, García Núñez & Yáñez, hicieron un análisis de la utilización actual de estos residuos en el sector palmero colombiano.

Podemos concluir que tanto la industria de azúcar y alcohol como la de palma de aceite se caracterizan por una gran disponibilidad de residuos de biomasa. De ahí el potencial de estos dos sectores para la implementación de biorrefinerías.

## Posibles procesos y productos a incluir en esquemas actuales de biorrefinerías en el sector azucarero y el palmero: topologías

Se propone avanzar en la implementación de las biorrefinerías a través de la introducción de nuevas

tecnologías y procesos en la infraestructura existente en el parque industrial actual. Jungmeier, (2014) ofrece una visión general de las posibles alternativas en esta estrategia.

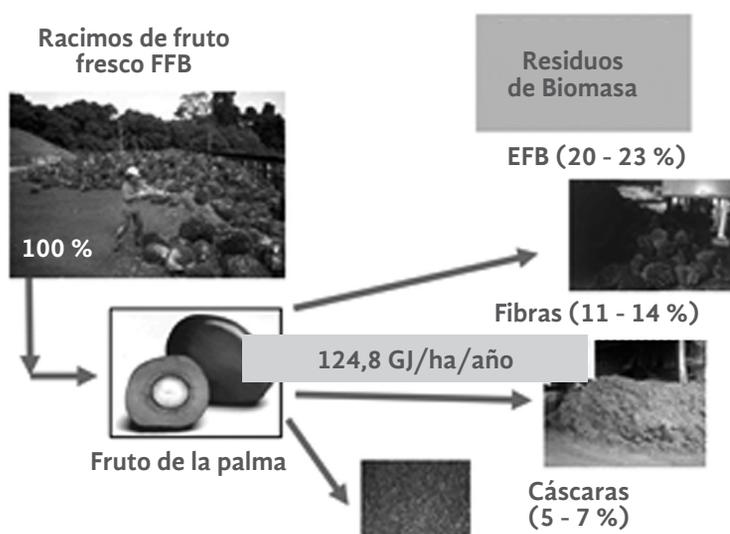
Hasta el momento, en cuanto a caña de azúcar se ha profundizado en el estudio de la producción de coproductos tales como electricidad, ácido poliláctico, azúcares, bioetanol, polietileno, biobutanol, bioetanol celulósico, biodiésel, alimentos para animales, biometanol y otros tipos de compuestos.

Un esquema de posibles productos a considerar en una biorrefinería en el sector de azúcar y alcohol se muestra en la Figura 14.

En el caso de las potenciales biorrefinerías a partir de las extractoras de aceite de palma los principales productos considerados son la electricidad excedente, *pellets*, bioaceite, biocarbono y compost (Figura 15). En la parte derecha de la figura se muestran los productos substituidos en los sistemas de referencia convencionales. La reducción de emisiones de GEI resultantes de esta sustitución es calculada.

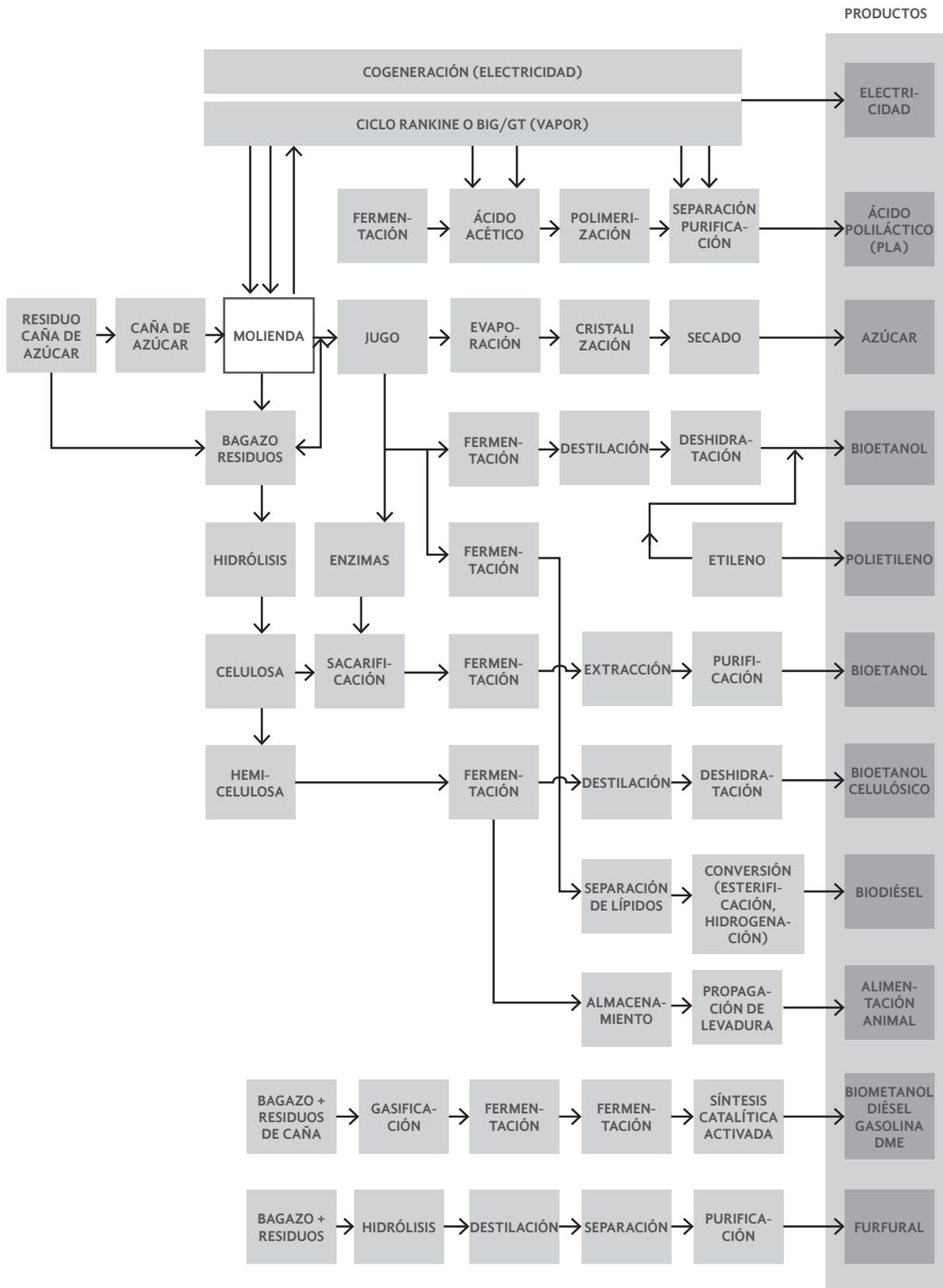
## Historial de estudios del NEST/ UNIFEI en palma de aceite

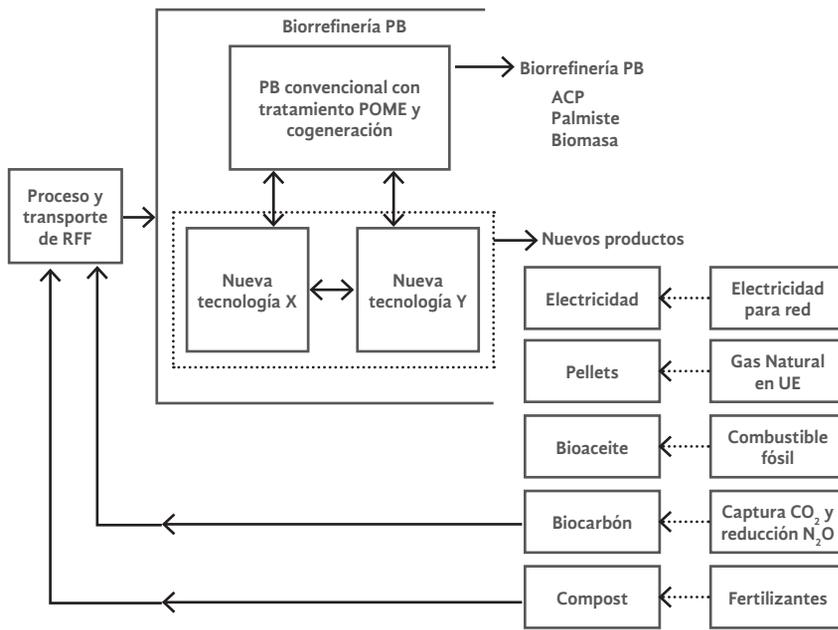
Desde el 2005 el NEST/UNIFEI viene trabajando en conjunto con el sector palmero y universidades colombia-



**Figura 13.** Disponibilidad energética de los residuos de biomasa de la palma de aceite. Adaptado de (Adaptado de García Núñez *et al.*, 2010)

**Figura 14.** Posibles rutas tecnológicas en una biorrefinería basada en la caña de azúcar (Silva Lora et al., 2014)





**Figura 15.** Alternativas productivas para una biorrefinería de palma de aceite y productos sustituidos (García Núñez, *et al.*, 2015).

nas en aspectos de ACV, cogeneración y sostenibilidad (Figura 16). Se destacan los siguientes trabajos:

- Consultoría sobre el potencial y limitaciones para la expansión de la cogeneración en el sector palmero (Arrieta *et al.*, 2007). Es posible disponer de una potencia de generación de 1 a 7 MW de plantas con capacidad de procesar entre 18 y 60 tRFF/h.
- Análisis del Ciclo de Vida del biodiésel en tres extractoras de aceite de palma (Figura 17. Yáñez *et al.*, 2009). Fueron obtenidos valores del NER en el rango entre 5 y 6.
- Colaboración en el estudio de opciones de implementación de biorrefinerías en un equipo de trabajo compuesto por especialistas de Cenipalma, Washington State University y UNIFEI. En (García

Núñez *et al.*, 2016) se muestra el esquema de radar que resume los resultados del estudio y que incluye indicadores ambientales, económicos y sociales (Figura 18).

## Posibilidades de interacción y complementación entre la industria del azúcar y alcohol y el sector de la palma de aceite

Entre los complejos de biorrefinerías basados en los residuos del procesamiento de la caña de azúcar y de la palma de aceite puede existir una importante interacción productiva.



**Figura 16.** Principales aspectos de los trabajos realizados por el NEST/UNIFEI en la industria de la palma de aceite.

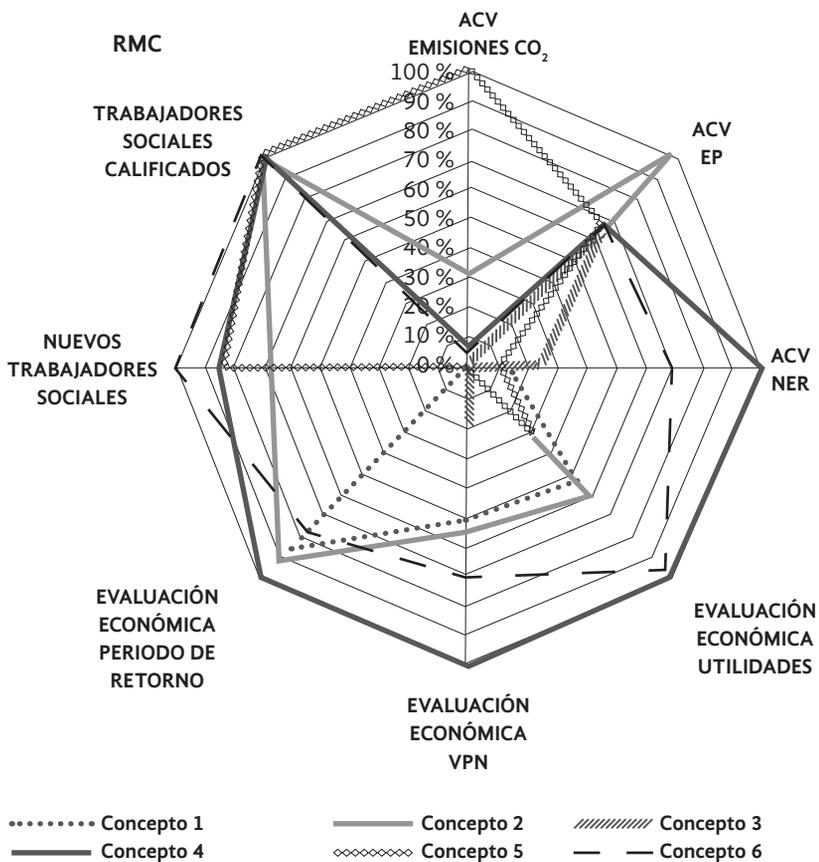
**Figura 17.** Resultados de la determinación de la *NER*- Relación líquida de energía para tres casos de estudio en Colombia (Yáñez *et al.*, 2007).

**RELACIÓN OUTPUT/INPUT (NER-NET ENERGY RATIO)**



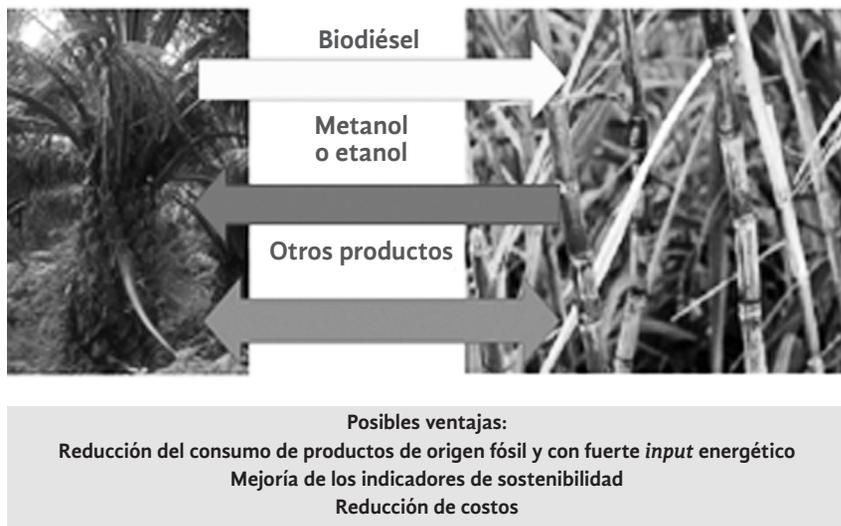
INPUT, (MJ/kg Biodiésel)	C1	C2	C3
Agrícola	3,2069	4,2376	2,6326
Extracción-incluido cogeneración (biomasa)	1,0629	1,2721	0,7279
Refinación de aceite	0,9804	0,9804	0,9804
Transesterificación-T1. Borken <i>et al.</i> , (2006)	5,7608	5,7608	5,7608
Transesterificación-T2. Ácidos grasos	20,5472	20,5472	20,5472
Transesterificación-T3. Lurgi (2007)	5,0194	5,0194	5,0194
<b>Input total, usando T1</b>	<b>11,0110</b>	<b>12,2509</b>	<b>10,1017</b>
<b>Input total, usando T2</b>	<b>25,7974</b>	<b>27,0373</b>	<b>24,8881</b>
<b>Input total, usando T3</b>	<b>10,2696</b>	<b>11,5095</b>	<b>9,3603</b>
<b>Input total, con aporte de racimos vacíos y usando T3</b>	<b>9,9621</b>	<b>11,2020</b>	<b>9,0528</b>
Output, (MJ/kg biodiésel)	C1	C2	C3
Fibra (10 % excedente)	0,8572	0,7246	0,6656
Cuesco (29 % excedente)	2,7913	2,6483	1,8517
Biogás	0,0552	0,0552	0,0552
Torta palmiste	2,5406	2,3863	2,4658
Aceite de palmiste	6,0063	5,6416	5,8296
Glicerina	2,0938	2,0938	2,0938
Ácidos grasos	1,2766	1,2766	1,2766
Biodiésel	39,60	39,60	39,60
<b>Output total</b>	<b>55,2210</b>	<b>54,4264</b>	<b>53,8383</b>
<b>O/I (Sin participación de racimos vacíos), usando T3</b>	<b>5,3771</b>	<b>4,7288</b>	<b>5,7518</b>
<b>O/I (Con participación de racimos vacíos), usando T3</b>	<b>5,5431</b>	<b>4,8586</b>	<b>5,9471</b>

**Figura 18.** Diagrama de radar con los resultados de la evaluación de la sostenibilidad para seis conceptos de biorrefinerías en la industria de la palma de aceite (García Núñez *et al.*, 2016).



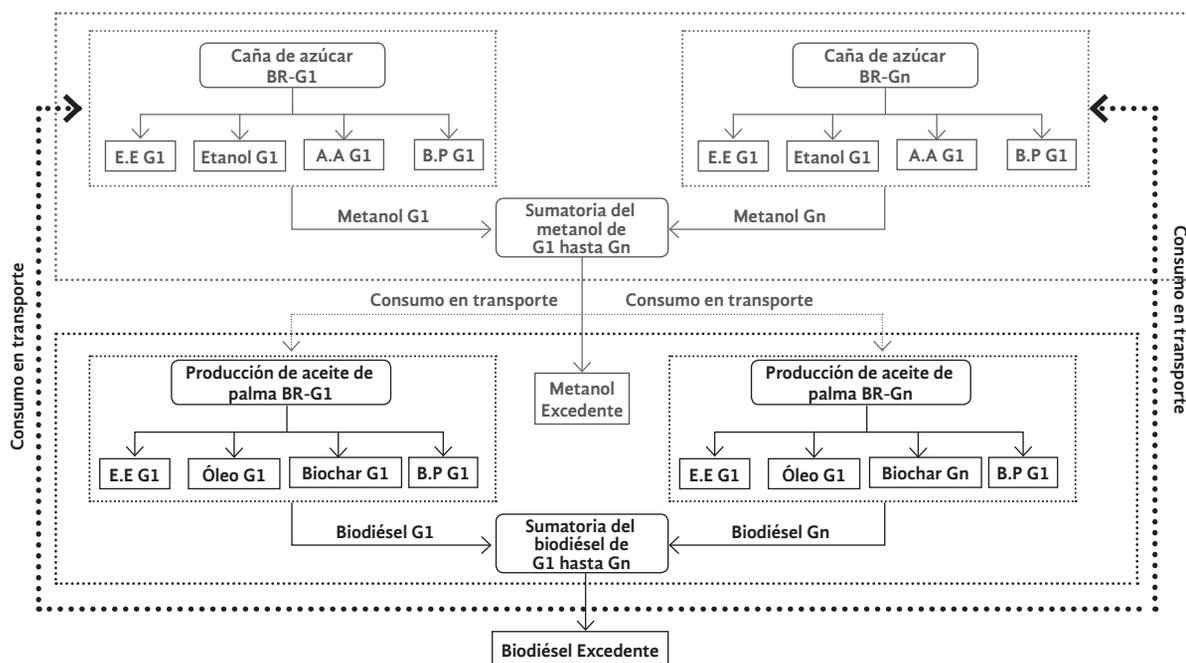
Una de las propuestas estudiadas es la utilización del biometanol producido a partir de los residuos lignocelulósicos de la caña de azúcar (por la ruta termoquímica) en la producción de biodiésel de palma de aceite. El biodiésel obtenido puede a su vez utilizarse como combustible para las máquinas agrícolas y para el transporte de materias primas y productos finales entre los complejos agroindustriales (Figuras 19 y 20).

Actualmente se adelantan trabajos en Brasil sobre la modelación de plantas de producción de biometanol a partir de la ruta termoquímica utilizando residuos de la industria de azúcar y alcohol. En Colombia y Brasil se ha investigado y se ha implementado la producción a escala industrial de éster metílico para la producción de biodiésel. La sustitución del metanol fósil por biometanol producido por una



**Figura 19.** Alternativas y ventajas de la interacción de complejos de biorrefinerías basados en la caña de azúcar y la palma de aceite.

**Figura 20.** Interacción entre complejos de biorrefinerías basados en la caña de azúcar y la palma de aceite.



biorrefinería aumenta la relación neta de energía de entrada/salida (NER), hasta 8-9, lo que corresponde a un incremento de 4 puntos sobre las condiciones actuales de producción de biodiésel. Este aumento se da básicamente por la reducción del uso indirecto de combustibles fósiles, los cuales representan el 43 % de la energía consumida.

Se ha planteado la posibilidad de integrar procesos y productos de biorrefinerías en búsqueda de aumentar el beneficio entre la caña de azúcar y la palma de aceite. Como posible ventaja se ha contemplado:

- La reducción del consumo de productos de origen fósil con un fuerte *input* energético.
- El mejoramiento de los indicadores de sostenibilidad
- La reducción de costos de procesamiento.

El sector azucarero consume el 4 % de todo el diésel usado en Brasil. El sector de biodiésel en Brasil importa metanol por valor de 250M USD.

La interacción productiva entre las biorrefinerías de caña de azúcar y palma de aceite permitiría un aumento potencial del NER en la producción de etanol de la caña de azúcar hasta de 19. Para la palma de aceite el incremento puede llegar hasta 8-9.

Adicionalmente, desde el punto de vista del área ambiental, la implementación de estas tecnologías

en los dos complejos de refinerías puede llegar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en 20 %, comparado con procesos de producción convencionales que usan diésel y metanol fósiles.

## Conclusiones

La implementación de biorrefinerías a partir de complejos industriales existentes tiene potenciales ventajas energéticas, económicas y ambientales (aumento de la sostenibilidad).

El diseño de conceptos de biorrefinería y la evaluación de su sostenibilidad exige el uso combinado del ACV y de técnicas de optimización, con la utilización de un conjunto de indicadores.

Los sectores de azúcar y alcohol a partir de la caña de azúcar y el del aceite de palma disponen de gran cantidad de residuos de biomasa y son potenciales candidatos para la implementación de biorrefinerías.

La interacción de conjuntos de biorrefinerías basados en caña de azúcar y en palma de aceite, a través del suministro de biometanol y biodiésel permitiría elevar considerablemente los indicadores de sostenibilidad de ambos sectores productivos.

□

## Referencias

- Ahlgren, S. *et al.*, 2013. *LCA of biorefineries identification of key issues and methodological recommendations*. Göteborg, Sweden: Report N° 2013:25.
- Alvarado, P. E. M. *et al.*, 2013. Optimization of Pathways for Biorefineries Involving the Selection of Feedstocks, Products and Processing Steps.. *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (14), pp. 5177-5190.
- Andiappan, V. *et al.*, 2015. Synthesis of sustainable integrated biorefinery via reaction pathway synthesis: Economic, incremental environmental burden and energy assessment with multiobjective optimization.. *American Institute of Chemical Engineers. AIChE J.*, 61, pp. 132-146.
- Arrieta, F. R. P. *et al.*, 2007. Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: three case studies.. *Biomass and Energy.* 31 (7), pp. 503-511.
- Azapagic, A., 2014. Sustainability considerations for integrated biorefineries. *Trends in biotechnology*, 32(1), pp. 1-4.
- Bauzá, 2015. *Sustainable scaling-up of microalgae into a biorefinery concept*. Brussels, 3rd European Workshop Life Cycle Analysis of Algal based Biofuels & Biomaterials .

- Bio2Value, 2015. *Biorefinery Concepts*. [En línea] Available at: <http://biorefinery.nl/background-biorefinery/biorefinery-concepts/>
- Botha, F. C., 2009. Energy yield and cost in a sugarcane and biomasa system. *Proc Aust Soc Sugar Cane Technol. Vol 31.*, pp. 1-10.
- Carlos Enrique, O. F., 2013. Uso integral de la biomasa de palma de aceite. *Revista Palmas*, Volumen 34, pp. 315-323.
- Chandel, A. K., da Silva, S., Carvalho, W. & Singh, V., 2012. Sugarcane bagasse and leaves: foreseeable biomass of biofuel and bio-products. *Journal of chemical technology and biotechnology*, 87(1), pp. 11-20.
- Cherubini, F., 2010. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), pp. 1412-1421.
- Cherubini, F. et al., 2009. En: *Biofuels, Bioprod. Biorefining*. Vol 36(12). pp. 534-546.
- Cherubini, F. & Jungmeier, G., 2010. LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(1), pp. 53-66.
- Chiradeja, P. & Ramakumar, R., 2004. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 19(4), pp. 764-73.
- Deloitte Access Economics, 2014. *Economic impact of a future biorefinery industry in Queensland*, Sydney: Deloitte Access Economics.
- Dias, M. O. S. et al., 2013. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. *Applied Energy*, Volumen 109, pp. 72-78.
- García Núñez, J. A. et al., 2015. *Evolution of Palm Oil Mills Into Biorefineries: Technical, and Environmental Assessment of Six Biorefinery Options*. Nicolas Abatzoglou, Université de Sherbrooke, Canada Sascha Kersten, University of Twente, The Netherlands Dietrich Meier, Thünen Institute of Wood Research, Germany Eds, ECI Symposium Series. [http://dc.engconfintl.org/biorefinery\\_1/9:Biorefinery I: Chemicals and Materials From Thermo-Chemical Biomass Conversion and Related Processes](http://dc.engconfintl.org/biorefinery_1/9:Biorefinery_I:Chemicals_and_Materials_From_Thermo-Chemical_Biomass_Conversion_and_Related_Processes).
- García Núñez, J. A., Cardenas Medina. M. M., Yañez Angarita, E. E., 2010. Generación y uso de biomasa en plantas de beneficio en Colombia. *Revista Palmas. Vol 31. N°2*, pp. 41-48.
- Gebreslassie, B. H., Wymire, R. & You, F., 2013. Sustainable design and synthesis of algae-based biorefinery for simultaneous hydrocarbon biofuel production and carbon sequestration. *American Institute of Chemical Engineers. AIChE J.* 59, pp. 1599-1621.
- Gheewala, P., 2011. Life Cycle Assessment (LCA) to Evaluate Environmental Impact of Bioenergy Projects. *Journal of Sustainable Energy & Environment Special Issue*, 35(1), pp. 35-38.
- IEA, 2015. *TASK 42 Biorefining*. [En línea] Available at: <http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/en/ieabiorefinery.htm>
- Jong, E. d. & Jungmeler, G., 2015. *Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries*.
- Jungmeier, G., 2014. *Approach for the integration of biorefineries in existing industrial infrastructures*, September 3, Antwerp/Belgium: JOANNEUM RESEARCH.
- Jungmeier, G. et al., 2013. *Sustainability Assessment of Energy Driven Biorefineries*. IEA Bioenergy ed. Copenhagen, Denmark: Task 42 Biorefinery.
- Jungmeier, G. et al., Septiembre 3rd - 5th, 2013. *Possible Role of a Biorefinery's Syngas Platform in a Biobased Economy*, Vienna/Austria: Assessment in IEA Bioenergy Task 42 "Biorefining".

- Kamm, B. & Kamm, M., 2004. Principles of Biorefineries. *Applied microbiology and biotechnology*, 64(2), pp. 137-145.
- Kamm, B. & Kamm, M., 2007. International Biorefinery Systems. pp. 1983-1997.
- Keller, H., Rettenmaier, N. & Reinhardt, G. A., 2015. Integrated life cycle sustainability assessment - A practical approach applied to biorefineries. *Applied Energy*, Volumen 154, pp. 1072-1081.
- Maity, S. K., 2015. Opportunities recent trends and challenges of integrated biorefineries: Part II. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volumen 43, pp. 1446-1466.
- National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2008. *Biomass research*. [En línea] Available at: <http://www.nrel.gov/biomass/>
- Navarro, F. S. P., Vilchis, L. E. & Sacramento-Rivero, J. C., 2014. Aplicación de una nueva metodología para la evaluación de la sostenibilidad de biorefinerías.. *Memorias del XXV Encuentro Nacional de la AMIDIQ*, pp. 3281-3286.
- Olivério, J. L., 2003. *Fabricação Nacional de Equipamentos para a Produção de Álcool e Co-Geração*. Rio de Janeiro: Seminário-Álcool: Potencial Gerador de Divisas e Empregos.
- Parajuli, R. et al., 2015. 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*. Vol 43., pp. 244-263.
- Pawelzik, P. et al., 2013. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials. *Conservation and Recycling*, Vol. 73, pp. 211-228.
- Pereira, L. G. et al., 2014. Butanol production in a sugarcane biorefinery using ethanol as feedstock. Part II: Integration to a second generation sugarcane distillery. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol 92. Issue 8., pp. 1452-1462.
- Rabelo, S. C., Carrereb, H., Filho, R. M. & Costa, A. C., 2011. Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept-. *Bioresource Technology*. Vol. 102. Issue 17., pp. 7887-7895.
- REN21, s.f. *Global Status Renewable Energy Report*. [En línea] Available at: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN21-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN21-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf)
- Renó, M. L. G. et al., 2014. Sugarcane biorefineries: Case studies applied to the Brazilian sugar-alcohol industry.. *Energy Conversion and Management*. Volume 86., pp. 7887-7895.
- Rettenmaier, N. et al., 2014. *Integrated sustainability assessment of the BIOCORE biorefinery concept, Report prepared for the BIOCORE project www.biocore-europe.org*, Heidelberg: IFEU.
- Sacramento-Rivero, J. C., 2012. A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators. *Biofuels, Bioprod. Biorefining*. Vol. 6, pp. 32-44.
- Silva Lora, E. E. et al., 2014. The sugar and alcohol industry in the biofuels and cogeneration era: a paradigm change (part II). *Sugar Industri*. 139 N° 2, pp. 97-104.
- Singh, B., Stromman, A. & Hertwich, E., 2012. Scenarios for the environmental impact of fossil fuel power: Co-benefits and trade-offs of carbon capture and storage. *Energy*. Vol 6, pp. 32-44.
- Vaz Jr, S., 2011. Biorrefinarias: Cenários e Perspectivas.. *Embrapa Agroenergia* ISBN:978-85-63276-02-5, p. 176.
- Yañez, E. E. A., Lora, E. E. S., Costa, R. E. & Torres, E. A., 2007. The energy balance in the palm oil - Derived methyl Ester (PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia. *Biomass and Bioenergy*: 31/(7), pp. 503-511.