

# Análisis de sensibilidad de la cogeneración utilizando biomasa en el análisis de ciclo de vida del biodiésel de aceite de palma

## Sensibility Analysis of the Cogeneration Using Biomass on Life Cycle Assessment for Palm Oil Biodiesel

### AUTORES

#### Édgar E. Yáñez A.

MSc. MBA. Investigador Asociado  
Director del Programa de Plantas  
de Beneficio. (Cenipalma)  
edgar.yanez@cenipalma.org

#### Electo Silva Lora

Director del Núcleo de Excelencia  
de Sistemas Termoeléctricos (Nest)  
Universidad Federal de Itajubá,  
Unifei. (Brasil)  
electo@unifei.edu.br

#### Oswaldo J. Venturini

Profesor Adjunto  
Miembro del Núcleo de Excelencia  
de Sistemas Termoeléctricos (Nest)  
Universidad Federal de Itajubá,  
Itajubá (Brasil)

#### Cássia L. Ugaya

Profesor Titular  
Universidad Tecnológica Federal de  
Paraná, Curitiba (Brasil)  
cassiaugaya@utfpr.edu.br

### Palabras CLAVE

Cogeneración, Análisis de ciclo de  
vida, Biodiésel, Aceite de palma,  
SimaPro, Gatecycle.

Cogeneration, Life Cycle Assessment,  
Biodiesel, Palm Oil, SimaPro,  
Gatecycle.

Recibido: 24 octubre 2008

Aceptado: 28 enero 2009

Tomado y traducido de:

21st International Conference on  
Efficiency, Cost, Optimization, Simu-  
lation and Environmental Impact of  
Energy Systems. June 24 - 27, 2008.  
(ECOS 2008). www.ecos2008.polsl.pl

### Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de un sistema de cogeneración utilizando biomasa como combustible sobre el análisis de ciclo de vida (ACV) del biodiésel de aceite de palma mediante la utilización de algunos residuos del proceso de extracción de aceite para generar electricidad a partir de vapor, con altos parámetros y tecnologías modernas. El uso apropiado de estos residuos en los sistemas de cogeneración puede permitir que el proceso sea no sólo autosuficiente, sino también rentable en términos de energía excedente para ser suministrada a la red, al reemplazar fuentes fósiles. Asimismo, es amigable con el medio ambiente porque reduce la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Se simuló varios esquemas térmicos eficientes para la cogeneración en la industria del aceite de palma, con una turbina de condensación-extracción y calderas de alta presión, y el empleo del *software* Gatecycle, versión 5.0.1., para calcular los balances de masa y energía. Se evaluaron diferentes fuentes y niveles de utilización de biomasa como combustible en la caldera, teniendo en cuenta el potencial de las fibras, cuercos, tusas y biogás producidos. En todos los casos fue posible hacer una estimación del excedente de energía eléctrica, garantizando suficiencia energética y cumpliendo con el criterio de paridad térmica del proceso. Estos resultados fueron considerados en el ciclo de vida de producción del biodiésel, en el balance energético y en la evaluación del impacto ambiental, empleando el *software* SimaPro, versión 7.01. El ACV se realizó “de la cuna a la tumba”, considerando las etapas agrícola, de extracción, refinación, transesterificación y transporte para una unidad funcional de 1 kg de biodiésel, y se utilizó para el análisis el método Impact 2002+ de Ecoinvent.



## Summary

The objective of this work is to evaluate the impact of a biomass fueled cogeneration system over the life cycle assessment (LCA) for palm oil biodiesel by introducing some residues from the oil extraction process to generate electricity from steam with high parameters and modern technologies. The appropriate use of these residues in cogeneration systems could make the process not only self-sufficient but profitable in terms of surplus energy that could be supplied to the grid, by replacing fossil sources, and it is also environmentally friendly because it reduces GHG generation. Several efficient thermal schemes for co-generation in the palm oil industry with a condensing-extraction turbine and high pressure boilers were simulated by using Gatecycle software version 5.0.1. in order to calculate the mass and the energy balances. Different sources and levels of biomass utilization were evaluated as a fuel in the boiler, considering the potential of fibers, shells, EFB and biogas produced. In all of the cases it was possible to make an estimation of the electrical energy surplus, granting energy sufficiency and satisfying the criterion of thermal parity of the process. These results were considered in the biodiesel production life cycle, energy balance and environmental impact evaluation by using SimaPro software version 7.01. The LCA was carried out from “cradle to gate”, considering the stages of agricultural, extraction, refining, trans-esterification and transport for a functional unit of 1 kg of biodiesel, using for the analysis the IMPACT 2002+ method from Ecoinvent.



## Introducción

El uso extendido de ésteres metílicos de aceites vegetales como biocombustible en el mundo, presenta importantes ventajas con relación al diésel. Una de éstas es su potencial contribución a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de azufre, y, principalmente, a la ganancia neta de energía primaria, al reemplazar la energía proveniente de fuentes fósiles. Según (International Atomic Energy Agency, 2005), el suministro total de energía primaria (Step) comprende la producción de energía primaria, por ejemplo, carbón, petróleo, gas natural, nuclear, hidro y otras fuentes renovables de energía combustibles y no combustibles, más las importaciones, menos las exportaciones de todos los portadores energéticos, menos los búnkers marinos internacionales y más las variaciones netas en las existencias de energía.

De esta manera, la producción de biodiésel puede ser una alternativa como un sustituto del diésel para ahorrar el Step y reducir los impactos ambientales. De hecho, sólo alrededor de dos tercios de los recursos fósiles en la forma de diésel pueden ahorrarse mediante la sustitución de diésel por biodiésel (Fron del, M.; Peters, J., 2007).

Los combustibles alternativos deben ser de fácil acceso, amigables con el medio ambiente y técnica y económicamente competitivos. Uno de estos combustibles son los triglicéridos (aceites vegetales/grasas animales) y sus derivados. Los aceites vegetales, al ser renovables, son ampliamente disponibles a partir de una variedad de fuentes y tienen un bajo contenido de azufre, cerca de cero, y por tanto ocasionan menos daño ambiental (menor Efecto invernadero) que el diésel. El uso de aceites vegetales, tales como los de palma, soya, girasol, maní y aceite de oliva, entre otros, como combustibles alternativos para motores diésel se remontan a casi nueve décadas, pero debido al rápido descenso de las reservas de petróleo, nuevamente se está fomentando en muchos países (Barnwal, B.K.; Sharma, M. P., 2005).

### Productividad y biomasa

Actualmente en el mundo se ha aceptado que los recursos vegetales más importantes para la producción de biodiésel son: colza, soya, palma de aceite y girasol. Estos cultivos energéticos presentan diferencias significativas en sus rendimientos de aceite y energía, como puede observarse en la Tabla 1. La tasa de extracción de aceite es considerada como uno de los indicadores más importantes de los aceites vegetales

**Tabla 1.** Rendimiento de aceite y energía de los cultivos energéticos más importantes para producir biodiésel [4,5]

	Soya	Girasol	Colza*	Aceite de palma
Rendimiento del cultivo (kg ha <sup>-1</sup> )	3.000	1.500	4.315	20.000
Tasa de extracción de aceite (%)	18	42	40	20
Rendimiento de aceite (aceite ha <sup>-1</sup> )	540	630	1.726	4.000
Rendimiento de energía (MJ ha <sup>-1</sup> )	21.384	24.948	68.350	158.400
Diésel equivalente** (gal (ha año) <sup>-1</sup> )	153,39	178,95	490,27	1136,19
Diésel equivalente** (bbl (ha año) <sup>-1</sup> )	3,65	4,26	11,67	27,05

\* Department of Crop and Soil Science (Oregon State University).

\*\* Considerando el valor calorífico neto, para el diésel = 43,33 MJ kg<sup>-1</sup> y para el biodiésel = 39,6 MJ kg<sup>-1</sup>

que pueden utilizarse como materia prima para la producción de biodiésel. El rendimiento de aceite, o mejor, la energía por hectárea, debe ser considerada como uno de los indicadores más importantes, debido a su relación directa con la utilización de recursos naturales como la tierra, el consumo de maquinaria y de energía fósil, y también porque permite establecer una relación con otros cultivos y áreas para la producción de alimentos.

De esta manera, el aceite de palma presenta los valores más altos de rendimiento de aceite y energía por hectárea, con relación a las demás alternativas de cultivos oleaginosos. Este valor del rendimiento del aceite de palma es entre dos y siete veces mayor que el de los demás cultivos. Esta diferencia se debe principalmente al alto rendimiento del aceite de palma.

La producción de biodiésel (éster metílico) a partir de aceite de palma presenta ventajas extraordinarias con respecto a la ganancia neta de energía primaria, en lo concerniente a los recursos de energía agotables con relación a otras fuentes bioenergéticas. Entre otros aspectos, esta ventaja está basada en su mayor rendimiento de aceite por hectárea (4000-6500 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), en su mínima mecanización y en la ausencia

de productos químicos utilizados para extraer y refinar el aceite de palma.

Los residuos de biomasa generados en la extracción este aceite están compuestos principalmente por fibras, cuescos y racimos vacíos de fruta o tusas (EFB, por su sigla en inglés), que llegan a ser el 42% del peso del racimo de fruta fresca (RFF), equivalente a 8240 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de biomasa y la producción de 392 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de biogás con 55% de metano.

La Tabla 2 presenta el porcentaje de los residuos de biomasa relacionados con el racimo de fruta fresca (RFF) de la palma de aceite. Esto representa un alto potencial para la generación de energía eléctrica, a partir de la utilización de la biomasa de la palma de aceite disponible para la cogeneración.

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de un sistema de cogeneración utilizando biomasa como combustible sobre el análisis de ciclo de vida (ACV) del biodiésel de aceite de palma mediante la utilización de algunos residuos del proceso de extracción de aceite para generar electricidad a partir de vapor, con altos parámetros y tecnologías modernas. El uso apropiado de estos residuos en los sistemas de co-

**Tabla 2.** Producción de biomasa de palma de aceite

Biomasa	% RFF	% Biomasa sólida	Producción (Kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Poder Calorífico Superior (HHV)*** (kJ/kg) [7,8]	Potencial de energía (MJ ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
Fibra	11 – 14,5	32,3	2.660	19.201	51.074,6
Cuesco	5 – 7	14,6	1.200	21.445	25.734,0
Tusa (EFB)	20 – 25	53,2	4.380	8.165	35.762,7
Biogás*	15 – 21 m <sup>3</sup> ton RFF <sup>-1</sup>	---	392	22.900 kJ/m <sup>3</sup>	12.246,6

\* Para una productividad de 20 t RFF ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>

\*\* Humedad de la fibra 40%, del cuesco 10% y de los racimos vacíos 50%.

\*\*\* (Mahlia, T.; Abdulmuin, M.; Alamsyah, T.; Mukhlshien, D., 2001), (Husain; Zainal, Z. A.; Abdullah, M. Z., 2003).

generación puede hacer que el proceso sea no sólo autosuficiente, sino también rentable en términos de energía excedente para suministrarle a la red, reemplazando el uso de fuentes fósiles para la generación de energía eléctrica. Asimismo, es amigable con el medio ambiente porque reduce la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

El trabajo analiza la utilización de biomasa para mejorar el balance energético establecido en el ciclo de vida del biodiésel de aceite de palma, teniendo en cuenta la relación Output / Input de energía, dado que cada una puede ser utilizada como combustible para generar electricidad.

## Metodología

### Modelo de esquema térmico en Gatecycle

Se simularon siete esquemas térmicos eficientes para la cogeneración en la industria del aceite de palma, empleando el *software* Gatecycle, versión 5.0.1 (Gatecycle, 1989-2003), considerando varias fuentes y niveles de utilización de biomasa, y utilizando turbinas de condensación-extracción (TCE) y de contrapresión (TCP) con calderas de alta presión. Lo anterior, con el fin de calcular los balances de masa y energía, así como la eficiencia eléctrica, la energía eléctrica neta generada y el consumo térmico específico (*heat rate*), entre otros parámetros para cada uno de los esquemas. La Tabla 3 muestra el tipo de turbina y el porcentaje de biomasa utilizados en los casos analizados.

La Figura 1 muestra el esquema térmico simulado para una planta de beneficio. Este esquema incluye una turbina de condensación-extracción o de contrapresión (para dos casos), un intercambiador de calor

para la generación de vapor del proceso, una torre de enfriamiento con un condensador y un sistema de precalentamiento del agua de alimentación. En general, los sistemas de cogeneración considerados tienen las siguientes características en común:

- El sistema fue diseñado para operar en paridad térmica, lo que significa que seguirá la curva de demanda de calor;
- El tamaño del sistema se hizo suponiendo su operación durante el mayor número posible de horas a lo largo del año (basado en la disponibilidad estacional de la fruta), lo que incluye el almacenamiento de parte de la biomasa para los meses con baja producción de fruta;
- Como tecnología de cogeneración se escogió el sistema de ciclo a vapor. Esto debido al uso mayoritario de combustibles sólidos (residuos de biomasa), de energía térmica como vapor y, finalmente, a una amplia difusión de la tecnología de generación de vapor;
- Los parámetros de vapor fueron 2MPa y 350° C para los casos donde se utilizaron diferentes niveles de combustibles (Arrieta, F.; Teixeira, F.; Yáñez, E.; Lora, E.; Castillo, E., 2007);
- Los requerimientos de vapor para el proceso de extracción de aceite, determinados para una planta estándar con una capacidad de 30 toneladas de RFF h<sup>-1</sup>, lo que significa un flujo de vapor de 4,16 kg s<sup>-1</sup>, una presión de 413,60 kPa, una temperatura de 144,8° C y una entalpía de 2689 kJ kg<sup>-1</sup>;
- Con el fin de utilizar parámetros de vapor se requieren modificaciones considerables en el

**Tabla 3.** Porcentaje de biomasa producida durante el proceso de extracción de aceite, utilizada como combustible en la caldera

Caso	Turbina	% de biomasa utilizada como combustible en la caldera			
		Fibra	Cuesco	Tusa	Biogás
A	TCP	75	75	---	---
B	TCE	100	50	---	---
C	TCE	100	100	---	---
D	TCP	100	100	100	100
E	TCE	100	100	50	---
F	TCE	100	100	100	---
G	TCE	100	100	100	100

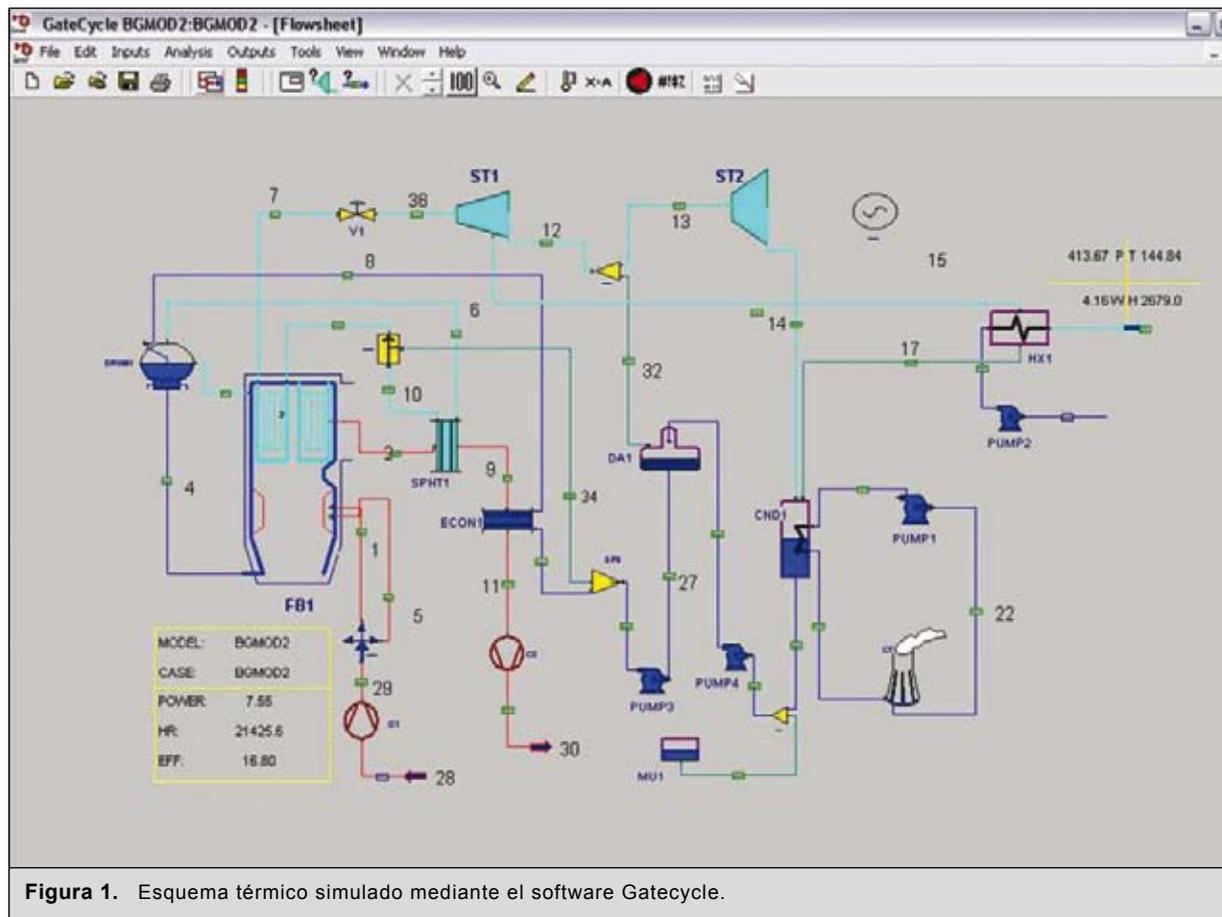


Figura 1. Esquema térmico simulado mediante el software Gatecycle.

proceso, tales como la reducción en el consumo específico de vapor y su variabilidad de acuerdo con el tiempo, el aumento en el factor de capacidad de la planta, etcétera;

- Se consideró evaluar una turbina de condensación-extracción (TCE) y una turbina de contrapresión (TCP);

En todos los casos fue posible hacer una estimación del excedente de energía eléctrica, garantizando suficiencia energética y cumpliendo con el criterio de paridad térmica del proceso.

### Modelo de análisis de ciclo de vida en Simapro

Los resultados térmicos y eléctricos obtenidos fueron considerados en el ciclo de vida de producción del biodiésel, en el balance energético y en la evaluación del impacto ambiental, para lo que se empleó el software Simapro, versión 7.01 (Lurgi – Biodiesel Plants). El ACV se realizó “de la cuna a la tumba”, de acuerdo

con la norma ISO 14040, y considerando las etapas agrícola, de extracción, refinación, transesterificación y transporte para una unidad funcional de 1 kg de biodiésel. Para el análisis se empleó el método Impact 2002+ de Ecoinvent.

El inventario de ciclo de vida (ICV) fue utilizado para calcular la relación salida/entrada de energía como una forma para estimar el balance energético de la producción de biodiésel de aceite de palma en las condiciones colombianas. Se consideraron tres plantas de beneficio de compañías diferentes, con el fin de obtener una referencia para incluir los resultados térmicos y eléctricos obtenidos durante la simulación mediante Gatecycle. Cada compañía representa a una región de Colombia, con diferentes condiciones para producir aceite de palma y con distintos sistemas de suministro de energía. Las características y los parámetros de las tres plantas de beneficio estudiadas se presentan en la Tabla 4. La compañía C2 se consideró como referencia para evaluar el impacto del sistema de cogeneración sobre el ACV del biodiésel de aceite de palma.

<b>Tabla 4.</b> Características y parámetros de las tres compañías evaluadas			
	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
Ubicación en Colombia	Zona Oriental	Zona Norte	Zona Central
Área de palmas, adultas (ha)	1.200	3.436	4.675
Área de palmas, vivero (ha)	1.100	64	130
Densidad del cultivo (# palmas ha <sup>-1</sup> )	145	143	143
Producción de RFF (ton RFF año <sup>-1</sup> )	30.000	85.898	98.175
Procesamiento de RFF (ton año <sup>-1</sup> )	101.324	85.898	154.352
Productividad (ton RFF ha-año <sup>-1</sup> )	25	25	21
TEA (Tasa de Extracción de Aceite)	19,8	21,1	20,4
Rendimiento de aceite (ton aceite ha-año <sup>-1</sup> )	4,95	5,27	4,28
Breve descripción de las instalaciones de suministro de energía	Sistema aislado utilizando diésel y biogás en los motores	Compra toda la electricidad de la red	Electricidad de la red y una cogeneración de baja eficiencia

## Resultados

Con base en los esquemas térmicos simulados fue posible establecer el índice de generación de energía cuando se utilizan sistemas de cogeneración durante el ciclo de vida de producción del biodiésel de aceite de palma. Se obtuvieron valores desde 0,201 hasta 0,874 kWh por kg de biodiésel producido cuando se empleó una turbina de condensación-extracción (Tabla 5).

El balance de energía para la producción de biodiésel de aceite de palma se calculó considerando la relación salida/entrada de energía, para determinar qué tan renovable es el biocombustible. Los valores del balan-

ce energético se presentan en dos etapas: primero, la relación se muestra sin considerar los sistemas de cogeneración para las tres compañías evaluadas (Tabla 6), y segundo, incluye el índice de electricidad obtenido mediante el proceso de cogeneración. Este índice es el punto de referencia para el proceso convencional, el cual será utilizado para analizar el impacto del sistema de cogeneración.

Se obtuvieron valores de 4,86 a 5,95 para la relación salida/entrada de energía, en comparación con un valor de 3,5 para el biodiésel de soya (ITC, 2005), y de 1,7 para el éster metílico de colza (United Nations Environment Program (Unep), 2005). La principal

<b>Tabla 5.</b> Índice de generación eléctrica y térmica					
Caso	Combustible HHV (kJ s <sup>-1</sup> )	Potencia (MW)	Consumo Térmico Específico (Heat Rate)	Eficiencia Eléctrica* (%)	Índice de Generación (kWh kg <sup>-1</sup> biodiésel)
A	21013	1,74	39102,30	9,21	0,2014
B	22546	1,86	39259,30	9,17	0,2153
C	28010	2,84	32041,30	11,24	0,3287
D	51814	3,96	40840,00	8,81	0,4583
E	38698	4,98	24557,60	14,66	0,5764
F	49368	7,03	21885,70	16,45	0,8136
G	51814	7,55	21425,60	16,80	0,8738

\*Con relación al Poder Calorífico Inferior (LHV, por su sigla en inglés) para las calderas que utilizan biomasa como combustible.



<b>Tabla 6.</b> Relación Output / Input de energía para la producción de biodiésel			
<b>Entrada (MJ / kg Biodiésel)</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
Etapa agrícola	3,20	4,23	2,63
Extracción de aceite con cogeneración	1,06	1,27	0,72
Refinación de aceite	0,98	0,98	0,98
Transesterificación [12]	5,01	5,01	5,01
<b>Total de Entrada</b>	<b>9,96</b>	<b>11,20</b>	<b>9,05</b>
<b>Salida (MJ / kg Biodiésel)</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
Fibra, (10 % exceso)	0,85	0,72	0,66
Cuesco, (29% exceso)	2,79	2,64	1,85
Biogás	0,05	0,05	0,05
Torta de palmiste	2,54	2,38	2,46
Aceite de palmiste	6,00	5,64	5,82
Glicerina	2,09	2,09	2,09
Ácidos grasos	1,27	1,27	1,27
Biodiésel	39,60	39,60	39,60
<b>Total de Salida</b>	<b>55,22</b>	<b>54,42</b>	<b>53,83</b>
Salida / Entrada (Utilizando tusa como fertilizante)	5,54	4,86	5,95

diferencia entre estas compañías es el consumo de fertilizantes, basado en el alto uso de energía durante su producción.

Varias consideraciones deben ser tenidas en cuenta cuando los índices de cogeneración de electricidad se incluyen en el balance energético, por ejemplo: la no utilización de algunos residuos para sustituir el fertilizante en la etapa agrícola y, por supuesto, la utilización de biomasa como combustible. El caso C2 fue seleccionado como de referencia, sin cogeneración, y los casos A y G como un rango del índice de potencial de electricidad obtenido con un proceso de cogeneración. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

La Tabla 7 presenta la relación de energía para el punto de referencia, sin cogeneración, y dos casos diferentes de sistemas de cogeneración. Como puede observarse, la relación salida/entrada de energía presentó pequeñas variaciones cuando los procesos de cogeneración son considerados. Este índice presenta algunas dificultades para analizar el efecto de cogeneración, y debido a eso no se consideran la reducción en el impacto ambiental por la ocupación de la tierra ni la sustitución de las instalaciones de suministro de energía fósil.

En cuanto a estos aspectos, es de suma importancia desarrollar un análisis de ciclo de vida completo para eva-

luar el impacto para las diferentes categorías en el punto intermedio (*midpoint*) y en el punto final (*endpoint*), como lo propone la Iniciativa de Ciclo de Vida [15].

Los casos C2 y G fueron modelados por el *software* Simapro y comparados con la producción de diésel (en la refinería) a partir de la base de datos de Simapro. El caso C2 representa el proceso convencional de producción de biodiésel, sin cogeneración y sin la captura de biogás de la planta de tratamiento de efluentes. El caso G simula un proceso con una utilización plena de biomasa para el sistema de cogeneración, en condiciones establecidas para el modelo G (TEC y 2 MPa y 350° C).

La Tabla 8 presenta la caracterización del impacto ambiental para cada caso, empleando el método Impact 2002+. Los impactos de los sistemas de cogeneración para todas las categorías, con relación a un proceso convencional y al diésel, se presentan en la Tabla 9.

Con relación a un proceso de producción convencional de biodiésel a partir de aceite de palma, la utilización de un sistema de cogeneración tiene un impacto muy alto sobre las categorías de ocupación de la tierra (-148%) y agotamiento de la capa de ozono (-33%). Esto se debe a la sustitución de energía eléctrica de las instalaciones de suministro de hidroelectricidad,

**Tabla 7.** Impacto de los índices de cogeneración en el balance energético del biodiésel de aceite de palma

	Caso C2 (Sin cogeneración)	Caso A	Caso G
Índice de generación excedente (kWh kg <sup>-1</sup> biodiésel)	0,00	0,201	0,979
Entrada (MJ/kg biodiésel)			
Etapa agrícola	3,93	3,93	4,23
Extracción de aceite	1,27	0,92	0,92
Refinación de aceite	0,98	0,98	0,98
Transesterificación	5,01	5,02	5,02
Total de Entrada	11,20	10,86	11,16
Salida (MJ/kg biodiésel)			
Biodiésel	39,60	39,60	39,60
Glicerina	2,09	2,09	2,09
Fibra (10% exceso)	0,72	0,72	0,00
Cuesco (29% exceso)	2,64	2,64	0,00
Biogás	0,05	0,05	0,00
Electricidad - Cogeneración	0,00	0,70	3,05
Torta de palmiste	2,38	2,38	2,38
Aceite de palmiste	5,64	5,64	5,64
Ácidos grasos	1,27	1,27	1,27
Total de Salida	54,42	55,12	54,05
Salida / Entrada	4,86	5,08	4,85

**Tabla 8.** Caracterización del impacto ambiental para los casos analizados, empleando el método Impact 2002+

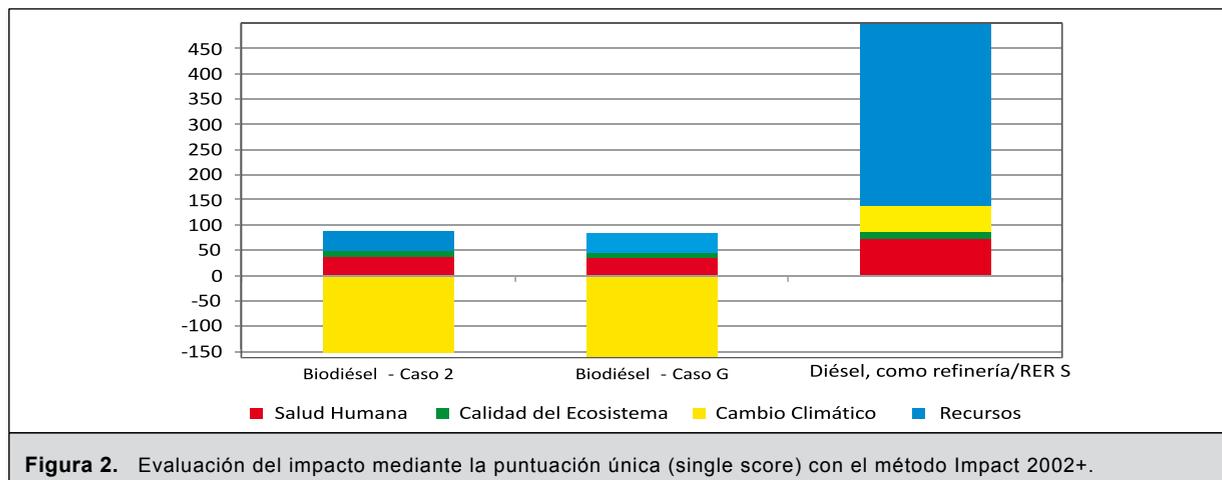
Categorías	Unidad	Caso C2	Caso G	Diésel
Carcinógenos	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	0,01071	0,01045	0,00606
No carcinógenos	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	0,00484	0,00481	0,00719
Respiratorios inorgánicos	kg PM2.5	0,00030	0,00029	0,00070
Radiaciones ionizantes	Bq C-14	2,41378	2,31125	7,03081
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11	2,63E-08	1,75E-08	4,59E-07
Respiratorios orgánicos	kg etileno	0,00012	0,0001	0,00082
Ecotoxicidad acuática	kg TEG agua	76,0057	72,8502	145,452
Ecotoxicidad terrestre	kg TEG suelo	17,9829	18,0247	29,9882
Acid/Nutri terrestre	kg SO <sub>2</sub>	0,01059	0,01047	0,01339
Ocupación de la tierra	m <sup>2</sup> org.cultivable	0,00088	-0,0004	0,00313
Acidificación acuática	kg SO <sub>2</sub>	0,00188	0,00182	0,00541
Eutroficación acuática	kg PO <sub>4</sub> P-lim	0,00101	0,00104	0,00034
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub>	-1,5052	-1,6203	0,44363
Energía no renovable	MJ primaria	6,88711	5,74251	54,0978
Extracción de minerales	MJ exceso	0,00072	0,00064	0,00224

que en Colombia representa un 81%. En países donde existe uso intensivo de la energía fósil, el efecto podría ser aún mucho más positivo.

En cuanto al diésel, el efecto positivo no es sólo debido a la cogeneración, sino también al carácter renovable del biodiésel. Por tanto, el efecto más importante se

centra en el calentamiento global (-465%), en la ocupación de la tierra (-113%) y en el agotamiento de la capa de ozono (-96%), tal como se esperaba.

La evaluación del impacto para los casos estudiados, con el empleo de la puntuación única (*single score*) del método Impact 2002+, se presenta en la Figura 2.



**Figura 2.** Evaluación del impacto mediante la puntuación única (single score) con el método Impact 2002+.

En la Figura 2 es muy fácil ver el efecto de un sistema de cogeneración con relación al proceso convencional y al diésel. El efecto positivo en las categorías de puntos finales (*endpoints*) se obtiene para el impacto

sobre el cambio climático y una importante reducción en recursos, salud humana y calidad del ecosistema. Los valores para cada punto final se presentan en la Tabla 10, la cual incluye todas las categorías que los puntos intermedios (*midpoints*) mostraron en las tablas 8 y 9.

**Tabla 9.** Reducción del impacto ambiental debido a la cogeneración con altos parámetros (caso G) sobre el ACV del biodiésel de aceite de palma (Porcentaje)

Categorías	Con relación al C2, (%)	Con relación al diésel (%)
Carcinógenos	-2,41	72,32
No carcinógenos	-0,67	-33,08
Respiratorios Inorgánicos	-4,50	-58,13
Radiaciones ionizantes	-4,25	-67,13
Agotamiento de la capa de ozono	-33,31	-96,18
Respiratorios orgánicos	-6,92	-86,36
Ecotoxicidad acuática	-4,15	-49,91
Ecotoxicidad terrestre	0,23	-39,89
Ácid/Nutri terrestre	-1,20	-21,83
Ocupación de la tierra	-148,11	-113,51
Acidificación acuática	-3,53	-66,35
Eutroficación acuática	3,32	206,14
Calentamiento global	-7,64	-465,24
Energía no renovable	-16,62	-89,38
Extracción de minerales	-11,63	-71,44

Considerando el método IPCC 2001-100a empleado para evaluar el efecto del potencial de calentamiento global (GWP, por su sigla en inglés) debido al sistema de cogeneración, las emisiones se redujeron de 0,4739 kg CO<sub>2</sub> equivalente para diésel, para ahorrar -0,5346 y -1,4053 kg CO<sub>2</sub> equivalente para biodiésel sin y con sistemas de cogeneración, respectivamente. Esta reducción se muestra en la Figura 3.

## Conclusiones

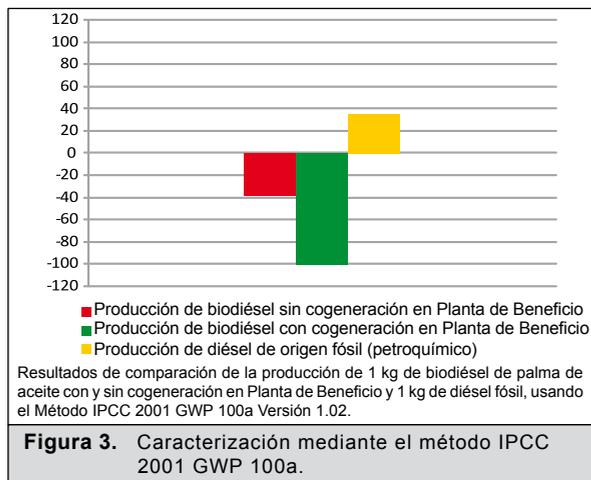
El estudio estableció un potencial de producción de energía de 124,8 GJ ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> a partir de biomasa producida durante la extracción de aceite. El índice de generación de electricidad puede alcanzar 1,02 kWh por kg de biodiésel cuando se utilizan completamente los residuos y se emplea una turbina de vapor de condensación con altos parámetros de vapor.

La relación salida/entrada de energía para el biodiésel de aceite de palma alcanza valores de hasta 5,08, casi 3,5 veces más alto que otros biodiésels obtenidos de diferentes aceites vegetales.

El sistema de cogeneración que utiliza como combustible los residuos de biomasa de la extracción de aceite de palma presenta extraordinarias ventajas para mantener un nivel óptimo en el balance ener-

**Tabla 10.** Evaluación de la puntuación única (*single score*) para los casos y porcentaje de reducción con proceso de cogeneración

Categoría del daño	Caso C2	Caso G	% Reducción
Total	-5,850E-05	-7,925E-05	-35,457
Salud humana	3,66E-05	3,517E-05	-4,068
Calidad del ecosistema	1,153E-05	1,143E-05	-0,874
Cambio climático	-0,0001520	-0,0001636	7,643
Recursos	4,53E-05	3,78E-05	-16,619



gético, así como para obtener un efecto positivo en el impacto sobre los recursos, la salud humana y la calidad del ecosistema.

Con relación al proceso convencional, el proceso de cogeneración presenta un impacto muy alto sobre la ocupación de la tierra (-148%), el agotamiento de la capa de ozono (-33%) y el consumo de energía no renovable de 7,6%, se estimaron como los efectos más importantes, a pesar de que la mayoría de las categorías mostró reducciones importantes. Las emisiones de CO<sup>2</sup> equivalentes del ciclo de vida también se redujeron de 0,4739 kg CO<sub>2</sub> para ahorrar -0,5346 y -1,4053 kg para biodiésel, con y sin sistemas de cogeneración, respectivamente.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a Cenipalma y a las plantas de beneficio por suministrar toda la información necesaria para realizar este estudio.



## Referencias bibliográficas

- Arrieta, F.; Teixeira, F.; Yáñez, E.; Castillo, E. 2007. *Cogeneration Potential in the Columbian Palm Oil Industry: Three Case Studies*. Biomass and Bioenergy; 31: 503-511.
- Barnwal, B. K.; Sharma, M. P. 2005. *Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India*. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 9(9-4): 363-378.
- Cenipalma. 2007. *Statistical yearbook and energy opportunities for palm oil mill*. Informe interno del programa de plantas de beneficio.
- Department of Crop and Soil Science (Oregon State University). *Canola: A biodiesel crop for Oregon*. Disponible en <http://www.oeconline.org/economy/biofuelspdfs/chastain-presentation>
- Frondel, M.; Peters, J. 2007. *Biodiesel: A new Oildorado?* Energy Policy. 35: 1675-1684.
- Gatecycle. Gatecycle para Windows, versión 5.51.01. General Electric. copyright 1989-2003.
- Husain, A.; Zainal, Z. A.; Abdullah, M. Z. 2003. *Analysis of Biomass Residue-based Cogeneration System in Palm Oil Mills*. Biomass and Bioenergy 2003; 24: 117-124.
- International Atomic Energy Agency. 2005. *Energy indicators for sustainable development: Guidelines and methodologies*.
- ITC. 2005. *Production and Utilization Biofuel's Derived of Vegetable Oils*. Documento del Comité termo-dinámico italiano, 2000. Región de Lombardia. Italia. 2000. Disponible en: <http://www.cti2000.it/virt/cti2000/headbio.html>. Accedido en abril de 2005.
- Jon Van Gerpen, Dev Shrestha. 2008. *Update on Soybean Biodiesel Energy Balance Study*. Universidad de Idaho. Conferencia del National Biodiesel Board. Febrero.
- Mahlia, T.; Abdulmuin, M.; Alamsyah, T.; Mukhlshien, D. 2001. *An Alternative Energy Source from Palm Waste Industry for Malaysia and Indonesia*. Energy conversion and management. 42: 2109-2118.
- Lurgi – Biodiesel Plants. Silvio Pedrotti. Disponible en [http://www.ahk.org.br/inwent/palestrasGie\\_Inwent\\_%20V\\_Forum\\_Biodiesel/Silvio%20Pedrotti%20-%20Lurgi%20do%20Brasil.pdf](http://www.ahk.org.br/inwent/palestrasGie_Inwent_%20V_Forum_Biodiesel/Silvio%20Pedrotti%20-%20Lurgi%20do%20Brasil.pdf)
- Ministerio de Minas y Energía (Brasil). Política Nacional de Minas y Energía. Disponible en <http://www.mme.gov.br/frontSide/site/view.do?viewPublicationId=9105&viewPublicationTypeld=9&queryUrl=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fsite%2Fsearch.do%3Fquery%3Dbiodiésel>
- SimaPro, versión software 7.01. Pré-Consultants-Netherlands.
- United Nations Environment Program (Unep). 2005. *Life Cycle Approaches, The Road From Analysis to Practice*. Unep/Setac Life Cycle Initiative.