

## Optimización de la cadena de suministro del biodiésel de palma de aceite en Colombia con base en criterios técnico-económicos y ambientales\*

Optimization of the Colombian Biodiesel Supply Chain from Oil Palm Crop Based on Techno-economical and Environmental Criteria

**CITACIÓN:** Rincón, L. E., Valencia, M. J., Hernández, V., Matallana, L. G. y Cardona, C. A. (2015). Optimización de la cadena de suministro del biodiésel de palma de aceite en Colombia con base en criterios técnico-económicos y ambientales (Adriana Arias, trad.). *Palmas*, 36(4), 67-95.

**PALABRAS CLAVE:** cadena de suministro del biodiésel, expansión de la palma de aceite, emisiones de efecto invernadero, cambio en el uso de la tierra.

**KEY WORDS:** Biodiesel supply chain, palm oil expansion, greenhouse gas emissions land use change.

**RECIBIDO:** junio de 2015.

**APROBADO:** julio de 2015.

\* Artículo traducido del original *Optimization of the Colombian biodiesel supply chain from oil palm crop based on techno-economical and environmental criteria*, publicado en el número 47 de 2015 de la revista *Energy Economics*. Se publica con autorización de los autores y la revista *Energy Economics*.

### LUIS E. RINCÓN

Instituto de Biotecnología y Agroindustria. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

### MÓNICA J. VALENCIA

Instituto de Biotecnología y Agroindustria. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

### VALENTINA HERNÁNDEZ

Instituto de Biotecnología y Agroindustria. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales

### LUIS G. MATALLANA

Grupo de Investigación SIDCOP. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Antioquia

### CARLOS A. CARDONA

Instituto de Biotecnología y Agroindustria. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales  
ccardonaal@unal.edu.co

## Resumen

Durante los últimos años, el marco legal mundial ha estimulado el desarrollo del biodiésel, lo cual ha dado paso a un estudio exhaustivo de su producción y utilización. El biodiésel se ha producido principalmente en países europeos; sin embargo, el potencial agronómico de los países latinoamericanos ha orientado los esfuerzos hacia la producción de estos combustibles apoyándose en la legislación actual. Este ha sido precisamente el caso de Colombia, donde el aceite de palma se ha aprovechado como principal materia prima del biodiésel. Las leyes, normas y reglamentaciones apuntan hacia la

expansión obligatoria del uso de este biocombustible, pero no explican la manera en que se han de lograr estas metas de expansión. Para este trabajo se estudiaron las condiciones óptimas de la cadena de abastecimiento del biodiésel por medio de análisis técnico-económicos y ambientales. Se determinaron las condiciones óptimas para la expansión de los cultivos de palma de aceite tomando en consideración las restricciones logísticas, la evaluación ambiental y la minimización de los costos (todos ellos calculados en este trabajo), y también las emisiones mínimas y el efecto derivado del Cambio en el Uso de la Tierra (CUT). Los resultados mostraron que la Zona Centro de Colombia es la región más prometedora para la ampliación del uso del biodiésel y también que la Zona Oriental es la más adecuada para la expansión de los cultivos, considerando que allí el impacto del CUT es el más bajo de todos. Adicionalmente, los resultados indican que la industria del biodiésel debe también considerar otro tipo de materias primas.

## Abstract

During the last years the worldwide legal framework has stimulated the biofuel development, causing their production and use to be exhaustively studied. Biodiesel has been mostly produced in European countries, but the agronomic potential of the Latin-American countries has led the effort toward the biodiesel production, via regulations. This is the case of Colombia, where the oil palm has been exploited as the major biodiesel feedstock. The acts, laws and regulations indicate the mandatory expansion of biodiesel usage. Nonetheless, the laws do not explain the way in that those expansion targets will be done. In this work, the optimal conditions of the supply chain biodiesel were studied via the techno-economic and environmental analysis. Using logistic restrictions, environmental assessment and cost minimization (all of them were estimated in this work), the optimal expansion conditions were decided, taking into account the minimal emissions and the effect of the Land Use Change (LUC) for the oil palm crop expansion. The results showed that the Middle Region is the most promising zone for biodiesel expansion, as well as the Eastern Region is the most adequate zone for expansion crops since the LUC impact is lowest. Finally, the results indicated that the biodiesel based industry must be addressed toward other feedstocks.

---

## Introducción

Durante el último decenio, el Gobierno colombiano ha promovido la producción y utilización de los biocombustibles como parte de una estrategia para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar el desarrollo rural (Quintero *et al.*, 2008). Esta política nacional se apoya en distintos mandatos establecidos con el fin de reglamentar, ejecutar, controlar y apoyar la producción, el transporte y la utilización del combustible de etanol y el biodiésel en Colombia. Las leyes 693 de 2001 y 939 de 2004 sentaron las bases para las políticas técnicas y, adicionalmente, las exenciones tributarias y normas de ca-

lidad (Secretaría del Senado, 2001, 2004). En ellas se dispuso que todos los combustibles fósiles (gasolina y diésel) deben contener un porcentaje de combustible de etanol y de biodiésel mezclados con la gasolina y el diésel, respectivamente (Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Minas y Energía, 2005, 2007a, b; Ministerio de Minas y Energía, 2003, 2005, 2007, 2008; Secretaría del Senado, 2002). En particular para el biodiésel, y conforme al Decreto 2629 de 2007, las mezcla B10 (10 % de biodiésel y 90 % de diésel) deben entrar en vigencia a partir de 2010, y las mezclas B20 a partir de 2012

(Presidente de la República, 2007). Sin embargo, estas metas de mezcla no se alcanzaron en dichos años. En efecto, a diciembre de 2011, las mezclas de biodiésel distribuidas en todo el territorio colombiano eran B2, B7 y B10 para las zonas Oriente, Centro y Occidente, B7 para las zona Norte, y B10 para la zona Occidente (Federación Nacional de Biocombustibles, 2012). El Departamento Nacional de Planeación (DNP), a través del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), ha señalado que la demanda de biodiésel para el año 2020 se podrá cubrir con mezclas B10, dando a entender que las políticas actuales de expansión continuarán (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2008). Sin embargo, el crecimiento del mercado en Colombia apunta a una ampliación de la demanda de la mezcla B10 a la B20 para 2020 (Infante y Tobón, 2010).

Por consiguiente, la demanda de biodiésel aumentará durante este período. En Colombia, el biodiésel se produce principalmente a partir del aceite de palma. En la actualidad se cosechan anualmente más de 150.000 hectáreas de fruto de la palma de aceite, cuya producción se utiliza para cubrir las aplicaciones alimenticias e industriales del aceite de palma en Colombia (Federación Nacional de Biocombustibles, 2012). Por consiguiente, la ampliación de la demanda de biodiésel requerirá la expansión de la industria de la palma de aceite a fin de cubrir todas las exigencias. En ese sentido, es necesario estudiar la ampliación de esta industria, tomando en consideración la expansión de las áreas sembradas en palma de aceite y la necesidad de aumentar la capacidad de producción de las plantas existentes, o bien montar plantas nuevas.

Para este trabajo se realizó una evaluación de la cadena de abastecimiento, tomando en cuenta las restricciones económicas y ambientales. Según Bai *et al.*, (2012), Bonney & Jaber (2011), y Kretschmer *et al.*, (2009), los criterios ambientales deben incluirse en el análisis del ciclo de vida. El objetivo principal de este trabajo fue evaluar las condiciones óptimas para la expansión de la palma de aceite con base en las emisiones de gases de efecto invernadero, las condiciones del mercado, los costos y las zonas de producción. Se consideraron distintos sitios para ubicar nuevas plantas de biodiésel y para ampliar los cultivos. Por último, se analizaron también las implicaciones del cam-

bio en el uso de la tierra derivadas de las expansiones de los cultivos.

## Metodología

En general, la cadena de la oleoquímica comprende tres niveles: siembra, extracción y refinación. En Colombia, la siembra y la extracción están integradas en los niveles primario e intermedio mientras que la refinación abarca todas las actividades industriales basadas en la producción del aceite crudo. En este trabajo se han considerado cuatro fases dentro del sistema de la cadena de abastecimiento del biodiésel: la producción del aceite de palma, el transporte del aceite de palma, la conversión a biodiésel en las plantas, y la distribución a los mayoristas.

En la actualidad, la cadena de abastecimiento del biodiésel en Colombia está distribuida de la siguiente manera: cuatro regiones que comprenden 20 departamentos donde están las zonas productoras de palma de aceite; seis plantas de producción ubicadas en dos de las cuatro zonas productivas (Figura 1). Además, el biodiésel se puede transportar de dos maneras: por carrotaque (B100) y a través de poliductos (mezcla B4). El transporte a través de poliducto es restringido dependiendo de la región y el volumen, cuyo costo para una mezcla B4 debe ser asumido por el mayorista. La distribución del biodiésel a todas las ciudades de Colombia está a cargo de 48 mayoristas autorizados por el Gobierno Nacional quien regula los costos de transporte y venta. Es importante considerar que la distribución de la mezcla del biodiésel no es uniforme y se encuentra regulada.

Otro de los objetivos del presente trabajo fue analizar la expansión de la industria del biodiésel, considerando el cumplimiento de la meta de la mezcla B20 en 2020, con base en la expansión de la industria del combustible diésel en Colombia reportada por la Unidad de Planeación del Ministerio de Minas y Energía (UPME, 2012). A fin de cumplir con ese nivel de mezcla es preciso incrementar la producción de aceite de palma y construir plantas procesadoras nuevas. El primer requisito se incluyó en el análisis al considerar los incrementos locales en la producción regional de palma de aceite. El segundo toma en consideración la construcción de plantas nuevas en cada

**Figura 1.** Ubicación de las plantas actuales de biodiésel.



región. Aunque no se definió el número total de plantas de biodiésel, se tomó en consideración la capacidad acumulada por región. El efecto de los cambios de las tasas de producción de diésel sobre los costos totales se analizó previamente e indica que, a una escala elevada de producción, los costos totales por litro permanecen iguales a tasas diferentes de producción.

### Descripción del sistema

En Colombia la palma de aceite crece en 20 departamentos divididos en cuatro regiones (Tabla 1). En este modelo se adoptó el supuesto de que los racimos de fruta fresca (RFF) cosechados en cada sitio se envían a las plantas locales de extracción de aceite a fin de evitar la degradación de los RFF. De acuerdo con los datos del DANE, cerca del 50 % del aceite crudo de palma producido en Colombia se utiliza en aplicaciones industriales, principalmente la producción

de biodiésel. De acuerdo con cálculos conservadores de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), se espera que la participación del consumo de aceite vegetal utilizado para la producción de biodiésel en el mundo alcance el 15 % en 2019 (OCDE-FAO, 2010). Sin embargo, para el caso colombiano, tomando en consideración las preocupaciones ambientales y las restricciones a la tasa de crecimiento de la siembra, es necesario que al menos el 50 % del aceite de palma se utilice para la producción de biodiésel. Esta restricción permite cumplir la meta requerida de B20 sin afectar la seguridad alimentaria. La parte restante se segmenta para producir distintas fracciones de valor agregado como oleínas y estearinas utilizadas en panadería, pastelería y producción de jabón después de un proceso de refinación (Arias *et al.*, 2008).

**Tabla 1.** Regiones para la producción de aceite de palma en Colombia.

Zona	Departamentos	Área total (Ha) (sembrada, plantaciones maduras e inmaduras)	Aceite de palma disponible para producir biodiésel (toneladas/año)
Norte	Magdalena, Cesar, Atlántico y Guajira	147.400	309.540
Central	Santander, Norte de Santander, Bolívar	103.700	217.770
Oriental	Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá	140.500	295.050
Suroccidental	Nariño	51.400	107.940
		<b>443.000</b>	<b>930.300</b>

**Fuente:** calculadas a partir de los datos reportados por Arias (2007).

El aceite crudo de palma utilizado para la producción de biodiésel se transporta por carro tanque a seis plantas ubicadas cerca de las regiones más productivas. De acuerdo con la capacidad de producción, estas plantas se clasificaron en plantas de producción mediana y alta (Tabla 2). En este proceso, el aceite de palma se convierte en biodiésel a través de una reacción de transesterificación con un catalizador básico (Fedebiocombustibles, 2012).

El biodiésel producido en cada una de las seis plantas existentes se transporta posteriormente en carro tanque y/o por poliductos hasta los mayoristas

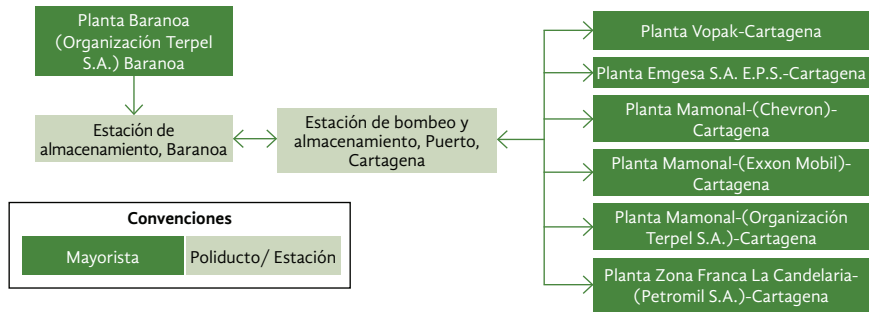
regionales (Figuras 2 y 3), solamente por los mayoristas que están suficientemente cerca de las estaciones de bombeo y almacenamiento quienes pueden recibir los suministros por ambas vías. Por otra parte, los mayoristas que no se encuentran próximos a estas estaciones de almacenamiento reciben el producto exclusivamente a través de carro tanques. El transporte por las redes de poliductos se limita a la mezcla B4 y los mayoristas se encargan de hacer las mezclas finales de biodiésel/diésel, de acuerdo con la reglamentación que rige actualmente en Colombia. En la actualidad hay 48 mayoristas autorizados para hacer mezclas B7 y B10 (Tabla 3).

**Tabla 2.** Plantas de biodiésel en operación en Colombia en 2012.

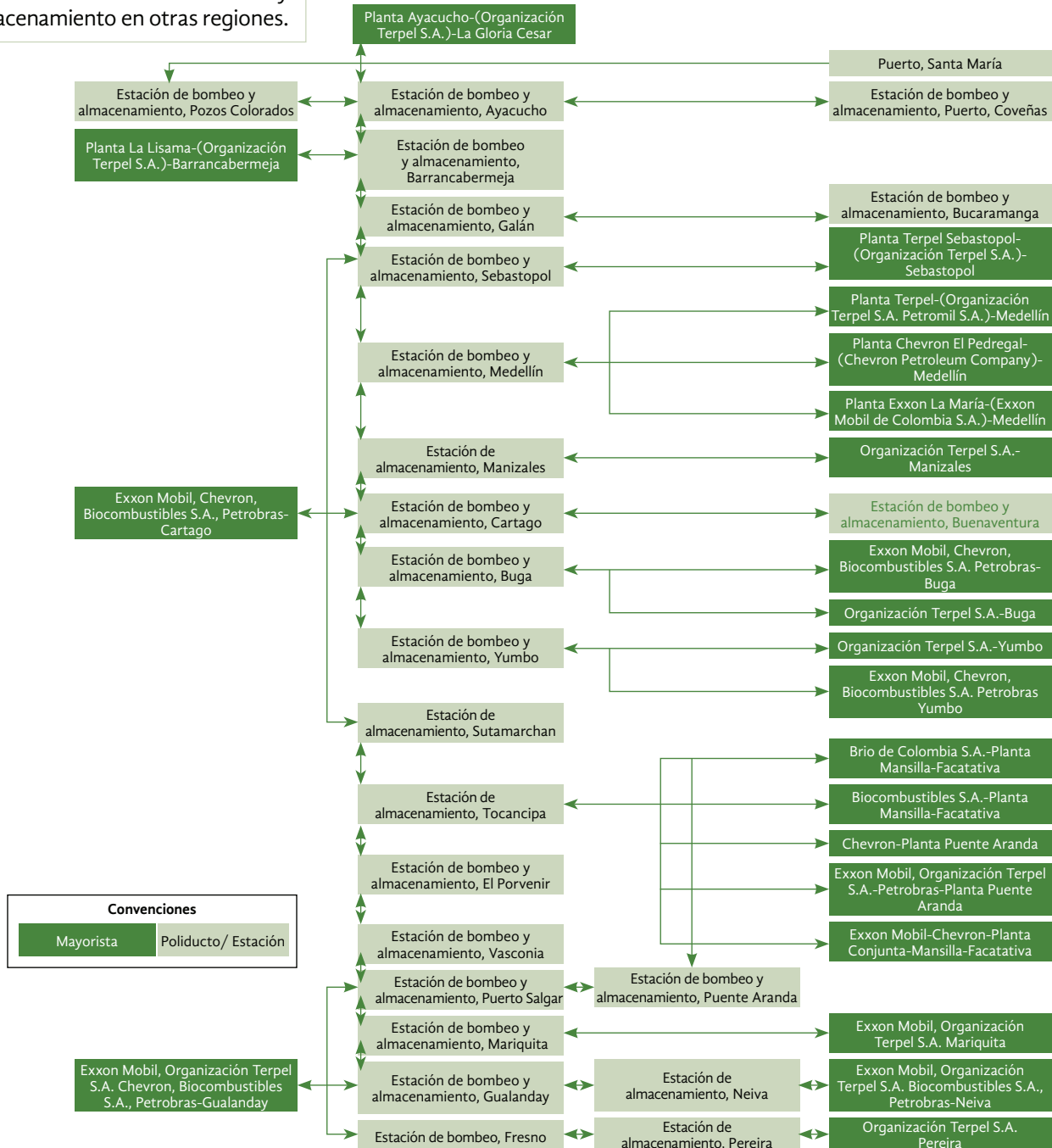
Zona	Empresa	Capacidad (millones L/año)	Capacidad de procesamiento
Norte, Codazzi	Oleoflores	60	Mediana
Norte, Santa Marta	Odin Energy	40	Mediana
Norte, Santa Marta	Biocombustibles Sostenibles del Caribe	100	Alta
Oriente, Facatativá	Bio D	100	Alta
Centro, Barrancabermeja	Eco diésel de Colombia	100	Alta
Oriente, San Carlos de Guaroa, Meta	Aceite Manuelita	100	Alta

**Fuente:** Fedebiocombustibles (2012).

**Figura 2.** Red de poliductos en Colombia y mayoristas más cercanos a las estaciones de bombeo y almacenamiento en la Región Norte.



**Figura 3.** Red de poliductos en Colombia y mayoristas más cercanos a las estaciones de bombeo y almacenamiento en otras regiones.



**Tabla 3.** Mayoristas de combustible autorizados en Colombia.

Mayorista	Departamento	Mezcla a 2012	Costo de transporte en carro tanque (USD/L)	Costo de transporte por poliducto B4 (USD/L)	Demanda de B20 millones L/año
Chevron - Planta Puente Aranda	Cundinamarca	B7	\$ 0,06	\$ 0,05	178,6
Exxonmobil - Organización Terpel Petrobras - Planta Puente Aranda	Cundinamarca	B7	\$ 0,06	\$ 0,05	178,6
Exxonmobil - Chevron Planta Conjunta - Mansilla	Cundinamarca	B7	\$ 0,06	\$ 0,05	178,6
Organización Terpel S.A. Planta San José del Guaviare	Guaviare	B7	\$ 0,06	\$ 0,00	178,6
Organización Terpel S.A. Planta Puerto Carreño	Vichada	B2	\$ 0,06	\$ 0,00	178,6
Organización Terpel S.A. Planta Puerto Inírida	Guainía	B2	\$ 0,06	\$ 0,00	178,6
Biocombustibles S.A. - Planta Mansilla	Cundinamarca	B7	\$ 0,06	\$ 0,05	178,6
Brio de Colombia S.A. - Planta Mansilla	Cundinamarca	B7	\$ 0,06	\$ 0,05	178,6
Organización Terpel S.A.	Valle	B10	\$ 0,09	\$ 0,05	142,9
Organización Terpel S.A.	Valle	B10	\$ 0,10	\$ 0,05	142,9
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A., Petrobras	Valle	B10	\$ 0,09	\$ 0,05	142,9
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A., Petrobras	Valle	B10	\$ 0,10	\$ 0,05	142,9
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A., Petrobras	Valle	B10	\$ 0,09	\$ 0,05	142,9
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A.	Valle	B10	\$ 0,12	\$ 0,05	142,9
Organización Terpel S.A.	Risaralda	B10	\$ 0,10	\$ 0,05	95,3
Organización Terpel S.A.	Caldas	B10	\$ 0,09	\$ 0,05	95,3
Planta Chevron el Pedregal (Chevron Petroleum Company)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Exxon La María (Exxon Mobil de Colombia S.A.)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Terpel (Organización Terpel S.A. - Petromil S.A.)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Terpel - (Organización Terpel S.A.)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Terpel La Pintada (Organización Terpel S.A.)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Zeuss - (Zeuss Petroleum S.A.)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Turbo (Zapata y Velásquez)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Turbo (Proxxon)	Antioquia	B10	\$ 0,09	\$ 0,04	71,4
Planta Terpel Sebastopol (Organización Terpel S.A.)	Santander	B10	\$ 0,06	\$ 0,02	114,3

**Continuación Tabla 3.** Mayoristas de combustible autorizados en Colombia.

Mayorista	Departamento	Mezcla a 2012	Costo de transporte en carrotanque (USD/L)	Costo de transporte por poliducto B4 (USD/L)	Demanda de B20 millones L/año
Planta Exxon Girón - (ExxonMobil)	Santander	B10	\$ 0,06	\$ 0,02	114,3
Planta Chimita (Organización Terpel S.A.)	Santander	B10	\$ 0,06	\$ 0,02	114,3
Planta Ayacucho (Organización Terpel S.A.)	Cesar	B10	\$ 0,06	\$ 0,00	114,3
Planta La Lisama (Organización Terpel S.A.)	Santander	B10	\$ 0,06	\$ 0,02	114,3
Organización Terpel S.A.	Putumayo	B10	\$ 0,06	\$ 0,00	57,2
Exxon Mobil, Organización Terpel S.A. Biocombustibles S.A., Petrobras	Huila	B10	\$ 0,07	\$ 0,05	57,2
Exxon Mobil, Organización Terpel S.A., Chevron, Biocombustibles S.A., Petrobras	Tolima	B10	\$ 0,06	\$ 0,04	57,2
Exxon Mobil, Organización Terpel S.A.	Tolima	B10	\$ 0,07	\$ 0,04	57,2
Organización Terpel S.A.	Caquetá	B10	\$ 0,06	\$ 0,00	57,2
Planta Vopak	Bolívar	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3
Planta Emgesa S.A. E.S.P.	Bolívar	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3
Planta Mamonal - (Chevron)	Bolívar	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3
Planta Galapa - (Chevron)	Atlántico	B10	\$ 0,04	\$ 0,01	95,3
Planta El Arenal - (Chevron)	San Andrés Islas	B10	\$ 0,06	\$ 0,00	95,3
Planta Siape	Atlántico	B10	\$ 0,04	\$ 0,01	95,3
Planta Panamá Canal Oil & Bunkers S.A. (Ecospetróleo)	Atlántico	B10	\$ 0,04	\$ 0,01	95,3
Planta Galapa - (Exxon Mobil)	Atlántico	B10	\$ 0,04	\$ 0,01	95,3
Planta Mamonal - (Exxon Mobil)	Bolívar	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3
Planta Baranoa (Organización Terpel S.A.)	Atlántico	B10	\$ 0,04	\$ 0,01	95,3
Planta Magangué (Organización Terpel S.A.)	Bolívar	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3
Planta Mamonal (Organización Terpel S.A.)	Bolívar	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3
Planta Palermo	Magdalena	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3
Planta Zona Franca La Candelaria (Petromil S.A.)	Bolívar	B10	\$ 0,05	\$ 0,01	95,3

**Fuente:** Resoluciones 180294, 181604, 180113, 180368. Ministerio de Minas y Energía.



## Clusters de demanda

Este modelo considera la meta de expansión de la mezcla B20 en Colombia en 2020. El potencial de la demanda de la mezcla B20 se calculó para cada uno de los departamentos de Colombia de acuerdo con las proyecciones de la demanda de diésel de la UPME (UPME, 2012), (Tabla 4).

## Potencial de plantas nuevas y ubicación de las plantas de biodiésel

La meta de la expansión de la producción de biodiésel para cubrir la mezcla B20 en todo el país requiere plantas adicionales de producción al igual

que nuevos cultivos de palma de aceite. Se consideró el potencial requerido, incluyendo proveedores adicionales (POR1, POR2, POR3 y POR4) y plantas adicionales de biodiésel (BPR1, BPR2, BPR3 y BPR4). Así, POR1 y BPR1 corresponden a la Zona Norte; POR2 y BPR2 a la Zona Central; POR3 y BPR3 a la Zona Oriental, y POR4 y BPR4 a la Zona Occidental. Se tomó el supuesto de que los nuevos proveedores cubrirán la demanda adicional no satisfecha por los productores actuales de aceite de palma y biodiésel. Además, los resultados obtenidos permitieron definir la posible ubicación de las nuevas instalaciones de producción encaminadas a reducir los costos totales de producción y las emisiones derivadas del transporte.

**Tabla 4.** Demanda de biodiésel y B20 en Colombia en 2020.

Departamento	Diésel (Millones L)	B20 (Millones L)
Antioquia	1.428,84	285,77
Chocó	1.428,84	285,77
Córdoba	1.020,60	204,12
Sucre	1.020,60	204,12
Bolívar	1.020,60	204,12
Atlántico	1.020,60	204,12
Magdalena	1.020,60	204,12
Cesar	1.020,60	204,12
La Guajira	1.020,60	204,12
Bogotá	1.428,84	285,77
Cundinamarca	1.428,84	285,77
Boyacá	1.428,84	285,77
Meta	1.428,84	285,77
Casanare	1.428,84	285,77
Tolima	476,28	95,26
Huila	476,28	95,26
Caquetá	476,28	95,26
Caldas	476,28	95,26
Quindío	476,28	95,26
Risaralda	476,28	95,26
Santander	952,56	190,51
Norte de Santander	952,56	190,51
Arauca	952,56	190,51
Valle	1.071,63	214,33
Cauca	1.071,63	214,33
Nariño	1.071,63	214,33
Putumayo	1.071,63	214,33
Otros departamentos	23,81	4,76

## Costos de producción y transporte

Los precios del aceite de palma y del biodiésel están sujetos a la regulación del mercado y la reglamentación del Gobierno. Los valores cambian de acuerdo con factores externos tales como las condiciones del mercado o los precios internacionales del petróleo. Para este estudio se calculó el costo mínimo de producción en toda la cadena de abastecimiento del biodiésel. Por consiguiente, se consideraron los costos de producción y transporte del aceite de palma y del biodiésel en lugar de los precios del mercado nacional.

### Costo del aceite de palma

Los costos de producción del aceite de palma, conforme al supuesto antes mencionado de la producción en las mismas regiones, se calcularon con base en valores proporcionados por Duarte Guterman y Cía. Ltda. (2009). El cálculo se realizó considerando los costos asociados a la etapa de cultivo y el proceso de extracción. Adicionalmente, se tuvieron en cuenta los ingresos por concepto de la venta de aceite de palmiste, un subproducto del aceite de palma, como crédito para calcular el costo final del aceite de palma (Tabla 5).

### Producción y costo del biodiésel

Los costos de producción del biodiésel se calcularon de acuerdo con las variaciones de los costos de producción entre las regiones y utilizando una simula-

ción del proceso químico a fin de calcular las tasas de producción y los costos de capital, fijos y variables.

La simulación de la producción de biodiésel a partir del aceite de palma se realizó con el paquete *Aspen plus v. 8.0* (Aspen Technology, Inc., EE.UU.). Se simuló considerando una alta capacidad de producción, aproximadamente 100.000 L/año. El modelamiento se hizo tomando el aceite de palma como un conjunto de pseudocomponentes, creado para representar los triglicéridos y los ésteres de metilo, de conformidad con la metodología de Chang y Liu (Chang & Liu, 2009). Las propiedades fisicoquímicas de los pseudocomponentes se calcularon por medio del Método de Marrero y Gani (Marrero & Gani, 2001). Adicionalmente se usaron como métodos base para las simulaciones el *UNIFAC Dortmund* para la fase líquida, *Soave Redlich Kwong* con la modificación de Bosto Mathias para la fase de vapor y entalpía del agua calculada con las tablas de vapor NBS. El modelo cinético para la catálisis básica fue reportado por Granjo *et al.*, (2009), como una expresión de segundo orden. Se muestran los principales resultados hallados durante el proceso de simulación (Tabla 6). Con estos valores fue posible calcular los costos de producción.

El costo de producción del biodiésel se calculó mediante el paquete *Icarus Process Evaluator* de Aspen (Aspen Technology, Inc., EE.UU.). Este análisis se realizó con base en la información de diseño suministrada por Aspen Plus, bajo las condiciones económicas de Colombia (tasa de interés anual de 17 % y tasa impositiva de 33 %). Se consideró un método de depre-

**Tabla 5.** Costos de producción de la palma de aceite y de la extracción del aceite de palma. Adaptada de: Duarte Guterman y Cía. Ltda. (2009).

	Zona Oriental	Zona Centro	Zona Suroccidental	Zona Norte	Promedio Nacional
Costos fijos de cultivo	\$ 175,60	\$ 187,63	\$ 174,77	\$ 180,30	\$ 179,58
Costos variables de cultivo	\$ 254,47	\$ 271,90	\$ 253,27	\$ 261,28	\$ 260,23
Costos de extracción	\$ 93,66	\$ 100,07	\$ 93,21	\$ 96,16	\$ 95,78
Costos generales y administrativos	\$ 92,42	\$ 98,75	\$ 91,99	\$ 94,90	\$ 94,52
Crédito por venta de aceite de palmiste	-\$ 62,52	-\$ 60,80	-\$ 41,00	-\$ 56,79	-\$ 55,28
<b>Total (USD/t)</b>	<b>\$ 553,63</b>	<b>\$ 597,56</b>	<b>\$ 572,24</b>	<b>\$ 575,86</b>	<b>\$ 574,82</b>

**Tabla 6.** Balances de masa y energía de la producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma, capacidad 100 millones L/año.

<b>Materiales (Kg/h)</b>	
Aceite crudo	12.407,38
Contenido de ácidos grasos libres (% peso)	6,00
Metanol	1.987,80
NaOH	116,63
H <sub>2</sub> O	17.370,33
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	250,56
<b>Energía (electricidad, kW)</b>	
Bomba alimentadora para el metanol	0,17
Bomba alimentadora para el aceite	2,32
Recirculación del metanol	0,12
Bomba para el proceso de separación	2,38
Reactores	1,86
Electricidad total	6,86
<b>Energía (térmica, MW)</b>	
Calefacción	329,86
Enfriamiento	489,33
<b>Productos (Kg/h)</b>	
Biodiesel @ >99% peso	12.500,00
Glicerol @ >88% peso	1.402,66
Agua de desecho	12.543,19
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	132,06

ciación de línea recta con un período de análisis de 12 años. Para los precios de las materias primas y los reactivos se utilizaron los valores internacionales reportados por ICIS (precios ICIS, 2010, 2011, 2012). Los cargos operativos como los costos de mano de obra de operarios y supervisores se fijaron en 2,14 USD/h y 4,29 USD/h, respectivamente. Los costos de energía, agua potable, presión de vapor alta y baja se establecieron en 0,0304 USD/kWh,

1,25 USD/m<sup>3</sup> y 8,18 USD/t, respectivamente. Los costos de producción por litro de biodiésel se calcularon de acuerdo con los costos del aceite de palma reportados anteriormente para cada región en particular (Tabla 7). Los análisis adicionales a distintas capacidades de producción no revelaron diferencias mayores con respecto a los costos totales de producción a esta escala por cambios en los costos de capital y de servicios públicos.

**Tabla 7.** Costos de producción del biodiésel en las diferentes regiones, capacidad de las plantas 100 millones L/año.

	<b>Zona Oriental</b>	<b>Zona Central</b>	<b>Zona Suroccidental</b>	<b>Zona Norte</b>	<b>Promedio nacional</b>
Costo de las materias primas	\$ 0,463	\$ 0,499	\$ 0,479	\$ 0,482	\$ 0,481
Costo total de servicios públicos	\$ 0,029	\$ 0,029	\$ 0,029	\$ 0,029	\$ 0,029
Mano de obra operativa	\$ 0,010	\$ 0,010	\$ 0,010	\$ 0,010	\$ 0,010

**Continuación Tabla 7.** Costos de producción del biodiésel en las diferentes regiones, capacidad de las plantas 100 millones L/año.

	Zona Oriental	Zona Central	Zona Suroccidental	Zona Norte	Promedio nacional
Mantenimiento	\$ 0,019	\$ 0,019	\$ 0,019	\$ 0,019	\$ 0,019
Cargos operativos	\$ 0,003	\$ 0,003	\$ 0,003	\$ 0,003	\$ 0,003
Gastos generales de planta	\$ 0,015	\$ 0,015	\$ 0,015	\$ 0,015	\$ 0,015
Costos generales y administrativos	\$ 0,056	\$ 0,060	\$ 0,058	\$ 0,058	\$ 0,058
Costos operativos totales	\$ 0,595	\$ 0,635	\$ 0,613	\$ 0,617	\$ 0,615
Costo total de capital del proyecto	\$ 0,046	\$ 0,046	\$ 0,046	\$ 0,046	\$ 0,046
Costos totales de producción (USD/L)	\$ 0,641	\$ 0,681	\$ 0,659	\$ 0,663	\$ 0,661

### Costos de transporte

Este modelo considera el transporte desde los puntos de producción del aceite de palma y las plantas de biodiésel hasta los mayoristas. Los primeros valores se calcularon con base en las distancias por carretera entre cada capital de departamento y la ubicación de las plantas de biodiésel (Tabla 8). Se tomó el supuesto de que las distancias desde la plantación hasta la planta

de extracción son muy cortas (Tabla 9). Los segundos se calcularon con base en las distancias por carretera entre las plantas de biodiésel y los mayoristas. Con respecto a los costos del transporte para el aceite de palma se calculó el valor unitario de 0,025 USD por tonelada por kilómetro, de conformidad con los datos de Fedepalma. Los valores para el costo del transporte de biodiésel en Colombia se establecen por departamentos en las resoluciones 180294 y 181604 (Tabla 3).

**Tabla 8.** Distancias desde los departamentos productores hasta las plantas de biodiésel (km).

	Oleoflores	Odin Energy	Biocombustibles del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Magdalena	435	10	10	944	535	1.188	435	535	2.026	1.578
Cesar	10	435	435	878	470	1.123	10	470	1.962	1.513
Atlántico	299	102	102	990	582	1.231	299	582	2.073	1.492
La Guajira	215	171	171	1.089	681	1.334	215	681	2.173	1.724
Santander	470	535	535	407	10	653	470	10	1.314	1.142
Norte de Santander	673	738	738	610	204	855	673	204	1.271	1.342
Bolívar	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429
Meta	1.123	1.188	1.188	117	653	10	1.123	653	843	857
Cundinamarca	878	944	944	10	407	117	878	407	956	766
Casanare	947	1.013	1.013	336	477	265	947	477	754	1.094

**Continuación Tabla 8.** Distancias desde los departamentos productores hasta las plantas de biodiésel (km).

	Oleoflores	Odin Energy	Biocombustibles del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Caquetá	1.322	1.388	1.388	535	949	887	1.322	949	1.725	414
Nariño	1.513	1.578	1.578	766	1.142	857	1.513	1.142	1.697	10
POR1	10	435	435	878	470	1.123	10	470	1.962	1.513
POR2	878	944	944	10	407	117	878	407	956	766
POR3	947	1.013	1.013	336	477	265	947	477	754	1.094
POR4	1.513	1.578	1.578	766	1.142	857	1.513	1.142	1.697	10

**Tabla 9.** Distancias desde las plantas de producción de biodiésel hasta los mayoristas (km).

	Oleoflores	Odin Energy	Biocom. del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Crevron-Planta Puente Aranda	878	944	944	10	407	117	878	407	956	766
Exxon Mobil-Organización Terpel-Petrobras-Planta Puente Aranda	878	944	944	10	407	117	878	407	956	766
Exxon Mobil-Chevron-Planta Conjunta-Mansilla	878	944	944	10	407	117	878	407	956	766
Organización Terpel S.A.-Planta San José del Guaviare	1.272	1.337	1.337	393	802	285	1.272	802	1.124	1.134
Organización Terpel S.A.-Planta Puerto Carreño	947	1.013	1.013	336	477	265	947	477	754	1.094
Organización Terpel S.A.-Planta Puerto Inírida	1.962	2.026	2.026	956	1.314	843	1.962	2.026	500	1.697
Biocombustibles S.A.-Planta Mansilla	878	944	944	10	407	117	878	407	956	766
Brio de Colombia S.A.-Planta Mansilla	878	944	944	10	407	117	878	407	956	766
Organización Terpel S.A.	1.070	1.135	1.135	391	696	742	1.070	696	1.581	441
Organización Terpel S.A.	1.126	1.185	1.185	441	746	792	1.120	745	1.631	491
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A., Petrobras	1.070	1.135	1.135	391	696	742	1.070	696	1.581	441
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A., Petrobras	1.126	1.185	1.185	441	746	792	1.120	746	1.631	491
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A., Petrobras	1.126	1.235	1.235	491	796	842	1.170	796	1.681	541
Exxon Mobil, Chevron, Biocombustibles S.A.	1.180	1.289	1.289	545	850	896	1.224	850	1.735	595
Organización Terpel S.A.	932	998	998	319	599	671	932	559	1.443	581
Organización Terpel S.A.	893	946	946	295	507	631	893	507	1.292	633

**Continuación Tabla 9.** Distancias desde las plantas de producción de biodiésel hasta los mayoristas (km).

	Oleoflores	Odin Energy	Biocom. del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Planta Chevron el Pedregal (Chevron Petroleum Company)	768	786	786	435	395	770	768	395	1.609	794
Planta Exxon La María (Exxon Mobil de Colombia S.A.)	768	786	786	435	395	770	768	395	1.609	794
Planta Terpel (Organización Terpel S.A.- Petromil S.A.)	768	786	786	435	395	770	768	395	1.609	794
Planta Terpel (Organización Terpel S.A.)	802	820	820	469	429	804	802	429	1.643	828
Planta Terpel La Pintada (Organización Terpel S.A.)	846	864	864	513	473	848	846	473	1.687	872
Planta Zeuss (Zeuss Petroleum S.A.)	768	786	786	435	395	770	768	395	1.609	794
Planta Turbo (Zapata y Velásquez)	615	619	619	867	827	1.263	615	827	2.102	1.175
Planta Turbo (Proxxon)	615	619	619	867	827	1.263	615	827	2.102	1.175
Planta Terpel Sebastopol (Organización Terpel S.A.)	470	535	535	407	10	653	470	10	1.314	1.142
Planta Exxon Girón (Exxon Mobil)	470	535	535	407	10	653	470	10	1.314	1.142
Planta Chimita (Organización Terpel S.A.)	470	535	535	407	10	653	470	10	1.314	1.142
Planta Ayacucho (Organización Terpel S.A.)	10	435	435	878	470	1.123	10	470	1.962	1.513
Planta La Lisama (Organización Terpel S.A.)	470	535	535	407	10	653	470	10	1.314	1.142
Organización Terpel S.A.	1.493	1.558	1.558	705	1.119	1.057	1.493	1.119	1.896	213
Exxon Mobil, Organización Terpel S.A. Biocombustibles S.A. Petrobras	1.066	1.131	1.131	301	706	653	1.066	706	653	462
Exxon Mobil, Organización Terpel S.A., Chevron, Biocombustibles S.A. Petrobras	764	830	830	180	391	516	764	391	1.177	748
Exxon Mobil, Organización Terpel S.A.	764	830	830	180	391	516	764	394	1.177	748
Organización Terpel S.A.	1.322	1.388	1.388	535	949	887	1.322	949	1.725	414
Planta Vopal	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429
Planta Emgesa S.A.-E.S.P.	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429
Planta Mamonal- (Chevron)	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429
Planta Galapa-(Chevron)	299	102	102	990	582	1.234	299	582	2.073	1.492
Planta el Arenal-(Chevron)	950	829	829	1.220	700	600	950	2.000	2.500	3.00
Planta Siape	299	102	102	990	582	1.234	299	582	2.073	1.492
Planta Panamá Canal Oil & Bunkers S.A. (Ecospetróleo)	299	102	102	990	582	1.234	299	582	2.073	1.492

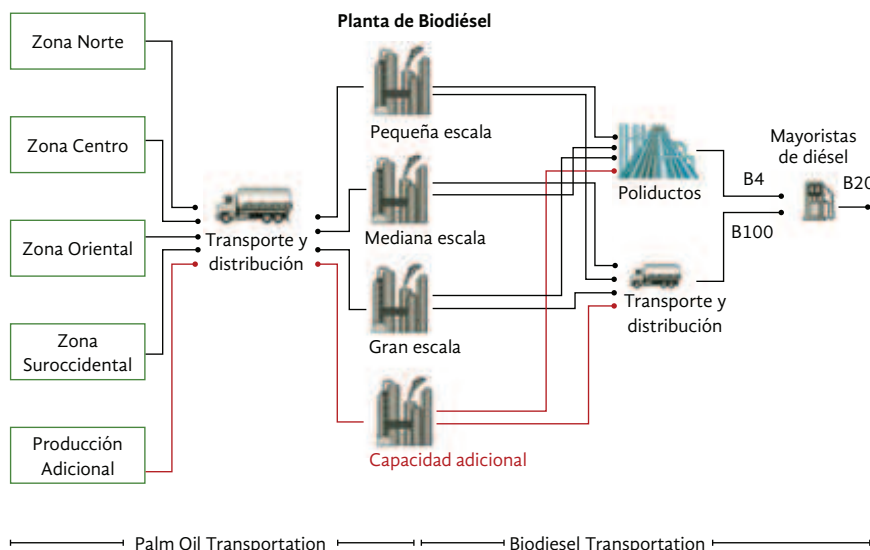
**Continuación Tabla 9.** Distancias desde las plantas de producción de biodiésel hasta los mayoristas (km).

	Oleoflores	Odin Energy	Biocom. del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Planta Galapa-(Exxon Mobil)	299	102	102	990	582	1.234	299	582	2.073	1.492
Planta Mamonal (Exxon Mobil)	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429
Planta Baranoa (Organización Terpel S.A.)	299	102	102	990	582	1.234	299	582	2.073	1.492
Planta Magangué (Organización Terpel S.A.)	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429
Planta Mamonal (Organización Terpel S.A.)	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429
Planta Palermo	435	10	10	990	535	1.188	435	535	2.026	1.578
Planta Zona Franca La Candelaria-(Petromil S.A.)	366	233	233	1.057	649	1.302	366	649	2.141	1.429

### Modelamiento matemático

El objetivo del modelamiento fue encontrar una estrategia de bajo costo para abastecer la demanda de biodiésel de los mayoristas autorizados en Colombia de acuerdo con una proyección de la demanda al nivel de la mezcla B20. Este modelo también permite calcular las necesidades de producción adicional de aceite de palma en cada región y las plantas adicionales de biodiésel o las capacidades requeridas para cubrir la demanda de la mezcla B20. Además, el efecto de las emisiones derivadas del transporte. El problema se representó en un diagrama simplificado del sistema (Figura 4).

Se desarrolló un modelo de programación no lineal para minimizar el costo total del sistema y las emisiones para la cadena de abastecimiento. Por tanto, se puede clasificar como un Problema Matemático Multiobjetivo (PMM). Este modelo tiene como variable de decisión del flujo de material para cada ruta. El análisis se efectuó considerando que el aceite de palma se transporta primero desde los puntos de producción hasta las plantas de biodiésel y después hasta los mayoristas. Las funciones objetivo tienen como finalidad minimizar el costo total pagado por los mayoristas y las emisiones totales en toda la cadena de abastecimiento del biodiésel. Debido a la magnitud



**Figura 4.** Esquema simplificado del problema de optimización.

de las funciones de los costos y de las emisiones, para resolver el PMM se utilizó el método de *e*-restricción (Chankong & Haimes, 1983). La función de las emisiones se escogió para optimizar, mientras que la de los costos se escogió para restringir. Así, la función objetivo (Ec. (1)) es: Minimizar Femisión (1).

Ecuación 1.

### Minimizar Femisión

El costo total del sistema se representa mediante la ecuación Fcosto (2) y las emisiones del transporte se consideran en la ecuación de Femisión (4). La primera ecuación es una función de los costos totales pagados por los mayoristas por la producción del biodiésel (Ec. (3)) y el transporte en carrotanque o por poliducto. Por otro lado, las emisiones derivadas del transporte comprenden las emisiones del transporte del aceite de palma a la planta de biodiésel, y del biodiésel hasta los mayoristas en carrotanque o por poliducto (Ec. (4)). Esta última función depende de la distancia recorrida, el flujo del biodiésel transportado, el tipo de carga y el factor de emisión del combustible usado. Las ecuaciones (5) y (9) corresponden a las restricciones del modelo para la función objetivo de costo, la oferta de aceite de palma, la capacidad de las plantas de biodiésel, la relación de producción de biodiésel y la demanda de biodiésel, respectivamente.

Ecuación 2.

$$Fcost = \sum_j \sum_k (CostBio_j \cdot (X2_{jk} + 0.004 \cdot Y_{jk} \cdot Fp_k) + C2_{jk} \cdot X2_{jk} + Y_{jk} \cdot Fp_k \cdot Cpol_{jk})$$

donde

Ecuación 3.

$$CostBio_j = \frac{\sum_i (CostRM_i + C1_{ij}) X1_{ij} + ProdCost_j}{1140 \cdot X1_{ij}}$$

Ecuación 4.

$$Femission = \sum_i \sum_j (D1_{ij} \cdot X1_{ij} \cdot EETT \cdot FETT) + \sum_j \sum_k (D2_{jk} \cdot X2_{jk} \cdot EETT \cdot EFTT + Y_{jk} \cdot EFP)$$

Este modelo está sujeto a las restricciones siguientes:

*e*-restricción

Ecuación 5.

$$Fcost \leq e$$

Oferta de aceite de palma

Ecuación 6.

$$\sum_j X1_{ij} \geq Produ_i$$

Capacidad de la planta de biodiésel

Ecuación 7.

$$\sum_k (X2_{jk} + 0.004 \cdot Y_{jk} \cdot Fp_k) \leq Capacity_j$$

Relación de producción del biodiésel

Ecuación 8.

$$0.00114 \cdot \sum_i X1_{ij} - \sum_k (X2_{jk} + 0.04 \cdot Y_{jk} \cdot Fp_k) = 0$$

Demanda de biodiésel

Ecuación 9.

$$\sum_k (X2_{jk} + 0.04 \cdot Y_{jk} \cdot Fp_k) - Demand_k = 0$$

El modelo de optimización se implementó por medio del instrumento GAMS. El Sistema General de Modelamiento Algebraico (GAMS, por sus siglas en inglés) es un sistema de modelamiento de alto nivel para optimización a gran escala (Papapostolou *et al.*, 2011). Los parámetros utilizados en las ecuaciones de optimización se describen a continuación (Tabla 10).

## Resultados y discusión

Se obtuvieron dos tipos de resultados: el primero fue el problema de la optimización, el cual permite conocer las condiciones óptimas para la expansión. El segundo se relaciona con las implicaciones de la expansión, tomando en consideración el CUT.

### Resultados de la optimización

Primero se calculó una tabla de réditos al determinar el óptimo individual de las funciones objetivo. Se utilizó un método de optimización lexicográfica aplicando el procedimiento propuesto por Mavrotas



**Tabla 10.** Parámetros del modelo.

Símbolo	Descripción	Unidad
$F_{cost}$	Función del costo total (costo final pagado por los mayoristas)	USD/año
$F_{emision}$	Emisiones derivadas del transporte para mover el aceite de palma y el biodiésel	KgCO <sub>2</sub> eq/año
$CostBio_j$	Costo total de producción por litro de biodiésel en la planta $j$	USD/L
$CosrRm_i$	Costo del aceite de palma por tonelada desde el productor $i$	USD/t
$ProdCost_j$	Costo de producción del biodiésel en la planta $j$ (cargos operativos, costos de capital y administrativos)	USD/t
$C1_{ij}$	Costo de transporte del aceite de palma desde el productor $i$ hasta la planta $j$ por medio de carrotanque	USD/t
$C2_{jk}$	Costo del transporte del biodiésel desde la planta $j$ hasta el mayorista $k$ en carrotanque	USD/L
$Cpol_{jk}$	Costo del transporte del biodiésel desde la planta $j$ hasta el mayorista $k$ a través del poliducto	
$FP_k$	Factor de acceso al poliducto para mayoristas (0,1)	
$X1ij$	Flujo de aceite de palma desde el productor $i$ hasta la planta $j$	Toneladas/años
$X2jk$	Flujo de biodiésel desde la planta $j$ hasta el mayorista $k$ en forma de B100 transportado en carrotanque	Millones L/año
$Y_{jk}$	Flujo de biodiésel desde la planta $j$ hasta el mayorista en forma de B4 transportado por poliducto	Millones L/año
$D1ij$	Distancia desde el productor $i$ hasta la planta $j$	Km
$D2_{jk}$	Distancia desde el productor $j$ a la planta $k$	Km
$EFIT$	Factores de emisión del carrotanque	KgCO <sub>2</sub> eq/MJ
$FETT$	Eficiencia del combustible del carrotanque	MJ/t Km
$EFP$	Factores de emisión del poliducto	KgCO <sub>2</sub> eq/L
$Produ_i$	Oferta de aceite de palma del productor $i$	Toneladas/año
$Capacidad_j$	Capacidad de producción de la planta de producción de biodiésel $j$	Millones L/año
$e$	Valor e-restricción	USD/año
$Demanda_k$	Demanda de biodiésel de parte del mayorista $k$	Millones L/año

(2009). Se determinaron los valores óptimos de  $F_{emision} = 1,59e8$  y  $F_{cost} = 3,67e9$  (Tabla 10).

El método de e-restricción es un método de generación utilizado para resolver problemas de PMM de tamaño mediano y pequeño a fin de proporcionar un subconjunto representativo del conjunto eficiente de problemas. El propósito de este método es optimizar una de las funciones objetivo, utilizando las demás funciones objetivo como restricción. Aplicando este método se garantiza la eficiencia de la solución obtenida (Chankong & Haimes, 1983). Una de las mejores opciones para resolver un pro-

blema de PMM con el método de e-restricción es utilizando la optimización lexicográfica, donde se optimiza la primera función objetivo y después, entre las posibles alternativas óptimas, se optimiza la segunda función objetivo, y así sucesivamente. Una explicación muy práctica de este procedimiento se encuentra en Mavrotas (2009).

La optimización económica se relaciona con el rendimiento de la extracción del aceite y de la producción de biodiésel (Tablas 5-7). Tomando las proyecciones de la mezcla B20 se hallaron los flujos y los destinos óptimos del aceite de palma para la produc-

ción de biodiésel (Tabla 11). Por ejemplo, los resultados indican que el aceite de palma producido en el futuro en Magdalena, debería destinarse a las plantas de Odin Energy, Biocombustibles del Caribe y BPR1 (Tabla 12). Esta configuración permitiría obtener un mínimo tanto para los costos de producción como para las emisiones. Es importante destacar que las capacidades de las plantas se mantuvieron constantes durante el análisis.

Con respecto a la producción de biodiésel, el problema de optimización determinó que el incremento total requerido para suplir una demanda

nacional de B20 equivale aproximadamente a diez veces el nivel de producción actual. En efecto, las capacidades actuales de las plantas en todas las regiones se deberían complementar ya sea con plantas nuevas o con un aumento de la capacidad de producción. Además, los valores requeridos de expansión de la producción de aceite de palma son relativamente uniformes en todas las zonas. Eso indica que las zonas productivas deben crecer en la misma proporción. Así, las perspectivas más prometedoras para el crecimiento de la producción de biodiésel se encontraron en Santander, Cesar y Nariño según los resultados obtenidos de la optimización.

**Tabla 11.** Tabla de réditos del óptimo individual de las funciones objetivas.

	Femision	Fcost
Femision Min	157E + 08	367E + 09
Fcost Min	681E + 08	373E + 09

**Tabla 12.** Condiciones para la expansión de la producción de biodiésel (t/año) "X1".

	Oleoflores	Odin Energy	Biocom. del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Magdalena		35.886	87.719				7.912			
Cesar	26.788						105.152			
Atlántico	23.055									
La Guajira							23.029			
Santander					87.719			334.473		
Norte de Santander								25.552		
Bolívar							60.436			
Meta				9.176		99.684			42.100	
Cundinamarca								60.211		
Casanare									60.795	
Caquetá										23.084
Nariño										107.940
POR1							899.963			
POR2				78.543				676.255		
POR3									754.798	
POR4										965.467

La distribución del biodiésel a los mayoristas por medio de carrotaque y de la red de poliductos se presenta en las Tablas 13 y 14. Los resultados indican que la mayor parte del biodiésel producido se debería transportar a través de poliductos y no en carrotaque. Esto se puede explicar en parte porque los costos del transporte generados por el uso de las redes de poliductos son menores que los generados por los carrotaques.

Además, las emisiones generadas por el transporte a través de poliducto son menores. Sin embargo, la red de poliductos no llega a todos los mayoristas (Figuras 1 y 2). Por otro lado, el volumen transportado por poliducto es mayor, porque se puede transportar solamente una mezcla máxima de B4. Por consiguiente, una parte importante de la producción de biodiésel aún deberá ser transportada en carrotaque como B100.

**Tabla 13.** Biodiésel transportado en carrotaque como B100 (millones de litros/año) “X2”.

	Oleoflores	Odin Energy	Biocom. del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Terpel-San José				64,97		113,64				
Terpel Puerto Carreño				35,03				143,58		
Terpel Puerto Inírida									178,61	
Terpel Río Negro								71,44		
Terpel La Pintada								71,44		
Zeuss-Preroleum-Girardota								71,44		
Zapata-Velásquez-Turbo							71,44			
Proxxon-Turbo							71,44			
Terpel Cimitarra								114,31		
Exxon Mobil Girón								114,31		
Terpel-Girón								114,31		
Terpel Puerto Asís										57,15
Terpel-Florenia										57,15
Chevron El Arenal					95,26					
Exxon Mobil Galapa		95,26								
Terpel Magangué	40,91	4,74				49,61	49,61			

**Tabla 14.** Biodiésel transportado por poliducto como B4 (millones de litros/año) “Y2”

	Oleoflores	BioD	Ecodiesel	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Chevron-Bogotá					972,23	31,02	3.462,00
Exxon Mobil-Terpel-Petrobras-Bogotá				1,352,60	2.620,18		492,47
Exxon Mobil-Chevron-Conjunta-Mansilla-Estación de bombeo y almacenamiento Facatativá					2.010,80	848,77	1.605,68
Biocombustibles-Estación de bombeo y almacenamiento Facatativá	539,53			1.982,44			1,943,28
Brio de Colombia-Estación de bombeo y almacenamiento Facatativá					2.609,56	1.855,69	
Terpel-Buga							3.572,00
Terpel-Yumbo				3.572,00			
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Petrobras-Buga					3.572,00		
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Petrobras-Yumbo							3.572,00
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Petrobras-Cartago	354,33				811,00		2.406,67
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Buenaventura	396,43					795,90	2.406,67
Terpel-Pereira						2.381,50	
Terpel-Manizales	13,45					523,57	1.844,48
Chevron-Medellín						1.786,0	
Exxon Mobil-Medellín				393,81			1.392,19
Terpel-Petromil-Medellín				393,81			1.392,19
Terpel-La Gloria-Ayacucho						2.857,75	
Terpel-Barrancabermeja						2.857,75	
Exxon Mobil-Terpel-Biocombustibles-Petrobras-Neiva	143,76				323,68		961,31
Exxon Mobil-Terpel-Chevron-Biocombustibles-Petrobras-Gualanday							1,428,75
Exxon Mobil-Terpel-Mariquita							1,428,75
Vopak-Cartagena			1.884,00		479,50		
Emgesa-Cartagena			2.381,50				
Chevron-Cartagena					2.381,50		
Chevron-Galapa			2.381,50				
Siape-Barranquilla			2.381,50				
Ecospetroleo-Barranquilla			118,50	969,13	809,80		484,07
Exxon Mobil-Cartagena				2.381,50			
Terpel-Baranoa				2.381,50			
Terpel-Cartagena						2.381,50	
Palermo-Sitio-Nuevo				2.381,50			
Petromil-Cartagena				1.600,96		780,54	

En condiciones óptimas, los costos oscilan entre \$ 0,53 y 0,69 USD/L (Tabla 15). Estos costos son similares comparativamente con base en el promedio nacional actual de los costos (\$ 0,66 USD/L). Estos resultados concuerdan con el análisis previo porque, al parecer, a las escalas de producción consideradas en este trabajo, la economía de escala no afecta en gran medida los costos finales. Además, los costos disminuyen con la utilización de la red óptima de la cadena de abastecimiento.

La solución del problema de optimización presentado anteriormente muestra los flujos y las pro-

ductividades requeridos para la expansión del B20 en Colombia, con base en las restricciones económicas y ambientales. No obstante, la cadena de abastecimiento considerada en este estudio excluyó el análisis del CUT. Así, se realiza dicho análisis y los resultados se incluyen en la siguiente sección.

### Efecto de la expansión del aceite de palma sobre las emisiones

Las condiciones de la expansión deben garantizar un mínimo impacto ambiental y la optimización econó-

**Tabla 15.** Costo total (\$) del biodiésel pagado por los mayoristas en Colombia bajo el esquema de producción óptima (USD/L).

	Oleoflores	Odin Energy	Biocom. del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Chevron-Bogotá							0,67		0,69	
Exxon Mobil-Terpel-Petrobras-Bogotá							0,67		0,69	
Exxon Mobil-Chevron-Conjunta-Mansilla-Facatativá							0,67	0,65	0,69	0,53
Terpel-San José			0,68			0,69				
Terpel-Puerto Carreño			0,68					0,65		
Terpel-Puerto Inírida									0,69	
Biocombustibles-Facatativá							0,67	0,65	0,69	0,53
Brio de Colombia-Facatativá							0,67			0,53
Terpel-Buga								0,65		0,53
Terpel-Yumbo							0,67		0,69	0,53
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Petrobras-Buga										0,53
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Petrobras-Yumbo							0,67	0,65	0,69	0,53
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Petrobras-Cartago							0,67			
Exxon Mobil-Chevron-Biocombustibles-Buenaventura									0,69	0,53
Terpel-Pereira							0,67	0,65	0,69	0,53
Terpel-Manizales							0,67		0,69	0,53
Chevron-Medellín									0,69	
Exxon Mobil-Medellín								0,65	0,69	
Terpel-Petromil-Medellín							0,67		0,69	

**Continuación Tabla 15.** Costo total (\$) del biodiésel pagado por los mayoristas en Colombia bajo el esquema de producción óptima (USD/L).

	Oleoflores	Odin Energy	Biocom. del Caribe	BioD	Ecodiesel	Manuelita	BPR1	BPR2	BPR3	BPR4
Terpel-Rionegro								0,65		
Terpel-La Pintada								0,65		
Zeuss-Petroleum-Girardota								0,65		
Zapata-Velásquez-Turbo	0,67						0,67			
Proxxon-Turbo	0,67						0,67			
Terpel-Cimitarra								0,65		
Exxon Mobil-Girón					0,65			0,65		
Terpel-Girón								0,65		
Terpel-La Gloria-Ayacucho	0,67						0,67			
Terpel-Barrancabermeja								0,66	0,69	
Terpel-Puerto Asís										0,53
Exxon Mobil-Terpel-Biocombustibles-Petrobras-Neiva									0,69	0,53
Exxon Mobil-Terpel-Chevron-Biocombustibles- Petrobras-Gualanday									0,69	
Exxon Mobil-Terpel-Mariquita									0,69	
Terpel-Florencia										0,53
Vopak-Cartagena							0,67			
Emgesa-Cartagena							0,67		0,69	0,53
Chevron-Cartagena							0,67		0,69	
Chevron-Galapa									0,69	
Chevron-El Arenal					0,65					
Siape-Barranquilla								0,66	0,69	
Ecospetroleo-Barranquilla							0,67	0,66	0,69	
Exxon Mobil-Galapa			0,67							
Exxon Mobil-Cartagena							0,67			
Terpel-Baranoa									0,69	
Terpel-Magangué	0,67	0,67	0,67							
Terpel-Cartagena							0,67	0,66	0,69	
Palermo-Sitio-Nuevo									0,69	0,53
Petromil-Cartagena							0,67	0,66		0,53

mica al mismo tiempo (Piecyk & McKinnon, 2010). Aunque en la última sección se muestran las condiciones óptimas de flujo y transporte del biodiésel con base en los criterios económicos y ambientales, los requerimientos de materia prima deben apoyarse en el estudio de las implicaciones de la expansión de los cultivos sobre el uso actual de la tierra y el cambio en el uso de la tierra.

Cuando la expansión en la producción de aceite de palma empiece, estará apoyada en un incremento en la producción de palma aceitera. Este incremento se puede dar como consecuencia de la intensificación de cultivos (aumentar rendimientos en la misma área sembrada) y/o la extensificación de cultivos (aumentar el área sembrada conservando los rendimientos). Hablar de intensificación de cultivos para incrementar rendimientos de cultivo a nivel nacional es una tarea compleja, que requiere modificaciones en las prácticas agrícolas, incremento en los niveles de mecanización y tecnificación de los cultivos, además de una mayor inversión en agroquímicos, que requeriría una cantidad considerable de tiempo para ser completada, por lo cual no permitiría alcanzar el nivel de producción requerido para alcanzar la producción de aceite de palma requerida. En consecuencia, considerando el nivel requerido de expansión de producción de aceite de palma en Colombia, podríamos pronos-

ticar que esta se basaría principalmente en una extensificación del área plantada actual, así se requeriría hacer uso de las zonas circundantes a los cultivos actuales para plantar más palma de aceite conservando los rendimientos de cultivos actuales.

En razón a lo expuesto anteriormente, se calcularon las emisiones asociadas directamente con el *cut* como resultado de la extensificación de los cultivos de palma de aceite requerida en Colombia a fin de abastecer una demanda creciente de biodiésel. Primero, con base en las metas definidas de producción de biodiésel se calculó la producción total de aceite de palma a 2020 y se comparó con la situación actual en todas las regiones (Tabla 16). Suponiendo que la expansión futura de los cultivos de palma de aceite ocurra alrededor de las zonas sembradas actualmente, se calculó el uso actual de la tierra en dichas zonas con base en la información de Calle (2012). También, es importante considerar las emisiones creadas al reemplazar los cultivos actuales a fin de calcular las emisiones derivadas de fertilizantes, herbicidas, agroquímicos y la maquinaria requerida para producir el aceite de palma. Estos valores se tomaron de Fox *et al.*, (2009), IICA (2006) y Lizarazo y Alfonso (2011) y se resumen en la Tabla 17. Después se definieron distintos niveles de despeje de la tierra, entre 0 y 100 %, a fin de identificar la manera como el cambio afecta

**Tabla 16.** Situación actual y proyectada de la producción de biodiésel a partir de aceite de palma.

Zona	Departamento	Situación actual (2012)			Situación proyectada		
		Área total (Ha) a 2012	Aceite de palma para biodiésel (t/año)	Potencial de biodiésel a 2012 (millones L/año)	Área total (Ha) requerida a 2020	Aceite de palma requerido (t/año)	Potencial de biodiésel a 202 (millones L/año)
Norte	Magdalena, Cesar, Atlántico y Guajira	147.400	309.540	3,19E + 08	664.189	1.394.797	1,44E + 09
Central	Santander, Norte de Santander, Bolívar	103.700	217.770	2,25E + 08	620.489	1.303.027	1,34E + 09
Oriental	Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá	140.500	295.050	3,04E + 08	657.289	1.380.307	1,42E + 09
Suroccidental	Nariño	51.400	107.940	1,11E + 08	568,189	1.193.197	1,23E + 09
<b>Total</b>		<b>443.000</b>		<b>9,59E + 08</b>	<b>2.510.156</b>		<b>5,43E + 09</b>

**Tabla 17.** Uso de la tierra a 2012 (Fox *et al.*; IICA, 2006; Lizarazo y Alfonso, 2011).

Parámetro	Valor	Unidad	Zona	Uso original de la tierra	Participación (%)
Tasa de fotosíntesis	1.4000	TC/Ha año	Norte	Bosque húmedo tropical	18,00
Densidad de palma	143.0000	#/Ha		Cultivos anuales	34,00
Fertilizantes				Pastizales	48,00
Urea	0,3146	t/ha	Central	Bosque húmedo tropical	25,00
Superfosfato triple	0,0388	t/ha		Cultivos anuales	25,00
Sulfato de potasio	0,0286	t/ha		Pastizales	50,00
Cloruro de potasio	0,0343	t/ha	Oriental	Bosque tropical de altura	5,00
Herbicidas	0,0131	t/ha		Cultivos anuales	31,67
Consumo de combustible	285.000	L/ha		Pastizales	23,00
			Suroccidental	Bosque húmedo tropical	23,00
				Bosque tropical deciduo	18,00
				Cultivos anuales	37,00
				Pastizales	22,00

las emisiones generadas por la producción del aceite de palma (Tabla 18). Considerando los parámetros mencionados, se calcularon las emisiones totales para la situación actual y la proyectada por medio de la herramienta ExAnte Carbon-Balance Tool (EXACT). Esta herramienta, desarrollada por la FAO-Roma, se diseñó como sistema de evaluación y permite obtener estimativos previos del impacto de los proyectos, programas y políticas de desarrollo agrícola y de silvicultura sobre el balance de carbono (Cerri *et al.*, 2010). El EXACT proporciona estimativos previos del impacto de los proyectos de desarrollo agrícola sobre las emisiones de los gases de efecto invernadero y el

secuestro de carbono, indicando los efectos sobre el balance de carbono (Bernoux *et al.*, 2010). En el vínculo <http://www.fao.org/tc/exact/ex-act-home/en/> se encuentra una descripción completa de la estructura y la metodología de la herramienta EXACT.

Los resultados de las emisiones para la situación del aceite de palma en las distintas regiones de Colombia se resumen en la Tabla 19. Estos resultados indican que el efecto de mitigación del cultivo de palma de aceite es suficientemente grande para absorber las emisiones creadas por todos los insumos utilizados para la producción a gran escala. Como consecuencia, se puede afirmar que la producción actual de

**Tabla 18.** Estrategia de expansión de los cultivos de palma de aceite.

Región	Departamento	Despeje de la tierra					
		0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
Norte	Magdalena, Cesar, Atlántico y Guajira	147.400	250.758	354.116	457.473	560.831	664.189
Centro	Santander, Norte de Santander, Bolívar	103.700	207.058	310.416	413.773	517.131	620.489
Oriente	Meta, Cundinamarca, Casanare, Caquetá	140.500	243.858	347.216	450.573	553.931	657.289
Occidente	Nariño	51.400	154.758	258.116	361.473	464.831	568.189



**Tabla 19.** Emisiones ahorradas con el área sembrada actualmente en palma de aceite.

Región	Área (ha)	Urea (t/año)	P (t/año)	K (t/año)	Herbicidas (t/año)	Consumo combustible (M <sup>3</sup> /año)	Emisiones producción material prima (tCO <sub>2</sub> eq)
Norte	147.400	46.372	5.721	9.274	1.922	42.009	-12.107.367
Centro	103.700	32.624	4.025	6.525	1.352	29.555	- 8.517.870
Oriente	140.500	44.201	5.453	8.840	1.832	40.043	-11.540.604
Occidente	51.400	16.170	1.995	3.234	670	14.649	- 112.154

aceite de palma actúa como sumidero y genera ahorro de emisiones. Sin embargo, es importante resaltar que estos resultados no significan que la cadena de abastecimiento de biodiésel de palma también ahorraría emisiones. A fin de analizar este punto se requiere un análisis adicional. Por otro lado, se puede ver que en una situación futura en la cual ocurriera una extensificación del cultivo de palma de aceite, en los casos en los cuales los bosques nativos dominan el uso inicial de la tierra, el efecto de mitigación se reduce. Esto es

el efecto de reemplazar bosques nativos con un potencial de mitigación comparativamente alto por un solo cultivo con un efecto de mitigación comparativamente menor, el cual además requiere el uso de agroquímicos y otros insumos. Por otra parte, en la región Oriente, donde el uso inicial de la tierra era predominantemente pastizales, se encontró el efecto contrario consistente en un aumento gradual del potencial de captura luego de una reducción justo después de iniciar la extensificación de la palma de aceite (Tabla 20).

**Tabla 20.** Cambios de las emisiones por despeje de la tierra.

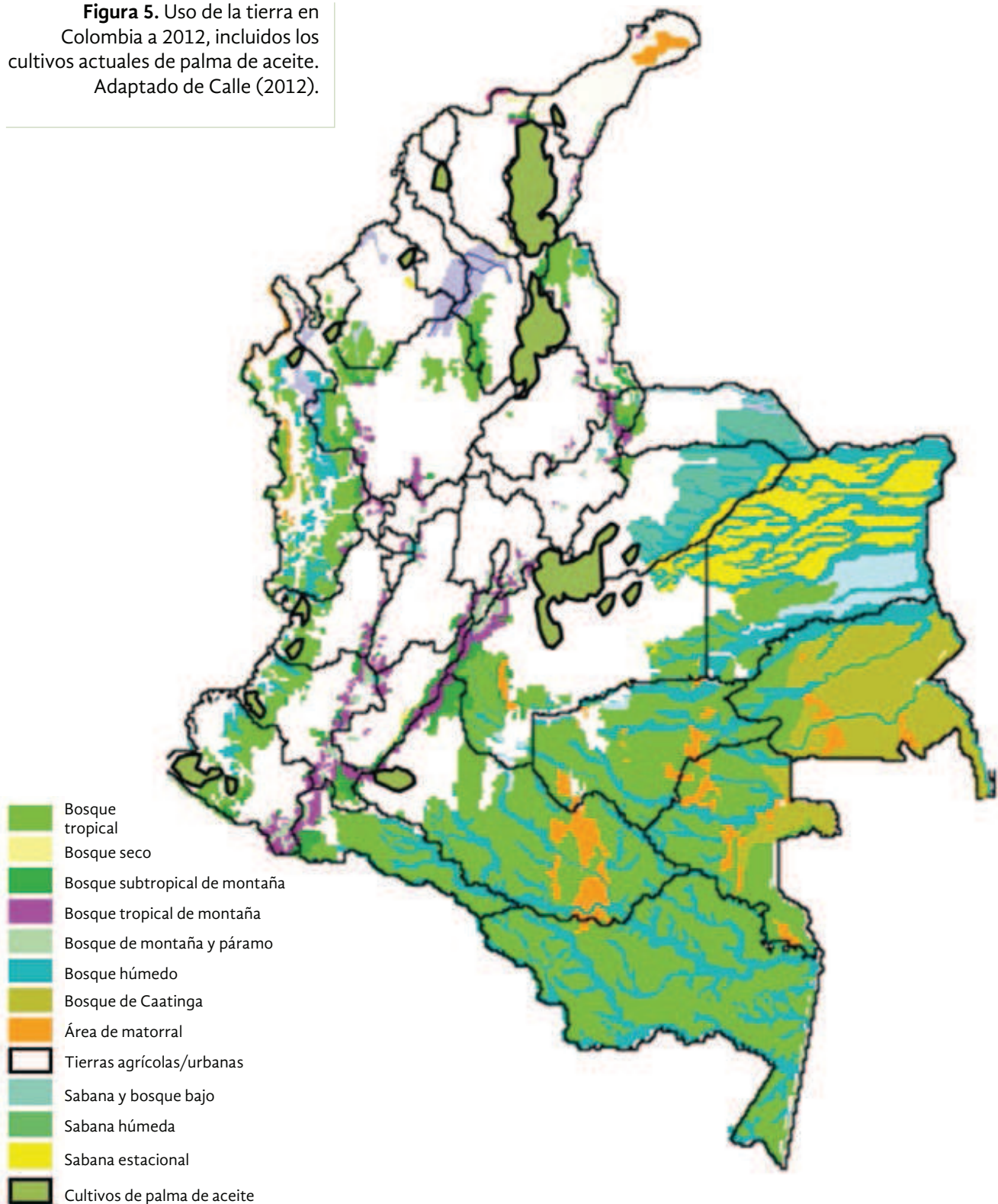
	Despeje de la tierra	Área (Ha)	Uso inicial de la tierra			Emisiones por la producción de materia prima (tCO <sub>2</sub> eq)
			Bosque Nativo <sup>a</sup>	Cultivos anuales	Pastizales	
Zona Norte	0	147.400	0	0	0	-12.107.356
	20	250.758	45.136	85.258	120.364	1.548.788
	40	354.116	63.741	120.399	169.975	2.187.170
	60	457.473	82.345	155.541	219.587	2.825.552
	80	560.831	100.950	190.683	269.199	3.463.934
	100	664.189	119.554	225.824	318.811	4.102.316
Zona Centro	0	103.700	0	0	0	-8.517.870
	20	207.058	51.764	51.764	99.388	1.893.883
	40	310.416	77.604	77.604	148.999	2.839.260
	60	413.773	103.443	103.443	198.611	3.784.636
	80	517.131	129.283	129.283	248.223	4.730.013
	100	620.489	155.122	155.122	297.835	5.675.389
Zona Oriente	0	140.500	0	0	0	-11.540.604
	20	243.858	12.193	72.222	153.630	-209.003
	40	347.216	17.361	109.952	218.746	-297.588
	60	450.573	22.529	142.682	283.861	-386.173
	80	553.931	27.697	175.412	348.977	-474.758
	100	657.289	32.864	208.142	414.092	-563.343
Zona Occidente	0	51.400	0	0	0	-112.154
	20	154.758	35.594	27.856	57.260	56.785
	40	258.116	59.367	46.461	95.503	79.524
	60	361.473	83.139	65.065	133.745	102.263
	80	464.831	106.911	83.670	171.988	125.002
	100	568.189	130.683	102.274	210.230	

<sup>a</sup> Los bosques nativos considerados son: Norte, Oriente (bosque húmedo tropical), Centro (bosque tropical de altura), Occidente (bosque húmedo tropical y bosque tropical decíduo).

La expansión requerida de los cultivos es 4,5 veces mayor para la región Norte; 6,0 veces mayor para la-Centro; 4,7 veces para la Oriente y 11,1 veces para la Occidente (Tabla 16). Puesto que estas expansiones

implican un uso extenso del suelo y remplazar el uso original del mismo, es necesario establecer los tipos de usos existentes en cercanía de los cultivos actuales (Figura 5 y Tabla 17).

**Figura 5.** Uso de la tierra en Colombia a 2012, incluidos los cultivos actuales de palma de aceite. Adaptado de Calle (2012).



Los pastizales son el uso predominante del suelo en las regiones Norte, Centro y Oriente. Por su parte, los bosques y los cultivos anuales son los usos más importantes de la tierra en la región Occidente. Suponiendo que estas expansiones ocurran sin afectar las actividades pecuarias (Tabla 18), remplazar los pastizales por cultivos de palma de aceite es una estrategia adecuada debido a que la tasa de fotosíntesis de la palma de aceite es superior al potencial de captura de CO<sub>2</sub> de los pastos (Tablas 19 y 20).

Con el uso actual de la tierra, tomando unas condiciones agronómicas corrientes, se obtiene un ahorro neto de emisiones (Tabla 19). Los ahorros más grandes se encuentran en la región Occidente, la cual es también la más vulnerable, debido a que los cultivos de palma de aceite han remplazado los bosques nativos.

Aunque los resultados de la optimización mostraron que una de las zonas prospectivas para la expansión es Nariño, el análisis del CUT indica que el efecto del CUT podría aumentar las emisiones y, por tanto, el mayor riesgo de generación de impactos ambientales.

## Comentarios finales

El crecimiento de la industria del biodiésel en Colombia se traduce en una necesidad elevada de materia prima. Puesto que la producción de biodiésel se basa en el aceite de palma, en los escenarios futuros este se considera como única materia prima. Sin embargo, según los resultados derivados de este trabajo, el aumento del 10-15 % de las mezclas de biodiésel implica la necesidad de aumentar 10 veces más la materia prima producida actualmente y de 4 a 6 veces la cantidad de tierra cultivable usada. De continuar esta tendencia en las condiciones de expansión, la cantidad de biodiésel de palma no podría suplir las necesidades actuales del país o podría crear un conflicto con la seguridad alimentaria. Por tanto, para el siguiente paso en el crecimiento de la industria del biodiésel en el país podrían explorarse otras oleaginosas como la *jatropha* o la higuera conjuntamente con la palma de aceite (la industria consolidada).

## Conclusiones

Las tendencias mundiales se han enfocado en ampliar la utilización de la bioenergía debido a los beneficios ambientales y políticos. Por consiguiente, es preciso estudiar las condiciones óptimas para la expansión con base en ubicaciones específicas. En este trabajo se estudió la cadena de abastecimiento del biodiésel de palma tomando en consideración los niveles mínimos de emisiones y costos, y los aspectos logísticos. El análisis, relacionado con los criterios de CUT, demostró que la mejor opción, basada en el desempeño económico, contrasta con los resultados del CUT y los parámetros de logística. La industria del biodiésel de palma requiere grandes extensiones de tierra, pero las regiones más prometedoras desde el punto de vista económico son precisamente las más cercanas a los bosques nativos con sus ecosistemas y biodiversidad, los cuales son sumideros de las emisiones.

Los resultados de este trabajo indicaron que sería posible alcanzar la meta de B20 a 2020 a través de la expansión de la cadena de abastecimiento del aceite de palma. Las condiciones logísticas permiten lograr los costos mínimos, las cargas ambientales y la estrategia del uso adecuado de la tierra que permita reducir los efectos del CUT. Adicionalmente, el estudio de las condiciones para la expansión da pie para el debate sobre otras materias primas que pudieran combinarse con la industria del aceite de palma para las mezclas más altas de biodiésel.

## Agradecimientos

Por el apoyo económico recibido para este estudio, los autores manifiestan su agradecimiento al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (Colciencias), el Gobierno de Caldas, la Oficina de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia en Manizales, la Universidad Nacional de Colombia en la Amazonía y la Universidad Nacional de Colombia en la Orinoquía.

## Referencias

- Arias, A. F. (2007). *Los biocombustibles en Colombia*. Bogotá: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural República de Colombia.
- Arias, B., Pevida, C., Rubiera, F., & Pis, J. J. (2008). Effect of biomass blending on coal ignition and burnout during oxy-fuel combustion. *Fuel*, 87, 2753-2759.
- Bai, Y., Ouyang, Y., & Pang, J. S. (2012). Biofuel supply chain design under competitive agricultural land use and feedstock market equilibrium. *Energy Economics*, 34, 1623-1633.
- Bernoux, M., Branca, G., Carro, A., Lipper, L., Smith, G., & Bockel, L. (2010). Ex-ante greenhouse gas balance of agriculture and forestry development programs. *Sci. Agric.*, 67, 31-40.
- Bonney, M., & Jaber, M. Y. (2011). Environmentally responsible inventory models: non- classical models for a non-classical era. *Int. J. Prod. Econ.*, 133, 43-53.
- Calle, G. M. (2012). *Mapa Colombia: Cobertura de vegetación actual*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Cerri, C. C., Bernoux, M., Maia, S. M. F., Cerri, C. E. P., Costa-Junior, C., Feigl, B. J. ..., & Moreira, C.S. (2010). Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. *Sci. Agric.*, 67, 102-116.
- Chang, A. F., & Liu, Y.A. (2009). Integrated process modeling and product design of biodiesel manufacturing. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 1197-1213.
- Chankong, V., & Haimes, Y. Y. (1983). *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*. New York: Elsevier Science Publishing
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (2008.) *Lineamiento de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia*. En: Departamento Nacional de Planeación (Ed.). Disponible en: [www.minambiente.gov.co](http://www.minambiente.gov.co)
- Federación Nacional de Biocombustibles- Fedebiocombustibles (2012). *Biodiesel Plants in Colombia*. Bogotá: Fedebiocombustibles.
- Federación Nacional de Biocombustibles- Fedebiocombustibles (2012). *Cifras informativas del sector Biocombustibles: Biodiesel a partir de aceite de palma*. Bogotá: Fedebiocombustibles.
- Fox, J., Yosi, C., & Keenan, R. J. (2009). *Estimating CO2 Emissions Associated With Selective Timber Harvesting and Oil Palm Conversion in Papua New Guinea*. Melbourne: The University of Melbourne.
- Granja, J. F. O., Duarte, B. P. D., & Oliveira, N. M. C. (2009). Kinetic Models for the Homogeneous Alkaline and Acid Catalysis in Biodiesel Production. *Computer Aided Chemical Engineering*, 27, 483-488.
- Duarte-Guterman, Cía. Ltda. (2009). *Actualización de Costos de Producción de Aceite de Palma Informe final*. Bogotá, Colombia.
- ICIS pricing (2010). *Biodiesel (USA) Sample Report*. ICIS
- ICIS pricing (2011). *Ethanol Prices and Pricing Information*. ICIS
- ICIS pricing, 2012. *Fatty acids Price Report*. ICIS
- IICA (2006). *Cultivo de la palma africana: Guía Técnica*. Managua: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

- Infante, A., & Tobón, S. (2010). *Bioenergía para el Desarrollo Sostenible: Políticas Públicas sobre Biocombustibles y su relación con la seguridad alimentaria en Colombia*. Rome, Italy: Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Kretschmer, B., Narita, D., & Peterson, S. (2009). The economic effects of the EU biofuel target. *Energy Economics*, 31, S285-S294.
- Lizarazo, I. y Alfonso, O. (2011). Aplicaciones de la agricultura de precisión en palma de aceite (*Elaeis guineensis*) e híbrido OxG. *Revista de ingeniería*, 33, 124-130.
- Marrero, J., & Gani, R. (2001). Group-contribution based estimation of pure component properties. *Fluid Phase Equilib*, 183-184, 183-208.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the constraint method in Multi- Objective Mathematical Programming problems. *Appl. Math. Comput*, 213, 455-465.
- Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Ministerio de Minas y Energía (2005). Resolución 1289 de 2005. Bogotá: Colombia.
- Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Ministerio de Minas y Energía (2007a). Resolución 180782 de 2007. Bogotá: Colombia.
- Ministerio de Medio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Ministerio de Minas y Energía (2007b). Resolución 182087 de 2007. Bogotá: Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía (2003). Resolución 180687 de 2003. Bogotá: Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía (2005). Resolución 181069 de 2005. Bogotá: Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía (2007). Resolución 182142 de 2007. Bogotá: Colombia.
- Ministerio de Minas y Energía (2008). Resolución 180243 de 2008. Bogotá: Colombia.
- OECD-FAO (2010). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2010-2019*. Paris, France: Organisation for Economic Co-Operation and Development - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Papapostolou, C., Kondili, E., & Kaldellis, J. K. (2011). Development and implementation of an optimisation model for biofuels supply chain. *Energy*, 36, 6019-6026.
- Piecyk, M. I., & McKinnon, A.C. (2010). Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020. *Int. J. Prod. Econ.*, 128, 31-42.
- Presidencia de la República de Colombia (2007). Decreto 2629 de 2007. Colombia
- Quintero, J. A., Montoya, M. I., Sánchez, O. J., Giraldo, O. H., & Cardona, C. A. (2008). Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case. *Energy*, 33, 385-399.
- Secretaría del Senado (2001). Ley 693 de 2001. Bogotá: Colombia.
- Secretaría del Senado (2002). Ley 788 de 2002. Bogotá: Colombia.
- Secretaría del Senado (2004). Ley 939 de 2004. Bogotá: Colombia.
- UPME (2012). *Proyección de Demanda de Combustibles Líquidos y GNV en Colombia*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Minas y Energía- Unidad de Planeación Minero Energética, UPME.