



Ingeniería

ISSN: 0121-750X

revista\_ing@udistrital.edu.co

Universidad Distrital Francisco José de

Caldas

Colombia

Aranda Pinilla, Johan Alexander; Barón Molina, Manuel José; Huertas Forero, Isaac;  
Orjuela Castro, Javier Arturo

Modelo de programación matemática para la cadena productiva del biodiésel en  
Colombia

Ingeniería, vol. 19, núm. 1, 2014, pp. 19-49

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=498850178003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](http://redalyc.org)

 redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# Modelo de programación matemática para la cadena productiva del biodiésel en Colombia

*Mathematical Programming Model of Biodiesel Supply Chain in Colombia*

Johan Alexander  
Aranda Pinilla

Universidad Católica  
de Colombia  
johan.aranda@gmail.com

Manuel José  
Barón Molina  
Universidad Católica  
de Colombia  
mjbaron@ucatolica.edu.co

Isaac Huertas Forero  
Universidad Católica  
de Colombia  
ihuertas@ucatolica.edu.co

Javier Arturo  
Orjuela Castro  
Universidad Distrital  
Francisco José  
de Caldas  
jorjuela@udistrital.edu.co



## Resumen

El presente trabajo describe un modelo de programación lineal entera mixta para la estructuración e integración de toma de decisiones estratégicas y tácticas, relacionadas con la producción del biocombustible biodiésel, a partir de palma africana en Colombia. Para ello, se definen cuatro zonas (norte, central, oriental y suroccidental), con el fin de coordinar de manera estructurada el flujo de los recursos entre los eslabones de la cadena productiva definida: desde el eslabón inicial, “cultivo”, pasando por los eslabones centrales, “extractoras y “refinado”, hasta el eslabón final, “mezclado”, los cuales conforman la red de suministro.

El objetivo del modelo es determinar un plan de distribución de palma, aceite y biodiésel a lo largo de la cadena, un plan de producción e inventario y un plan de aumento de capacidad de las biorrefinerías que minimice el costo total de la cadena a lo largo de un horizonte de planeación definido. La aplicación del modelo permite mostrar una proyección al año 2043 del comportamiento de la cadena y, en especial, de los requerimientos del suelo.

**Palabras clave:** programación lineal, programación mixta, biodiésel, cadena de suministro.

## Abstract

This paper describes a mixed integer linear programming model for structuring and integrating strategic decisions and tactics, related to the production of biofuel biodiesel from African palm in Colombia. The model considers four regions (North, Central, Eastern and South - West), in order to coordinate a structured way flow of resources between the links in the chain starting with “harvesting” going through the middle

---

Fecha recibido: 01/11/2013  
Fecha modificado: 29/05/2014  
Fecha aceptado: 30/05/2014

steps of “extraction” and “conversion” until the final step “mixture”, which are involved in the supply network.

The goal of the model is to determine a distribution plan of palm, oil, biodiesel and diesel throughout the chain, along with a production and inventory plan, and a capacity increase plan for biorefineries in a way that minimizes the total cost of the production chain over a predefined planning horizon. The application of the model results in a projection to the year 2043 showing the behavior of the chain, specifically soil requirements for such production levels.

**Keywords:** linear programming, mixed programming, biodiesel, supply chain.

## 1. Introducción

En los últimos años los biocombustibles han comenzado a ser considerados mundialmente como una alternativa seria frente al petróleo [1]. Colombia no es ajena a esta tendencia, el impulso de producción de bioetanol y biodiésel, mediante la definición de políticas y leyes regulatorias, ha permitido un desarrollo importante del sector [2]. En cuanto a América Latina, esta presenta condiciones adecuadas para la producción de biocombustibles, dado su alto porcentaje de zonas húmedas y de recursos hídricos renovables [3]. En la región Colombia es el tercer productor de biodiésel por debajo de Argentina y Brasil.

Los modelos matemáticos han sido utilizados para describir el comportamiento de las cadenas de abastecimiento, en particular para biocombustibles; sin embargo, la revisión de la literatura revela la no existencia de un modelo que permita la estructuración e integración de toma de decisiones estratégicas y tácticas, referentes a la producción del biocombustible biodiésel a partir de palma africana en Colombia.

Este artículo es continuación de un estudio de revisión de la literatura [4], en el cual se definió la cadena de suministro de biodiésel y se estudiaron 26 modelos matemáticos aplicados a cadenas de biocombustibles y biomasa empleados en otros países. Con base en esa revisión se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta para la cadena productiva del biodiésel en Colombia, que incluye los eslabones: cultivos, extractoras, biorrefinerías y mezcladoras. Los tres primeros eslabones se dividen en las cuatro zonas productoras de Colombia (norte, centro, oriente y suroccidente) mientras que en las mezcladoras consideran 30 puntos desde donde se abastece toda la demanda del país. Los detalles de este modelo se describen en el presente artículo.

El modelo permite determinar un plan óptimo de distribución, producción e inventario de palma, aceite, biodiésel y diésel para la cadena, así como la decisión de aumento de capacidad de las biorrefinerías, la cual minimiza el costo total de la cadena a lo largo de un horizonte de planeación definido. Los costos incluidos en la función objetivo comprenden los costos de transporte y de inventario a lo largo de la cadena, los costos de

instalación, considerando 4 posibles tamaños de plantas, y el costo de capital asociado a la inversión en ampliación de capacidad. La aplicación del modelo permite mostrar una proyección al año 2043 del comportamiento de la cadena y, en especial, de los requerimientos del suelo.

## 2. Metodología

La información de entrada al modelo fue obtenida mediante la recolección, procesamiento y análisis de información secundaria proveniente de fuentes secundarias y primarias, incluyendo: bases de datos científicas (ScienceDirect, SpringerLink, EBSCOhost, SciELO y Scopus) y memorias de congresos (Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas); los Ministerios colombianos de Agricultura y del Medio Ambiente; entes nacionales como Fedebiocombustibles e internacionales como USDA (United States Department of Agriculture) y NACEPT (National Advisory Council for Environmental Policy and Technology), y organizaciones multinacionales como el IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura) y la Cepal (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). La información primaria se obtuvo de las refinerías del departamento Meta, sus clientes y proveedores. El modelo diseñado se resolvió por métodos exactos con GAMS.

## 3. Antecedentes

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados a partir de materias primas producidas recientemente por seres vivos, vegetales o animales, denominados “biomasa”. Estos pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad última es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante combustión [5]. Estos combustibles se sirven de la biomasa como fuente de energía (renovable) para producir combustión; los principales biocombustibles son: biodiésel, bioetanol y biogás [6]. Su uso genera una menor contaminación ambiental y son una alternativa viable frente al agotamiento de energías fósiles como el gas y el petróleo, en donde además se observa un incremento constante de precios.

El biodiésel se ha definido como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos, obtenidos a partir de lípidos renovables (moléculas orgánicas compuestas, principalmente, por carbono e hidrógeno y, en menor medida, oxígeno), tales como aceites vegetales o grasas animales, para su uso en encendido por compresión [7]. Es posible obtener este biocombustible a partir de una gran variedad de plantas (soya, cocotero, higuerilla, aguacate, jatropha/piñón, colza/canola, maní y girasol), pero se ha generalizado industrialmente a partir de la palma africana. La mezcla de biodiésel con petrodiésel (ACPM, aceite combustible para motor) se denomina BXX, donde XX es el porcentaje del biodiésel en la mezcla, ejemplo B20 significa una mezcla con 20% de biodiésel y 80% de diésel derivado del petróleo [8]. La palma africana o palma de aceite es la utilizada en Colombia para la obtención del biodiésel. La palmera tropical (figura 1) crece en climas



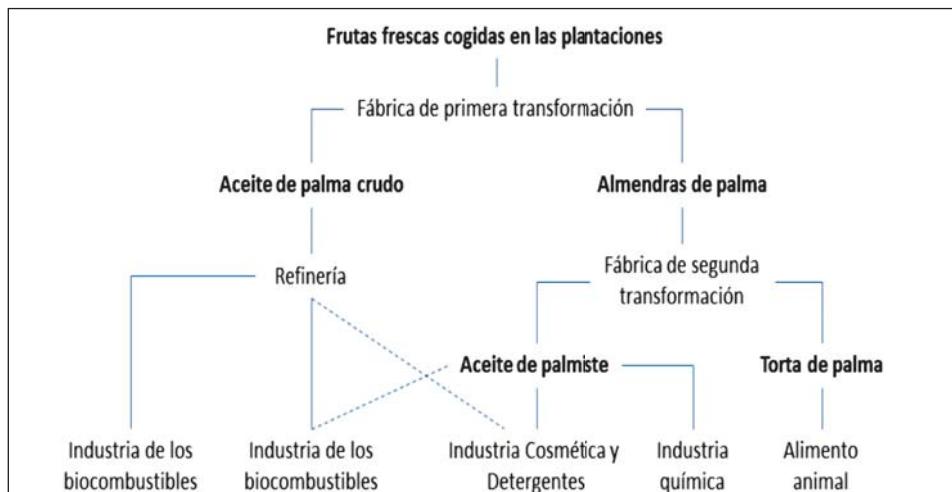
**Figura 1.** Foto de una plantación de palma de aceite africana.

Fuente: [9].

cálidos en la franja ecuatorial y puede llegar a crecer hasta 20 m de altura, se obtiene aceite de su fruto (aceite de palma) y de su almendra (aceite de almendra/palmiste).

El ciclo de producción de la palma comienza entre el tercer y cuarto año, y su aceite puede ser utilizado para obtener diversos productos de uso personal: aceites de cocina, margarinas, jabones, entre otros (figura 2). Sin embargo, su demanda ha aumentado significativamente, ya que se puede emplear, a un buen costo y rendimiento, como materia prima industrial para la producción de biodiésel.

El biodiésel se obtiene mediante un proceso denominado transesterificación. En ciertos casos, previamente a este proceso, se realiza un pretratamiento de las materias primas, basado en la esterificación (síntesis de un éster, compuesto orgánico derivado de ácidos orgánicos o inorgánicos oxigenados) de los lípidos, el cual tiene como finalidad



**Figura 2.** Usos de la palma de aceite.

Fuente: [10].

convertirlos en ésteres. Las principales etapas en la producción de los biocombustibles, dentro de las cuales se encuentra el biodiésel, se presentan en el tabla I, donde se puede observar como materia origen las plantas oleaginosas como soja, palma de aceite, colza y jatropha. Los procesos respectivos son: tratamiento de los cultivos, prensado (extracción del aceite) y, finalmente, transesterificación.

Según [11], los costos de producción de los biocombustibles varían ampliamente; estas diferencias se deben a los costos de las materias primas, al tipo de energía usado

**Tabla I.** Principales etapas de la producción de biocombustibles.

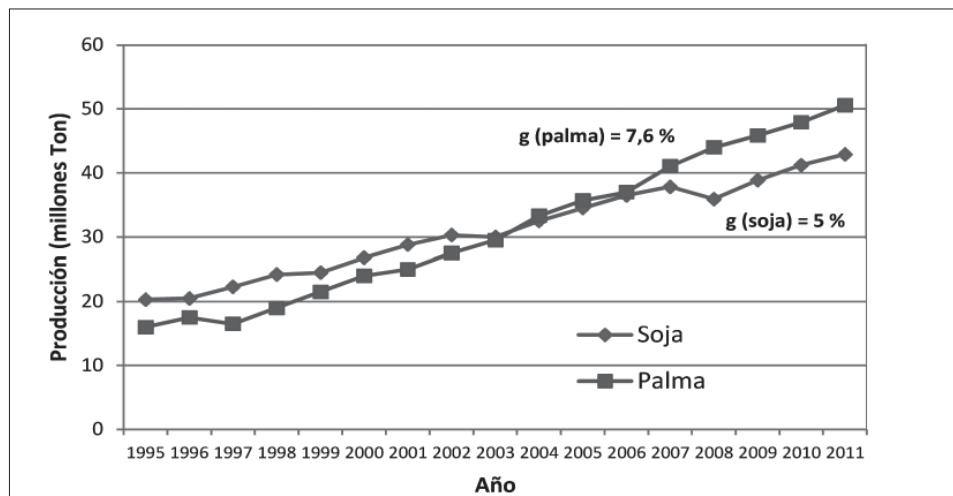
Materias primas		Procesamiento industrial					
Cultivos energéticos	Cultivo	Pretratamiento	Procesamiento	Producto primario	Procesamiento	Producto final	
Plantas oleaginosas	Soja	Cria (tratamientos genéticos) mejora del contenido en aceites, azúcar y almidón; búsqueda de variedades resistentes a la sequía; tecnología para mejora de los rendimientos	Prensado o extracción Molienda e hidrólisis	Aceite vegetal Azúcar	Transesterificación		Biodiésel
	Palma aceitera				Bio-oil		
	Colza						
	Jatropha						
Cultivos azúcar/almidón	Caña de azúcar				Fermentación y cofermentación Purificación	Etanol, butanol	
	Sorgo dulce						
	Remolacha						
	Mandioca						
Biomasa lignocelulósica	Eucalipto	Cria (tratamientos genéticos) reducción del contenido de lignina; selección de las variedades con mayor adaptabilidad	Gasificación Calentamiento y seco Pirólisis Física: comunicación mecánica, explosión a vapor, explosión de fibra de amonio, pirólisis; Química: hidrólisis ácida y alcalina; Biológica: reacción a microbios (hongos blancos, marrones y de pudrición blanda).	Syngas Bio-oil	Purificación	Síntesis catalítica	Gas natural sintético
	Sauce						Diesel Fischer-Tropsch
	Swichgrass						Dimetiléter
	Bermuda-grass						Metanol
	Miscanthus					Water gas shiftreaction	Hidrógeno
Residuos	Relleno sanitario						Biodiésel
	Desecho animal						

para llevar a cabo el procesamiento y a los precios obtenidos para los subproductos derivados durante el proceso de producción. En este sentido, la materia prima, es decir el aceite, constituye el 75% del costo de producción, mientras el 11% es de químicos, 2% de energía, 4% de mano de obra, 6% de depreciación y 4% de mantenimiento [8].

La producción mundial de aceite vegetal creció de forma constante entre 1995 y 2011, a un ritmo del 5% anual, hasta superar en 2007 las 128 millones de toneladas anuales. La producción mundial de aceite se encuentra repartida entre la Unión Europea (UE) y tres grandes países productores: Indonesia, Malasia y China. Entre los cuatro engloban el 56% de la producción mundial. Solo tres países americanos, Estados Unidos, Argentina y Colombia (con el 7%, 6% y 5% de la producción mundial, respectivamente), se encuentran entre los primeros siete países productores de aceite del mundo.

La palma y la soja en la producción actual de biodiésel son las fuentes principales para la producción de aceite vegetal. En lo que respecta al aceite de soja, su producción creció al mismo ritmo del 5% que la producción total de aceite, mientras que la producción de aceite de palma lo hizo a un ritmo más acelerado del 7.6% anual durante el mismo período, lo que provocó que a partir de 2005 el volumen anual producido de aceite de palma fuera superior al de soja (figura 3).

La mayor cantidad de producción de aceite de palma se encuentra concentrada en Asia (Indonesia, Malasia y Tailandia), con el 90.1%. Solo un país americano (Colombia) y uno africano (Nigeria) se encuentran entre los primeros cinco países productores de aceite del mundo, con el 1.8% y el 1.7%, respectivamente. Por su parte, la producción



**Figura 3.** Producción mundial de aceite de palma y soja entre los años 1995 y 2011.

Fuente: [10].

mundial de biodiésel se mantuvo estable entre dos y tres millones de toneladas anuales, hasta 2004. En 2005, la producción aumentó hasta llegar a un nivel de 20 mil millones de litros en 2010 [12].

## 4. Resumen de modelos matemáticos para la gestión de cadenas

De acuerdo con la revisión realizada por [4], en los años recientes se ha notado un incremento en estudios referentes a modelos matemáticos para la gestión de cadenas de suministro (*Supply Chain Management - SCM*) de biocombustibles y afines (biomasa, bioetanol, entre otras). El país con mayor cantidad de estudios es USA, con un 38% del total de artículos revisados. Europa reporta también un 38% y el porcentaje restante, 24%, se distribuye entre el Pacífico Sur y Suramérica.

La herramienta más utilizada para la formulación de modelos matemáticos es la programación matemática y, dentro de esta, la más utilizada es la programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés) con un 50% de los artículos revisados. En segunda instancia, las herramientas más utilizadas son la simulación y dinámica de sistemas con un 31% de artículos revisados.

El diseño y gestión de la cadena es el objetivo utilizado con mayor frecuencia en los modelos de SCM evaluados (35% del total de artículos revisados). En segunda instancia se encuentran modelos con objetivos varios (Otros) los cuales corresponden a análisis y cuantificación de variables en las cadenas productivas (tabla II). Las características y variables de decisión de los modelos evaluados incluyen variables relacionadas con el flujo de las materias primas a través de la red [4].

Tabla II. Resumen de modelos matemáticos para la gestión de cadenas de suministro, según [4]								
Objetivo	Herramienta							Total
	DP	IBSAL	LP	MILP	MISP	Simulación	DS	
Diseño		2		1				3
Diseño y gestión				7	1	1		9
Gestión			1	2				3
Programación cosechas				3		1		4
Otros	1					2	4	7
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	

DP: Programación dinámica  
IBSAL: Logística y análisis de la cadena de biomasa integrada (Integrated Biomass Supply Analysis and Logistics)  
LP: Programación lineal  
MILP: Programación lineal entera mixta  
MISP: Programación estocástica entera mixta  
DS: Dinámica de sistemas

Fuente: [4].

## 5. Levantamiento de información para la formulación del modelo

Colombia es el primer productor en América y el cuarto en el mundo. Como fortaleza tiene el gremio Fedepalma, creado en 1962. La palma se introdujo en el país en 1932 y fue sembrada con fines ornamentales en la estación agrícola de Palmira (Valle del Cauca). El cultivo comercial solo comenzó en 1945 cuando se estableció una plantación en el departamento de Magdalena [13]. La expansión del cultivo mantuvo un crecimiento sostenido. “A mediados de los años sesenta, existían 18 mil hectáreas en producción y en 2011 alcanzó un área de siembra de 427 mil hectáreas, aproximadamente, de las cuales 62.5% se encontraba en estado de producción y 37.5% en fase de desarrollo” [13]. En la figura 4 se muestra la evolución de área productiva y área en desarrollo. La producción de aceite de palma se distribuye en cuatro zonas productivas, como se muestra en la figura 5.

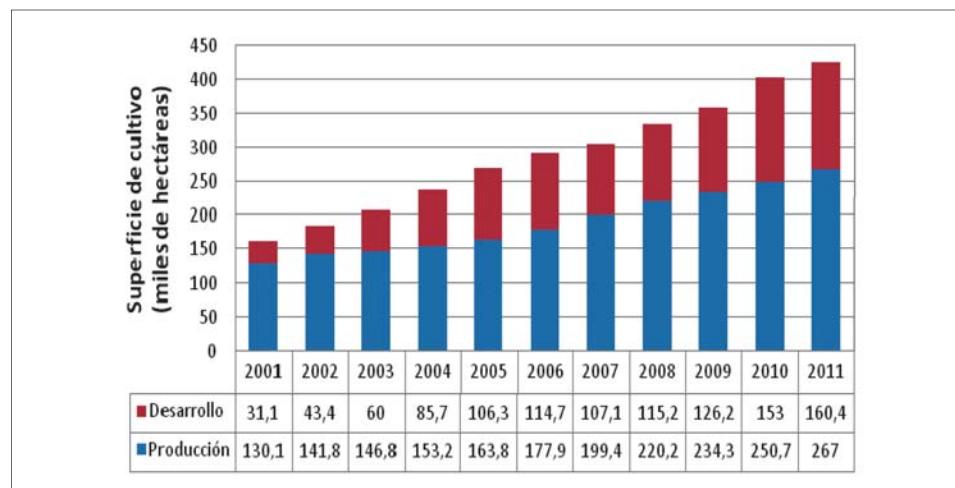


Figura 4. Evolución de la superficie de cultivo de palma aceitera en Colombia.

Fuente: [13].

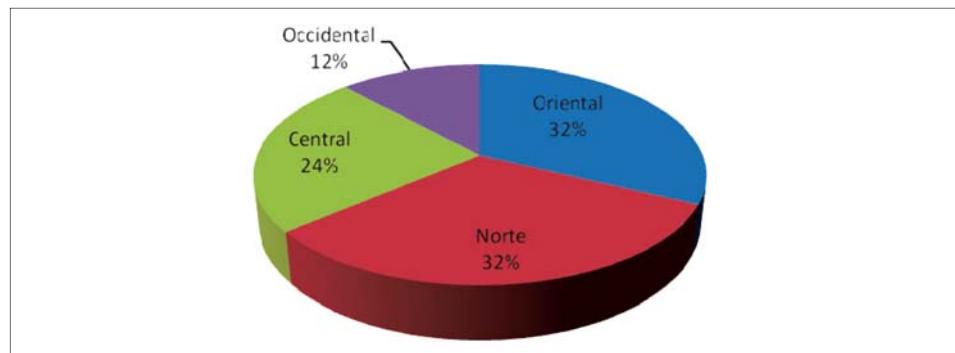


Figura 5. Distribución de la superficie de cultivo de palma aceitera en Colombia.

Fuente: [13].

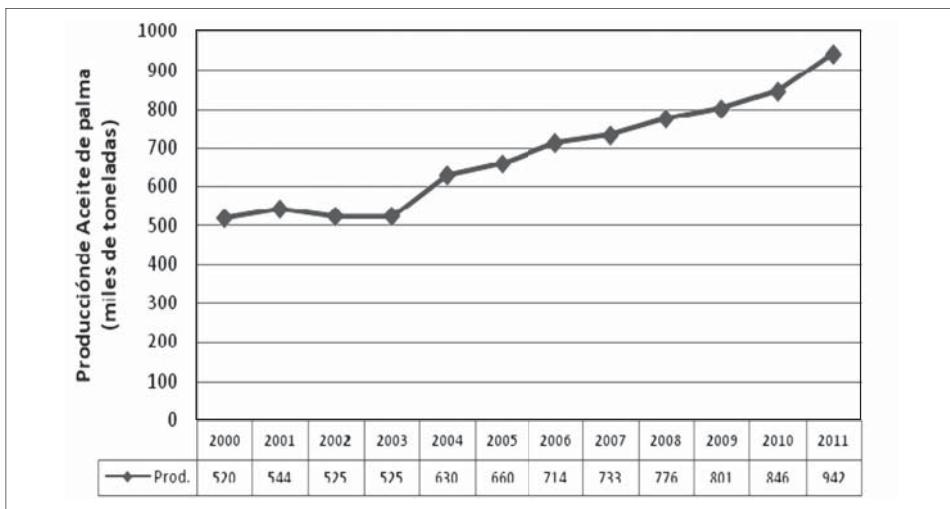
**Tabla III.** Rendimiento de las principales fuentes vegetales por tipo de cultivo

Cultivo	Rendimiento (l/ha-año)	Rendimiento (gal/ha-año)	Empleos agric+ind/ ha-año
<b>Palma</b>	5.550	1.446	0,27
<b>Cocotero</b>	4.200	1.110	0,52
<b>Higuerilla</b>	2.600	687	0,64
<b>Aguacate</b>	2.460	650	0,51
<b>Jatropha</b>	1.559	412	0,30
<b>Colza</b>	1.100	291	0,40
<b>Maní</b>	990	262	0,40
<b>Soya</b>	840	222	0,37
<b>Girasol</b>	890	235	0,40

Fuente: [8].

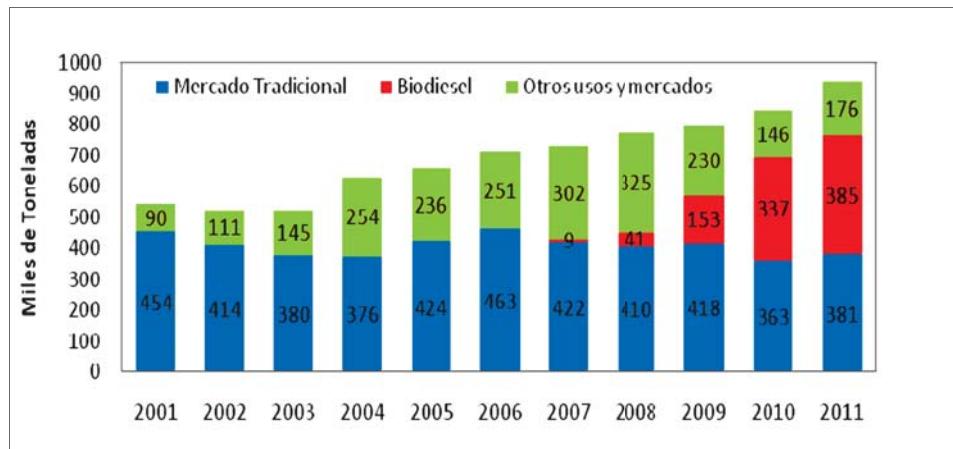
En Colombia la principal fuente de aceite es la palma aceitera africana. Sin embargo, existen otros ocho cultivos que pueden proveer aceite para la fabricación de biodiésel: coco, higuerilla, aguacate, jatropha, colza, maní, girasol y soya. En la tabla III se muestran los posibles rendimientos de algunas fuentes potenciales de aceite como materia prima para la elaboración de biodiésel.

La producción de aceite de palma ha crecido de forma constante desde 1995, pero es desde el 2004 cuando la tasa de crecimiento se duplica del 4% al 8% promedio anual, marcando el inicio de una nueva tendencia creciente de la producción. El incremento de la producción de aceite de palma se muestra en la figura 6.



**Figura 6.** Evolución de la producción de aceite de palma en Colombia.

Fuente: [13].



**Figura 7.** Usos de la producción nacional de aceite de palma.

Fuente: [13].

Se puede observar que entre los años 2004 (año de inicio de la nueva tendencia de crecimiento) y 2011 el incremento anual promedio de la producción de aceite de palma fue de 52 000 toneladas. Los productos de la palma se utilizan en la industria agroalimentaria, la industria química, en la cosmética y en la alimentación animal. Respecto al aceite de palma, su uso industrial se dirige principalmente hacia el mercado tradicional (descrito anteriormente) y el mercado de los biocombustibles. En la figura 7 se presenta la distribución de los destinos de aprovechamiento del aceite de palma.

En Colombia se observa una tendencia favorable para los productores de biocombustibles en cuanto a la legislación y a las políticas que los rigen [14]. En 2011, se produjeron 442 000 toneladas de biodiésel constituyéndose en el principal mercado local para el aceite de palma. Las plantas de refinación de biodiésel y sus capacidades se presentan en la tabla IV. Adicionalmente, existen dos plantas de una producción mucho menor: una en Tumaco (Nariño), con una capacidad de 3 000 litros/día, y otra en Zulia (Norte de Santander), con una capacidad de 20 000 litros/día.

La producción de biodiésel en Colombia se presenta en la figura 8. Como se observa, comienza en 2008 y su nivel ha aumentado hasta superar las 440 000 toneladas en 2011. Para 2012, la producción se estima en más de 500 000 toneladas. También, es relevante la clara intención gubernamental por ganar mercado y competitividad en el campo internacional. Sin embargo, se evidencian los conflictos entre las políticas agrícolas y las de biocombustibles.

Los cultivos de palma africana, las plantas de extracción de aceite y las biorrefinerías se encuentran distribuidas en cuatro zonas del país: norte, centro, oriente y suroccidente. La zona con la mayor área de cultivos es la zona oriente con 170 662 hectáreas. A su vez, esta zona cuenta con 22 plantas de extracción de aceite y tres plantas de refinamiento.

Tabla IV. Capacidad de producción de biodiésel por empresa en Colombia							
Región	Empresa	Capacidad (t/año)	Capacidad (l/día)	Área Sembrada (Ha) *	Empleos Directos	Empleos Indirectos	Fecha Entrada Operación
Norte, Codazzi	Oleoflores	60 000	53 095	16 251	2 739	5 478	Ene-08
Norte, S/ta Marta	Bioc. Sost, del Caribe	100 000	92 384	28 277	4 766	9 532	Mar-09
Norte, B/quilla	Romil de la Costa	10 000	-	-	-	-	-
Norte, Galapa	Biodiésel de la Costa	10 000	-	-	-	-	-
Norte, C/ta Marta	Odin Energy	36 000	-	-	-	-	-
Norte, B/quilla	Clean Energy	36 000	-	-	-	-	-
Central, B/bermeja	Ecodiésel de Col.	115 000	112 461	34 422	5 828	11 67	Jun-08
Oriental, Faca	Bio d	115 000	112 461	34 222	5 801	11 603	Feb-09
Oriental, San Carlos	Aceites Manuelita	120 000	119 067	36 444	6 142	12 285	Jul-09
Oriental, Castilla	Biocastilla	15 000	-	-	-	-	-
Total		617 000	489:468	149 616	25 276	50:555	

\* Las cifras del área sembrada son tomadas del Sistema de Información del Sector Palmero (SISPA).

Fuente: [13].

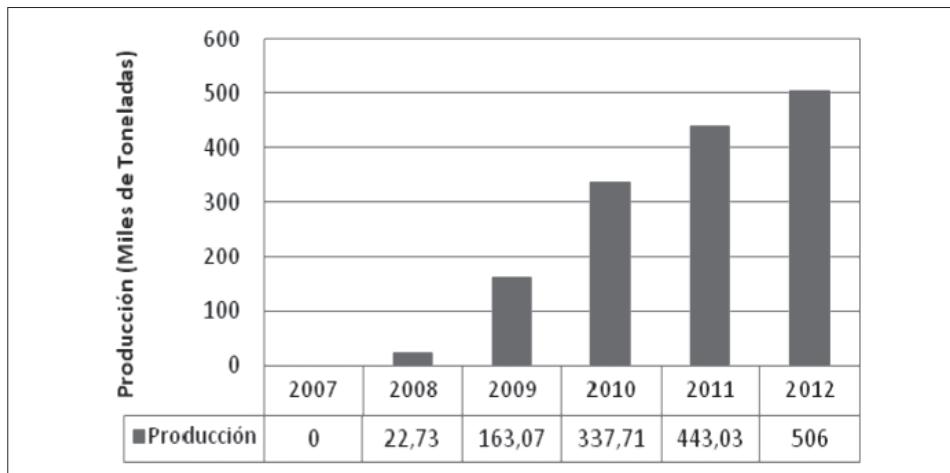
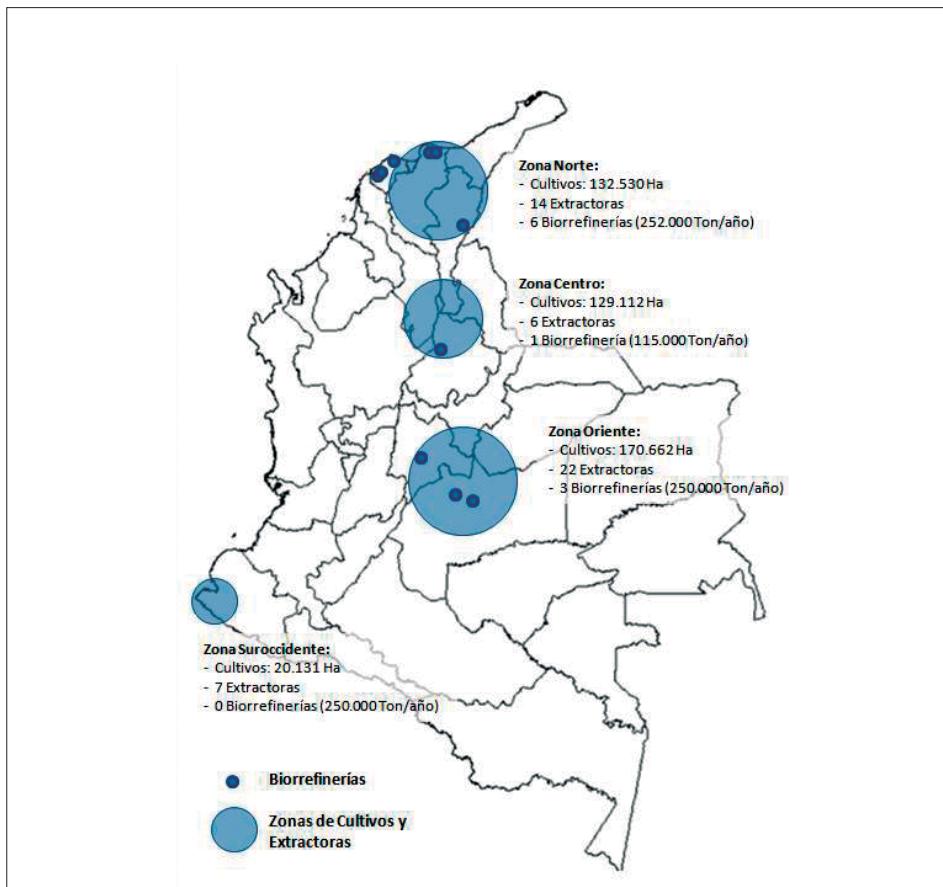


Figura 8. Producción de biodiésel en Colombia.

Fuente: [10].

La segunda zona con mayor área de cultivos de palma es la zona centro, la cual cuenta con 132 530 hectáreas, 14 plantas de extracción y 6 biorrefinerías. En tercer lugar se encuentra la zona centro con 129 112 hectáreas de cultivo, 6 extractoras cercanas y una biorrefinería. Por último, la zona suroccidente tiene 20 131 hectáreas de cultivo y extractora sin biorrefinería. En la figura 9 se presentan la ubicación de cultivos, extractoras y biorrefinerías actuales.



**Figura 9.** Distribución de los cultivos, extractoras y biorrefinerías. Fuente: Los autores.

Los cultivos de palma africana en cada zona del país pueden dividirse en áreas de producción, siendo estas las que tienen producción actualmente y áreas en desarrollo, las cuales son entendidas como cultivos que aún no han iniciado su periodo productivo. En la tabla V se presenta la producción actual y la esperada por proyectos en desarrollo.

Tabla V. Hectáreas cultivadas de palma de aceite			
Zona	Hectáreas		
	Producción	Desarrollo	Total
Norte	100 273	32 257	132 530
Centro	81 631	47 481	129 112
Oriente	113 820	56 842	170 662
Suroccidente	4 229	15 902	20 131

Fuente: [15].

<b>Tabla VI.</b> Capacidades por zonas de las biorrefinerías en Colombia					
Zona	N°	Biorrefinerías	Ubicación	Capacidad (Ton B100/Año)	Total (Ton B100/Año)
<b>Norte</b>	1	Oleoflores	Codazzi	60 000	252 000
	2	Biocomb. Sost. Del Caribe	Santa Marta	100 000	
	3	Romil de la Costa	Barranquilla	10 000	
	4	Biodiésel de la Costa	Gálapa	10 000	
	5	Odín Energy	Santa Marta	36 000	
	6	Clean Energy	B/quilla	36 000	
<b>Centro</b>	7	Ecodiésel	B/bermeja	115 000	115 000
<b>Oriente</b>	8	Bio D	Facatativá	115 000	250 000
	9	Manuelita	San Carlos	120 000	
	10	Biocastilla	Castilla	15 000	

Fuente: [13].

En la tabla VI se presentan las capacidades de las refinerías actuales y las capacidades por zona. La zona norte tiene una capacidad total de 252 000 toneladas de biodiésel por año, conformada por 6 biorrefinerías, mientras la zona oriente tiene una capacidad similar, de 250 000 toneladas por año, pero conformada solo por 3 biorrefinerías. La zona centro cuenta con una sola planta de refinamiento, con una capacidad de 115 000 toneladas por año, y en la zona suroccidente no hay biorrefinerías actualmente, por tanto, se considera de capacidad cero.

Cada una de las zonas tiene una productividad de palma por hectárea, determinada por las condiciones naturales y la edad de los cultivos. La productividad en toneladas de racimos de fruta fresca (RFF) por hectárea por año se presenta en la tabla VII. Adicionalmente, una tonelada de racimo de fruta fresca de palma rinde en promedio 0.958 toneladas de aceite y una tonelada de aceite rinde en promedio 0.203 toneladas de biodiésel puro (B100) [16].

El porcentaje promedio de mezcla de biodiésel-diésel de petróleo es diferente en diferentes zonas de Colombia. En la tabla VIII se presenta el porcentaje de mezcla que aplica para cada departamento.

<b>Tabla VII.</b> Productividad en toneladas por año por zona	
Zona	Ton Rff/Ha-Año
Norte	16.97
Centro	15.07
Oriente	14.67
Suroccidente	14.17

Fuente: [13].

<b>Tabla VIII.</b> Porcentaje de mezcla biodiésel-diésel por departamento	
Departamento	Porcentaje
Guajira	2
Norte de Santander	
Arauca	
Vichada	
Guainía	
Boyacá	8
Cundinamarca	
Casanare	
Meta	
Guaviare	
Vaupés	
Demás departamentos	10

Fuente: [13].

En el modelo matemático se consideran las plantas de mezclado de todo el país, sumando un total de 30 mezcladoras. Estas plantas se distribuyen en siete regiones: norte, noreste, noroeste, suroeste, eje cafetero, centro-oriente y Tolima Grande. En la tabla IX se muestra la distribución de la demanda de combustible diésel por mezcladora y región. Adicionalmente, se considera el porcentaje de demanda que es abastecido por importación que es del 5.5%.

Adicionalmente, se considera un punto de demanda en Barrancabermeja (para un total de 31 puntos de mezcla) donde se realiza una mezcla de diésel con un 2% de biodiésel antes de ser enviado por el poliducto a los demás puntos de mezcla conectados. A este punto se le excluyen las

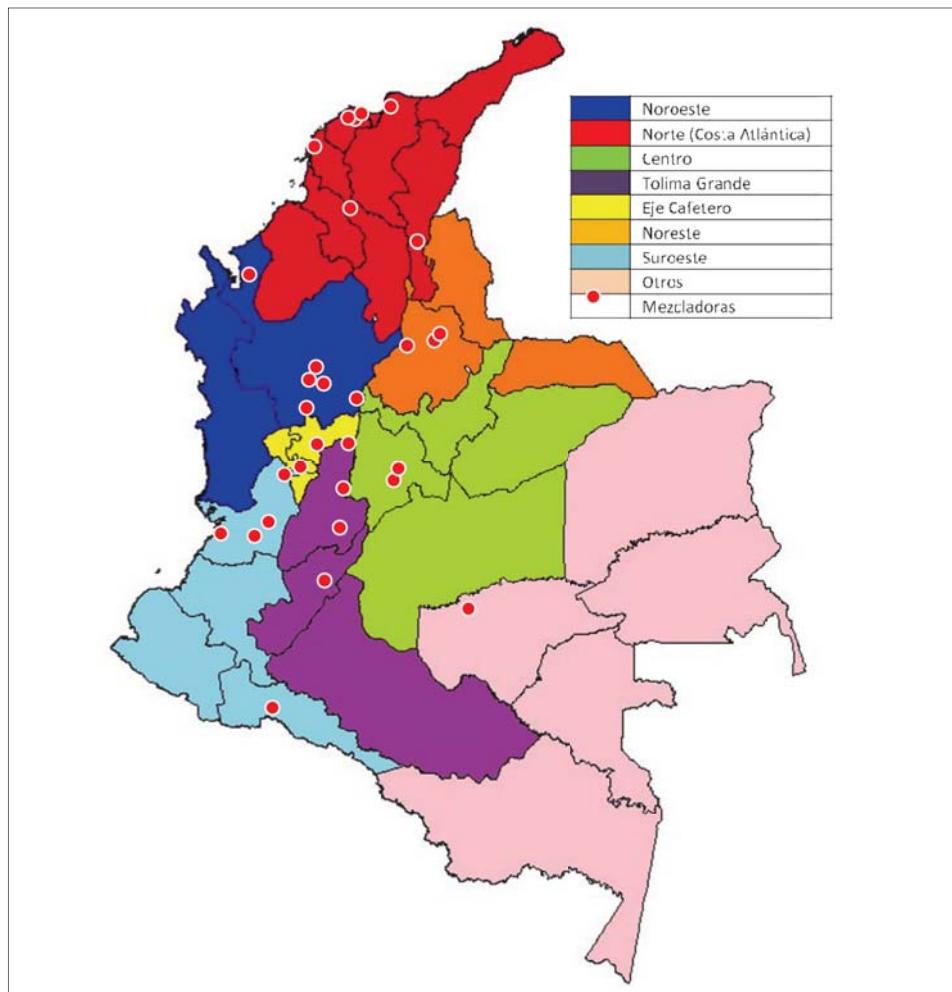
<b>Tabla IX.</b> Distribución de la demanda por mezcladora			
Región	Mezcladora	Porcentaje Demanda	Total
Norte (Costa Atlántica)	Cartagena	8.40 %	21.80 %
	Galapa (Atlántico)	1.90 %	
	San Andrés	0.10 %	
	Siapé (B/quilla)	1.90 %	
	Baranoa (Atlántico)	1.00 %	
	Magangué (Bolívar)	1.40 %	
	Sitio nuevo (Magdalena)	2.70 %	
	La Gloria (Cesar)	4.50 %	
Noreste	Girón	1.10 %	3.20 %
	Chimita	1.10 %	
	B/bermeja	1.10 %	

Noroeste (Antioquia)	Medellín	3.60 %	10.90 %
	La Pintada	1.20 %	
	Rionegro	1.20 %	
	Sebastopol	1.20 %	
	Girardota	1.20 %	
	Turbo	2.40 %	
Suroeste	Guadalajara de Buga	5.90 %	17.70 %
	Yumbo	5.90 %	
	Cartago	3.00 %	
	B/ventura	3.00 %	
Eje Cafetero	Pereira	2.20 %	3.30 %
	Manizales	1.10 %	
Centro-oriente	Bogotá	12.00 %	30.30 %
	Facatativá	17.90 %	
	San José del guaviare	0.40 %	
Tolima Grande	Puerto Asís	1.90 %	7.30 %
	Neiva	3.20 %	
	Gualandai - coello	1.70 %	
	Mariquita	0.60 %	
Importación		5.50 %	5.50 %
Total		100.00 %	100.00 %

Fuente: [13].

demandas de Cartagena, San Andrés y Barranquilla, dado que se abastecen de diésel de petróleo desde otra fuente. La adición del biodiésel restante para completar la mezcla final se realiza directamente en las mezcladoras.

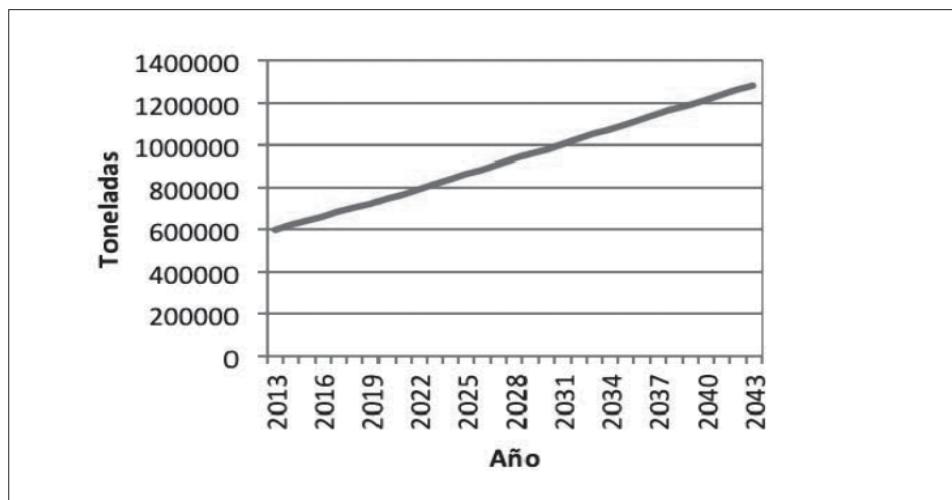
En la figura 10 se presenta la distribución del territorio colombiano en las regiones definidas en la tabla anterior y la ubicación de las mezcladoras. La región denominada “otros” está conformada por departamentos donde no hay mezcladoras y sus estaciones de servicio son abastecidas por mezcladoras de otras zonas. La única mezcladora de la región “otros” es la del San José del Guaviare, pero, dada su cercanía con la zona “centro”, su demanda es considerada dentro de esta zona, dejando la zona “otros” con una demanda de cero y, por tanto, no es considerada en el modelo matemático.



**Figura 10.** Ubicación mezcladoras y regiones de demanda.

Fuente: los autores.

Para la proyección de la demanda de diésel en Colombia se tomó la realizada por [10]. En esta proyección los datos se tomaron a partir de cálculos realizados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), para los veinte primeros años. Esta proyección de demanda de combustibles líquidos combina modelos de series de tiempo, económicos y de optimización. Su aplicación está asociada a la dinámica de su consumo, disponibilidad de información y la prospectiva de desarrollo del mercado de cada energético. Para los siguientes 10 años, [10] aplicó el método de pronóstico de “suavización exponencial con tendencia”, buscando los parámetros que generan un menor error medio cuadrático. En la figura 11 se presenta la proyección de la demanda de biodiésel en Colombia. Seguidamente, se presenta la formulación del modelo matemático.



**Figura 11.** Proyección de la demanda del biodiesel.  
Fuente: [10].

## 6. Modelo matemático

La cadena considerada en el modelo está conformada por cuatro eslabones: zonas de cultivos, extractoras, biorrefinerías y mezcladoras, desde las cuales se abastecen todos los puntos de consumo. Cada zona de cultivo tiene su factor de rendimiento en toneladas de fruto de palma por hectárea por año y puede enviar palma a extractoras de cualquier otra zona. Asimismo, las extractoras pueden enviar aceite de palma a cualquier biorrefinería y desde estas enviar biodiésel a todas las mezcladoras. En cada eslabón de la cadena se considera el factor de conversión de unidades correspondiente.

El modelo propuesto es un modelo de programación lineal entera mixta y determina cuál debería ser el flujo de productos o subproductos, inventarios y capacidades requeridas en cada eslabón de la cadena por periodo durante el horizonte de planeación definido. El modelo también establece un plan de ampliación de capacidad de las biorrefinerías, el cual consta de definir en qué momento se debe instalar una planta de determinada capacidad en cada zona. Se considera que la instalación de una planta de cierta capacidad es equivalente a ampliar una planta ya existente en la misma cantidad.

El objetivo del modelo es minimizar el costo total de la cadena durante un horizonte de planeación. El costo total incluye: el costo de transporte de palma, aceite y biodiésel entre los eslabones de la cadena; el costo de mantenimiento de inventario; los costos de mantenimiento de los cultivos y los costos fijos de instalación de capacidad de las biorrefinerías, incluyendo el costo de uso del capital invertido. La notación utilizada para el modelo se presenta a continuación.

### A. Índices

- $t$ : Año.  
 $m$ : Mezcladoras.  
 $l$ : Biorrefinerías.  
 $k$ : Extractora de aceite.  
 $j$ : Cultivo.  
 $n$ : Tipo (capacidad) de biorrefinería.  
 $p$ : Palma.  
 $a$ : Aceite.  
 $b$ : Bodiésel.  
 $d$ : Diésel mezcla.

### B. Parámetros

- $D_{mt}$ : Demanda de diésel de la mezcladora  $m$  en el año  $t$  (toneladas).  
 $f_j^{hp}$ : Factor de rendimiento (tonelada de fruto de palma / hectárea) en el cultivo  $j$ .  
 $f^{pa}$ : Factor de conversión de palma a aceite (tonelada de aceite / tonelada de palma).  
 $f^{ab}$ : Factor de rendimiento de aceite a biodiésel (tonelada de biodiésel / tonelada de aceite).  
 $f_{mt}^{bd}$ : Factor de rendimiento de biodiésel a diésel en la zona atendida por la mezcladora  $m$  el año  $t$  (toneladas de diésel / tonelada de biodiésel).  
 $CT_{jkt}^p$ : Costo de transporte de palma desde el cultivo  $j$  hasta la extractora  $k$  en el año  $t$  por tonelada.  
 $CT_{lmt}^a$ : Costo de transporte de aceite desde la extractora  $k$  hasta la biorrefinería  $l$  el año  $t$  por tonelada.  
 $CT_{lmt}^b$ : Costo de transporte de biodiésel desde la biorrefinería  $l$  hasta la mezcladora  $m$  en el año  $t$  por tonelada.

$Cd_{l0}^b$ : Capacidad de producción inicial (en toneladas por año) de la biorrefinería  $l$ .

$CF_n^b$ : Costo fijo de instalación de una biorrefinería tipo  $n$ .

$Ck$ : Costo de uso del capital.

$Inc_n$ : Incremento de la capacidad por la instalación de una planta tipo  $n$ .

$h_t^p$ : Costo de mantener en inventario una tonelada de palma durante el año  $t$ .

$h_t^a$ : Costo de mantener en inventario una tonelada de aceite durante el año  $t$ .

$h_t^b$ : Costo de mantener en inventario una tonelada de biodiésel durante el año  $t$ .

$h_t^d$ : Costo de mantener en inventario un galón de diésel durante el año  $t$ .

### C. Variables

$X_{jt}^p$ : Cantidad de palma cosechada en el cultivo  $j$  en el periodo  $t$  (toneladas).

$Q_{jkt}^p$ : Cantidad de palma transportada del cultivo  $j$  a la extractora  $k$  en el año  $t$  (toneladas).

$Q_{klt}^a$ : Cantidad de aceite transportado de la extractora  $k$  a la biorrefinería  $l$  en el año  $t$  (toneladas).

$Q_{lmt}^b$ : Cantidad de biodiésel transportado de la refinería  $l$  a la mezcladora  $m$  en el año  $t$  (toneladas).

$I_{jt}^p$ : Nivel de inventario de palma en el cultivo  $j$  al final del año  $t$  (toneladas).

$I_{kt}^a$ : Nivel de inventario de aceite en la extractora  $k$  al final del año  $t$  (toneladas).

$I_{lt}^b$ : Nivel de inventario de biodiésel en la biorrefinería  $l$  al final del año  $t$  (toneladas).

$I_{mt}^d$ : Nivel de inventario de diésel en el mezcladora  $m$  al final del año  $t$  (toneladas).

$Cr_{jt}^p$ : Capacidad requerida (en hectáreas) en el cultivo  $j$  en el periodo  $t$ .

$Cr_{kt}^a$ : Capacidad requerida (en toneladas de aceite por año) en la extractora  $k$  en el periodo  $t$ .

$Cr_{lt}^b$ : Capacidad requerida (en toneladas de biodiésel por año) en la biorrefinería  $l$  en el periodo  $t$ .

$Cd_{lt}^b$ : Capacidad disponible (en toneladas de diésel por año) en la biorrefinería  $l$  en el periodo  $t$ .

$Cr_{mt}^d$ : Capacidad requerida (en toneladas de biodiésel por año) en la mezcladora  $m$  en el periodo  $t$ .

$Z_{ln}$ : 1 si se instala una planta biorrefinadora tipo (de tamaño)  $n$  en la zona  $l$  en el periodo  $t$ ; 0 de lo contrario.

$IAcum_t$ : Inversión acumulada en instalación de capacidad de biorrefinerías hasta el periodo  $t$ .

#### D. Función objetivo

La función objetivo del modelo de programación lineal entera mixta se presenta en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} \min Costo = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T CT_{jkt}^p Q_{jkt}^p + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T CT_{kl}^a Q_{kl}^a + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T CT_{lmt}^b Q_{lmt}^b \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_t^p I_{jt}^p + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_t^a I_{kt}^a + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T h_t^b I_{lt}^b + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T h_t^d I_{mt}^d \\ & + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T CO^p Cr_{jt}^p + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N CF_n^b Z_{ln} + \sum_{t=1}^T IAcum_t Ck \end{aligned} \quad (1)$$

En los primeros tres términos de la función objetivo (primer renglón) se calcula el costo total de transporte. Este costo corresponde a la multiplicación de la cantidad total transportada de palma, aceite y biodiésel por su costo correspondiente por tonelada. Los siguientes cuatro términos (segundo renglón) calculan el costo de mantenimiento del inventario, el cual resulta de la multiplicación del nivel de inventario de palma, aceite, biodiésel y diésel mezcla por el costo de mantenimiento del inventario de cada uno. El siguiente término calcula el costo de mantener los cultivos por hectárea por la cantidad de hectáreas requeridas en cada zona. Los siguientes dos términos hacen referencia a los costos fijos de instalación de capacidad de las biorrefinerías y al costo de capital asociado a esos costos de instalación.

#### E. Restricciones

1) Restricciones de balance de masa y demanda

$$X_{jt}^p + I_{j(t-1)}^p = \sum_{l=k}^K (Q_{jkt}^p) + I_{jt}^p \quad \forall j, \forall t \quad (2)$$

$$f^{pa} \sum_{j=1}^J (Q_{jkt}^p) + I_{k(t-1)}^a = \sum_{l=1}^L (Q_{klt}^a) + I_{.ik}^a \quad \forall k, \forall t \quad (3)$$

$$f_t^{ab} \sum_{k=1}^K (Q_{klt}^a) + I_{l(t-1)}^b = \sum_{m=1}^M (Q_{lmt}^b) + I_{lt}^b \quad \forall l, \forall t \quad (4)$$

$$f_t^{bd} \sum_{l=1}^L (Q_{lmt}^b) + I_{m(t-1)}^d = D_{mt} + I_{mt}^d \quad \forall m, \forall t \quad (5)$$

2) Restricciones de Capacidad

$$X_{jt}^p \leq f_j^{hp} Cr_{jt}^p \quad \forall j, \forall t \quad (6)$$

$$f^{pa} \sum_{j=1}^J (Q_{jkt}^p) \leq Cr_{kt}^a \quad \forall k, \forall t \quad (7)$$

$$f_t^{ab} \sum_{k=1}^K (Q_{klt}^a) \leq Cd_{lt}^b \quad \forall l, \forall t \quad (8)$$

$$f_t^{bd} \sum_{l=1}^L (Q_{lmt}^b) \leq Cr_{mt}^d \quad \forall m, \forall t \quad (9)$$

3) Incremento de capacidad e inversión asociada

$$Cd_{lt}^b = Cd_{l(t-1)}^b + \sum_{n=1}^N Inc_n Z_{ln} \quad \forall l, \forall t \quad (10)$$

$$IAcum_t = IAcum_{t-1} + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N FC_n^b Z_{ln} \quad \forall t \quad (11)$$

La ecuación (2) representa al balance de masa en los cultivos, donde la cantidad cosechada menos la variación en inventario es igual a la cantidad transportada a las extractoras. Las ecuaciones (3) y (4) corresponden a las ecuaciones de balance de masa en las extractoras y biorrefinerías, donde la cantidad recibida por el factor de conversión menos la variación en inventario es equivalente a la cantidad transportada al eslabón siguiente. La ecuación (5) define el balance de masa en las mezcladoras y asegura el cumplimiento de la demanda. En esta restricción la cantidad de biodiésel que llega a cada mezcladora, por el factor de conversión a diésel mezcla, menos la variación en inventario es equivalente a la demanda de dicha mezcladora.

Por otra parte, las ecuaciones de (6) a (9) aseguran que la cantidad procesada en cada cultivo, extractora, biorrefinería o mezcladora no excede su capacidad disponible. Para el caso de los cultivos, extractoras y mezcladoras se define la capacidad que requiere cada una de estas en cada periodo de tiempo.

La ecuación (10) define la capacidad disponible de las biorrefinerías en cada periodo, la cual depende de la activación, o no, de las variables binarias de instalación de plantas. Por último, la ecuación (11) va acumulando la inversión en ampliaciones de capacidad realizadas hasta cada periodo.

## 6. Resultados

El modelo se aplicó a la cadena productiva de biodiésel de Colombia considerando las cuatro zonas de cultivos y de plantas de extracción presentes, las tres zonas donde se hace la producción del biodiésel y los 31 puntos de mezcla definidos en todo el territorio. Los resultados por categorías de variables se presentan a continuación.

### A. Niveles de producción

El plan de producción de palma, aceite, biodiésel y diésel mezcla para cubrir el total de la demanda nacional de biodiésel se presenta en las figuras 12, 13, 14 y 15, respectivamente. Los resultados del modelo de optimización muestran que la zona suroccidente no debe tener producción de palma ni aceite para la obtención de biodiesel, dado que resulta más económico que las mezcladoras cercanas a esta zona sean abastecidas por la zona oriental.

En la figura 12 se observa que la producción de palma para el 2013 era aproximadamente de 3 000 000 toneladas por año y que en el año 2043 la producción deberá duplicarse (llegar a 6 232 400 toneladas por año) para poder cubrir la demanda. La zona con mayor requerimiento de palma es la zona oriente, con un porcentaje promedio del 44% de la producción total, seguido de la zona centro con una participación del 34.3%

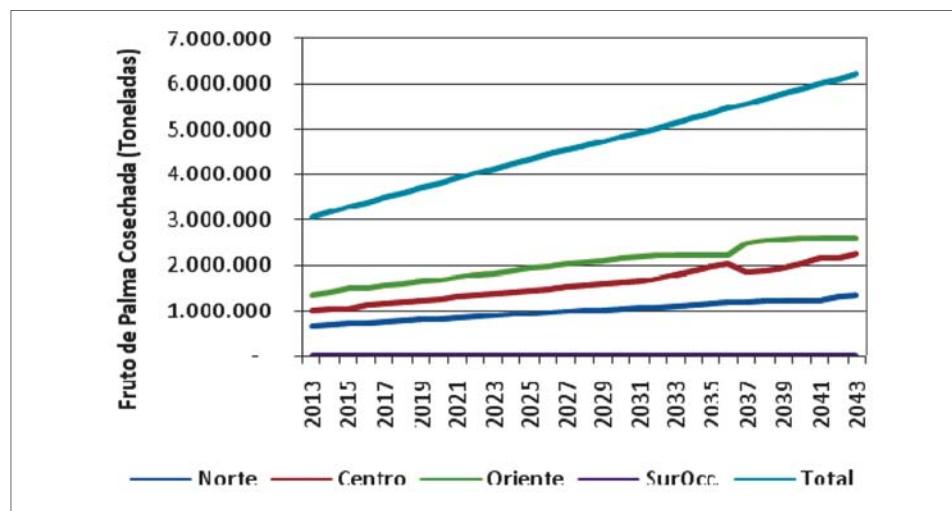
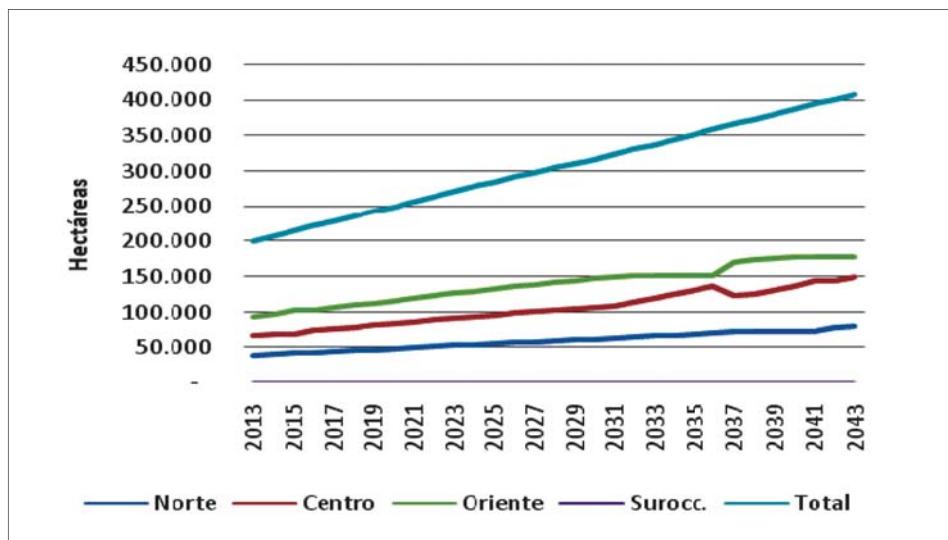


Figura 12. Cantidad total cosechada y por zona.

Fuente: los autores.

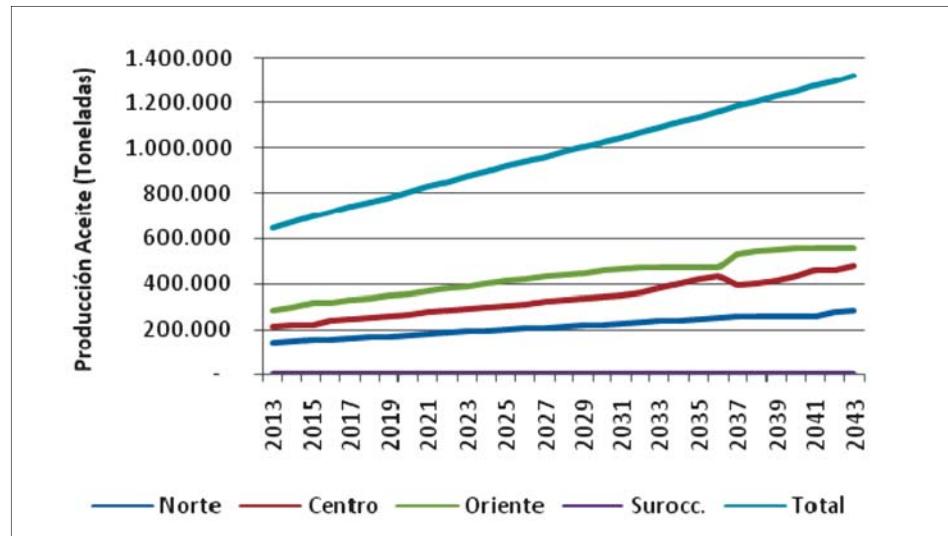


**Figura 13.** Capacidad requerida de hectáreas en total y por zonas.

Fuente: los autores.

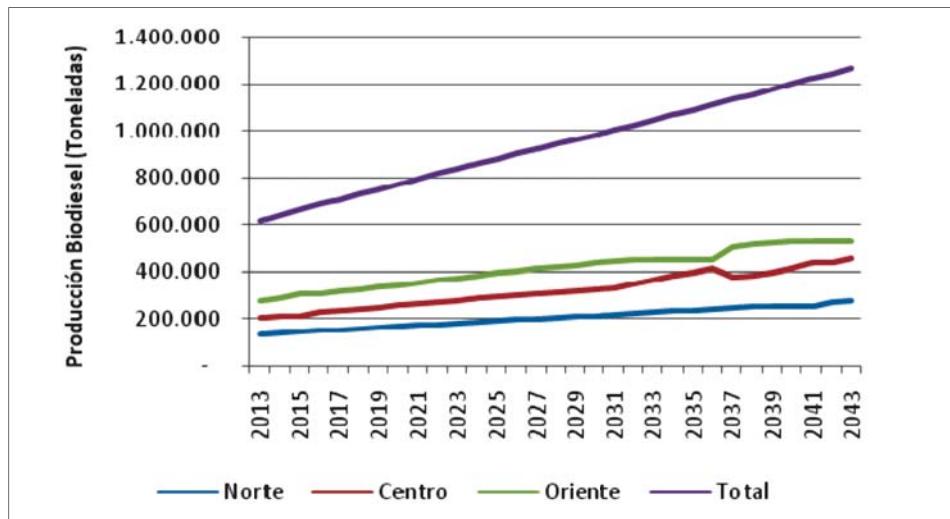
y, posteriormente, la zona norte con un porcentaje del 21.7%. La producción de palma requerida en la zona suroccidental es cero.

La extensión de cultivos para producción de palma requeridos para 2043 alcanza el nivel de 408 154 hectáreas. Los porcentajes de participación promedio de las zonas norte, centro, oriente y suroccidente son: 19.6%, 34.7%, 45.7% y 0%, respectivamente.



**Figura 14.** Producción total de aceite de palma y por zona.

Fuente: los autores.



**Figura 15.** Producción total de biodiésel de palma de aceite y por zona.

Fuente: los autores.

La producción de aceite de palma dirigido a la producción de biodiésel en 2043 alcanza el nivel de 1 321 260 toneladas y los porcentajes de participación de las zonas son comparables a los de producción de palma; 21.7%, 34.3%, 44% y 0% para las zonas norte, centro, oriente y suroccidente, respectivamente.

La producción de aceite de biodiésel en 2043 alcanza el nivel de 1 265 764 toneladas y los porcentajes de participación de las zonas son iguales a la de producción de palma y aceite; 21.7%, 34.3%, 44% y 0% para las zonas norte, centro, oriente y suroccidente, respectivamente.

Cabe señalar que en las figuras 12, 13, 14 y 15 se observa que la producción de palma, aceite, biodiésel y diésel crece de manera constante a lo largo del horizonte de planeación, con excepción de algunos años alrededor del año 2035.

### *B. Plan de ampliación de capacidad*

En la tabla X se presenta el año en que debe instalarse una planta y la capacidad de dicha planta (se presentan únicamente los años donde hay incremento de capacidad). Estos valores también pueden considerarse como la capacidad a ampliar en las plantas ya existentes.

A continuación, se presentan las capacidades disponibles y la producción en cada zona de producción. Los incrementos en la capacidad instalada corresponden a la ampliación de la capacidad de plantas existentes o a la instalación de biorrefinerías nuevas (figuras 16, 17 y 18).

Tabla X. Plan de ampliación de capacidad por zonas			
Año	Ampliación (ton/año)		
	Norte	Centro	Oriente
2013		100	100
2016		60	
2021			100
2022		100	
2034		60	
2037			80
2040		40	
2042	60		

Fuente: los autores.

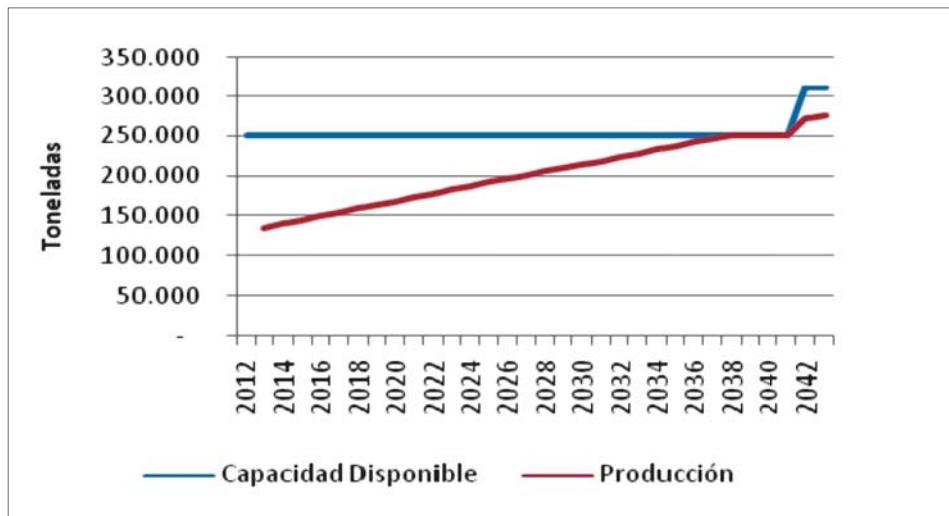
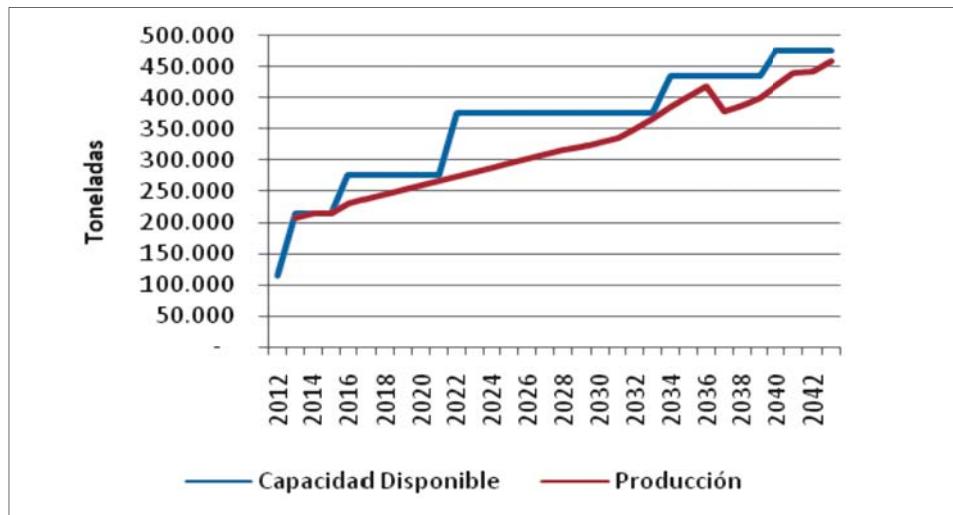


Figura 16. Capacidad disponible y producción de biodiésel en la zona norte.

Fuente: los autores.

La capacidad actual de las biorrefinerías en la zona norte es de 252 000 toneladas por año y esa capacidad es suficiente para cubrir la demanda nacional hasta 2038. A partir de este año, y hasta el 2042, la zona norte deberá ceder parte de su mercado, pues solo hasta ese momento la demanda aumentará lo suficiente como para justificar la creación o ampliación de una planta biorrefinadora en 60 000 toneladas.

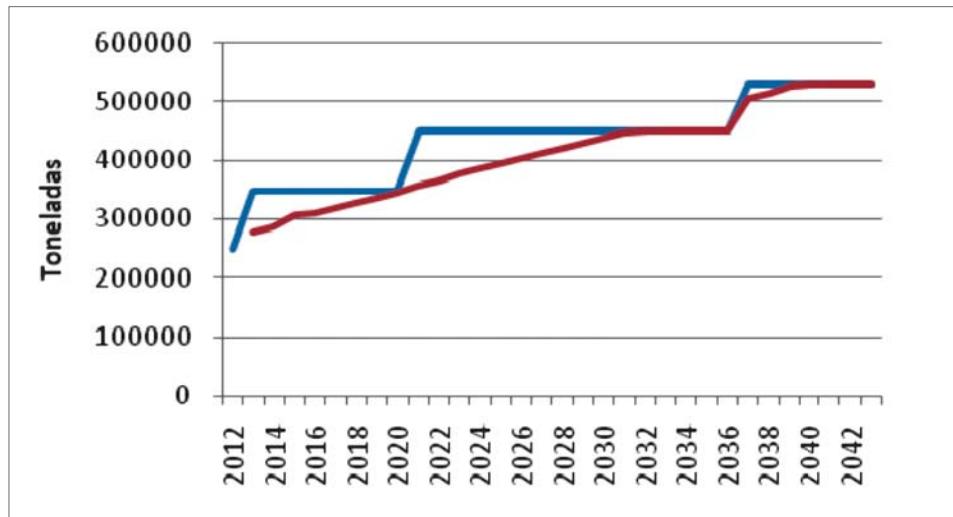
La zona centro tiene una capacidad actual de 115 000 toneladas por año, pero la demanda actual de la zona justifica el aumento inmediato de la capacidad en 100 000 toneladas, y el aumento progresivo de esta hasta alcanzar una capacidad de 475 000 toneladas en el año 2040. Adicionalmente, en la figura se observa una tasa de crecimiento mayor entre los años 2032 y 2036, y una reducción de la producción en el 2037.



**Figura 17.** Capacidad disponible y producción de biodiésel en la zona centro.

Fuente: los autores.

La zona oriente tiene una capacidad actual de 250 000 toneladas de biodiésel por año; sin embargo, a la fecha requiere una ampliación de 100 000 toneladas, y para 2021 y 2037 requerirá ampliaciones de 100 000 y 80 000 toneladas por año, respectivamente. Durante los años 2032 y 2036 la producción no crece debido a que se llega al límite de la capacidad y parte de la demanda de la zona puede ser abastecida por la zona centro hasta que se amplíe la capacidad de la zona oriente.



**Figura 18.** Capacidad disponible y producción de biodiésel en la zona oriente.

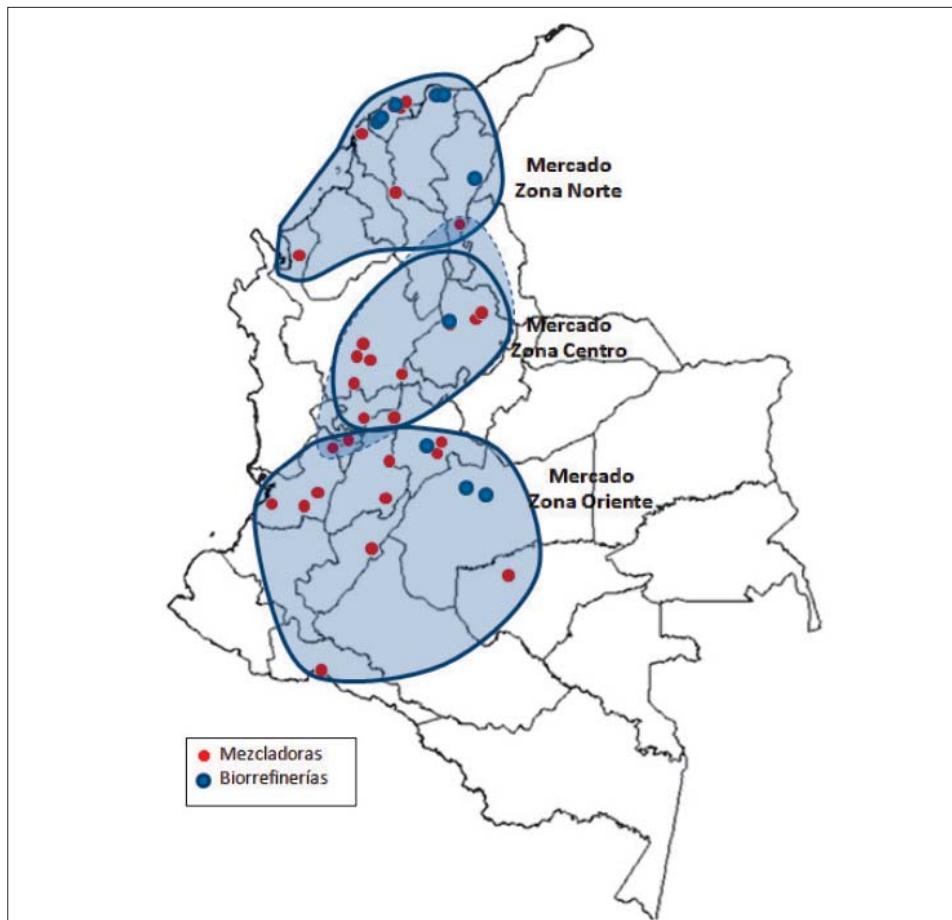
Fuente: los autores.

### C. Plan de distribución

Las variables de flujo, resultantes de la aplicación del modelo, determinan que las biorefinerías de cada zona deben abastecerse de aceite de la misma zona, y las extractoras de aceite deben abastecerse de palma también de la misma zona. El plan de distribución resultante se representa en la tabla XI. La tabla expresa con un “Sí” cuando la mezcladora es abastecida, en la mayoría de los años, por cada zona de producción, ya sea por la zona norte, centro u oriente. Sin embargo, en algunas ocasiones, cuando la zona norte o

Tabla XI. Mezcladoras abastecidas por cada zona					
Mezcladora			Zona Producción Biodiésel		
Nº	Zona Demanda	Ubicación	Norte	Centro	Oriente
1	Norte (Costa Atlántica)	Cartagena	Sí		
2		Galapa (Atlántico)	Sí		
3		San Andrés	Sí		
4		B/Quilla (Siape)	Sí		
5		Baranoa (Atlántico)	Sí		
6		Magangué (Bolívar)	Sí		
7		Sitio Nuevo (Magdalena)	Sí		
8		La Gloria (Cesar)	Sí	Ocasional	
9	Noreste	Girón		Sí	
10		Chimita (S/Der)		Sí	
11		B/Bermeja		Sí	
12	Noroeste (Antioquia)	Medellín		Sí	
13		La Pintada		Sí	
14		Rionegro		Sí	
15		Sebastopol		Sí	
16		Girardota		Sí	
17		Turbo	Sí		
18	Suroeste	Guadalajara De Buga			Sí
19		Yumbo			Sí
20		Cartago		Ocasional	Sí
21		B/Ventura			Sí
22	Eje Cafetero	Pereira		Ocasional	Sí
23		Manizales		Sí	
24	Centro-Oriente	Bogotá			Sí
25		Facatativá			Sí
26		San José del Guaviare			Sí
27	Tolima Grande	Puerto Asís			Sí
28		Neiva			Sí
29		Gualandai – Coello			Sí
30		Mariquita		Sí	

Fuente: Los autores.



**Figura 19.** Mercado asignado a cada zona de producción.

Fuente: los autores.

la zona oriente no tienen capacidad suficiente para abastecer todas las zonas asignadas, la zona centro cubre total o parcialmente la demanda de algunas mezcladoras de estas zonas. En estos casos, la tabla lo expresa con la palabra “Ocasional”. Esta estrategia se presenta gráficamente en la figura 19.

En la región sombreada de la figura 19 se presentan encerradas las mezcladoras abastecidas por las plantas de cada zona de producción. La región encerrada por la línea punteada en la zona centro representa las mezcladoras abastecidas ocasionalmente. Por ejemplo, cuando la capacidad de la zona norte no es suficiente para cubrir todas las mezcladoras asignadas, la zona centro abastece una parte de la demanda de la mezcladora, correspondiente a La Gloria (Cesar). Cuando la zona oriente no tiene la capacidad requerida, la zona centro se encarga temporalmente de abastecer, total o parcialmente, las demandas de las mezcladoras de Pereira y Cartago, mientras la zona oriente aumenta su capacidad.

## D. Costos

El costo total obtenido es de 10.5 billones de pesos durante los 30 años evaluados, siendo el costo de instalaciones el más representativo con una contribución del 83% del costo total, seguido del costo de transporte equivalente al 17%. Los costos se presentan resumidos en la tabla XII.

Tabla XII. Costos obtenidos		
Aspecto	Costo (billones de pesos)	Porcentaje
Costo de Transporte	1.77	17
Costo instalaciones	8.70	83
Costo de inventario	0	0
Total	10.5	100

Fuente: los autores.

El costo de transporte incluye el costo de movilización de palma y aceite interzonas (de una zona a otra), y el de biodiésel desde las biorrefinerías hasta los puntos de mezcla. El costo de instalaciones incluye el costo de mantenimiento de las hectáreas de cultivo por año y el costo de amortización y de capital de las biorrefinerías.

## 7. Conclusiones

Se obtuvo un modelo matemático que permite planificar la distribución de biodiésel y la ampliación de capacidades de las biorrefinerías en la cadena productiva en Colombia, proyectado a una demanda de treinta años. Asimismo, el modelo determina los requerimientos de hectáreas de siembra, toneladas de producción de palma, aceite y biodiésel dentro del horizonte del mismo horizonte de planeación.

De los resultados del modelo se puede deducir que la zona central y oriental requieren aumentos inmediatos en la capacidad de producción de biodiésel para poder cumplir con la demanda de los próximos años, mientras que la zona norte tiene capacidad suficiente para cubrir la demanda nacional hasta el 2042. El exceso de la capacidad actual respecto a la demanda de la zona se debe a que la localización de las biorrefinerías favorece la exportación de biodiésel, por tanto, no se dedica únicamente al mercado local.

El modelo matemático muestra que al inicio del horizonte de planeación evaluado, los incrementos de capacidad deben hacerse preferiblemente con plantas de alta capacidad (100 000 y 80 000 toneladas por año), dado que al alto crecimiento de la demanda en los próximos años hace que las nuevas plantas lleguen a su máxima capacidad en pocos años. Durante los últimos 10 años, se prefiere la ampliación de capacidad mediante plantas más pequeñas (60 000 y 40 000 toneladas por año). Sin embargo, este resultado puede deberse a su cercanía al fin del horizonte de planeación.

Por otra parte, se concluye que la producción de palma y aceite de palma para la producción de biodiésel no resulta atractiva para la zona suroccidente dada la baja demanda de la zona, por tanto, esta producción debe dirigirse a un sector diferente, como el de alimentos o cosméticos.

El modelo determina que no debe almacenarse inventario de biodiésel un año a otro para abastecer la demanda creciente. Cuando la demanda supera la capacidad de producción de una zona, debe ampliarse la capacidad de dicha zona o abastecerse temporalmente de otra zona mientras la demanda alcanza un nivel donde ya se justifique la ampliación de capacidad.

Finalmente, se resalta que el modelo presentado fue aplicado a un escenario base considerando los porcentajes de mezcla actuales en cada zona de demanda. En estudios posteriores se puede aplicar el modelo a diversos escenarios de demanda variando los porcentajes de mezcla y evaluando el impacto en los resultados.

## Referencias bibliográficas

- [1] A. Dufey. *Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable: los grandes temas. Documento de Discusión Número 2 de Mercados Sustentables*. Londres: Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo, 2006.
- [2] J. P. Arístegui, "Los biocombustibles desde la perspectiva del comercio internacional y del derecho de la Organización Mundial del Comercio," *Revista de Derecho (Austral)*, vol. XXII, no. 1, pp. 113-134, julio de 2009.
- [3] J. Orjuela, I. Huertas, J. Figueroa, D. Kalenatic y K. Cadena, "Potencial de producción de bioetanol a partir de caña panelera: dinámica entre contaminación, seguridad alimentaria y uso del suelo," *Revista de Ingeniería*, vol. 16, no. 1, pp. 6-26, 2011.
- [4] M. J. Barón, I. Huertas y J. A. Orjuela, "Gestión de la cadena productiva del biodiésel: una revisión de la literatura," *Ingeniería*, vol. 18, no. 1, pp. 84-117, 2013.
- [5] P. Benjumea, J. Agudelo y L. Ríos. *Biodiésel: producción, calidad y caracterización*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, 2009.
- [6] H. An, W. E. Wilhelm and S. W. Searcy, "Biofuel and Petroleum-based Fuel Supply Chain Research: A Literature Review," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. 3763-3774, 2011.
- [7] T. Krawczyk, "Biodiesel - Alternative fuel makes inroads but hurdles remain". INFORM 7: 800-15.
- [8] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). *Atlas de la Agroenergía y los Biocombustibles en las Américas: II Biodiésel*. Costa Rica: IICA, 2010.
- [9] Fedebiocombustibles, "Cifras Informativas del Sector Biocombustibles". Boletín no. 84 - Marzo 13 de 2013. <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/nota-web-id-488.htm..>
- [10] M. Barón, "Modelo de programación matemática para la cadena productiva del biocombustible biodiésel, en el departamento del Meta," tesis de maestría, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2013.
- [11] J. P. Arístegui, "Los biocombustibles desde la perspectiva del comercio internacional y del derecho de la organización mundial del comercio," *Revista de Derecho (Austral)*, vol. XXII, no. 1, pp. 113-134, julio de 2009.
- [12] Cepal, "Análisis comparativo de patentes en la cadena de producción de biocombustibles entre América Latina y el resto del mundo," en *Memorias Diálogo de Políticas sobre desarrollo institucional e innovación en biocombustibles en América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile: Cepal, pp. 10-17. 2011.

- 
- [13] Fedepalma, "Palma," [Online]. Fedepalma. Disponible en: <http://www.fedepalma.org/palma.htm>. Consultado: enero 20 de 2013.
  - [14] I. Rodríguez, Isaías y J. Orjuela, "Panorama de las políticas y leyes del gobierno colombiano frente a la producción de alimentos agropecuarios y de producción de agrocombustibles," *Estudios en derecho y gobierno*, vol. 2, no. 2, pp.83-98, 2009.
  - [15] SISPA, "Áreas en desarrollo y en producción," [Online]. SISPA. Disponible en: <http://sis-paweb.fedepalma.org/SitePages/areas.aspx>. Consultado: octubre 1 de 2013.
  - [16] Consorcio CUE. *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia*. Medellín: Ministerio de Minas y Energía, 2012.

---

#### **Johan Alexander Aranda Pinilla**

Nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniero industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá). Cursa la Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Actualmente, se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones, en la Universidad Católica de Colombia.

Correo electrónico: [johan.aranda@gmail.com](mailto:johan.aranda@gmail.com)

---

#### **Manuel José Barón Molina**

Nació en Garzón (Huila), Colombia. Es ingeniero industrial de la Universidad Autónoma de Colombia (Bogotá). Cursó la especialización en Gerencia de Negocios Internacionales, de la Universidad Jorge Tadeo Lozano (Bogotá), y la Maestría en Ingeniería Industrial, de la Universidad Católica de Colombia (Bogotá). Actualmente, se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones, en la Universidad Católica de Colombia.

Correo electrónico: [mjbaron@ucatolica.edu.co](mailto:mjbaron@ucatolica.edu.co)

---

#### **Isaac Huertas Forero**

Nació en Bogotá, Colombia. Es estadístico de la Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Obtuvo su título de Maestría en Investigación y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia). Actualmente, se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones en las Universidades Católica de Colombia y Distrital Francisco José de Caldas. Pertenece, en calidad de líder, al grupo GEGI en la Universidad Católica de Colombia (Bogotá).

Correo electrónico: [ihuertas@ucatolica.edu.co](mailto:ihuertas@ucatolica.edu.co)

---

#### **Javier Arturo Orjuela Castro**

Nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniero de alimentos, ingeniero industrial y especialista en ingeniería de producción de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá). Obtuvo su título de maestría en Investigación y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira (Colombia). Es estudiante de doctorado en Ingeniería Industrial y Organizaciones en la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente, se desempeña como profesor en las áreas de Logística e Investigación de Operaciones en varias universidades a nivel de pregrado y posgrado. Es profesor de planta de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Correo electrónico: [jorjuela@udistrital.edu.co](mailto:jorjuela@udistrital.edu.co)