

# METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LA RED DE SUMINISTRO DE BIODIESEL EN COLOMBIA\*

*Édgar Gutiérrez Franco*\*\*

*Ángela Inés Cadena Monroy*\*\*\*

*Jairo Montoya*\*\*\*\*

*Fernando Palacios*\*\*\*\*\*

---

\* Parte del trabajo del primer y del tercer autor fue desarrollado en el marco del proyecto ING-115-2010 Estrategias de Distribución de Productos en Mercados Emergentes (en fase de terminación) con el apoyo del Fondo de Investigación de la Universidad de La Sabana y la Facultad de Ingeniería. Parte del trabajo también fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación Optimización Integral de la Cadena de Abastecimiento de la Palma de Aceite en Colombia, financiado por Colciencias y por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. El artículo se recibió el 16-02-10 y se aprobó el 15-11-11.

\*\* MSc en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, 2008, Bogotá, Colombia. Ingeniero Industrial, Universidad de La Sabana, 2005, Chía, Colombia. Visiting Scholar, Center for Transportation and Logistics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA. Profesor Asistente, Universidad de La Sabana, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos, Centro Latinoamericano de Innovación en Logística. Correos electrónicos: edgar.gutierrez@unisabana.edu.co, edgargutierrezfranco@gmail.com.

\*\*\* Doctor en Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad de Ginebra, Ginebra, Suiza, 2000. Magíster en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, 1989. Bogotá, Colombia. Ingeniera Electricista, Universidad de los Andes, 1979, Bogotá, Colombia. Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Grupo de Investigación en Modelamiento y Análisis Energía Ambiente Economía. Correo electrónico: acadena@uniandes.edu.co.

\*\*\*\* Dr. Hab. en Logística e Investigación de Operaciones, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon y de la Universidad Claude Bernard Lyon 1, Lyon, Francia, 2011. Doctor en Ingeniería Industrial, École Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne, Saint Étienne, Francia, 2005. MSc en Ingeniería Industrial, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, Francia, 2002. Ingeniero Industrial, Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2000. Profesor Asociado, Universidad de La Sabana, Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas. Grupo de Investigación en Logística y Negocios Internacionales. Correo electrónico: jairo.montoya@unisabana.edu.co.

\*\*\*\*\* Doctor en Investigación de Operaciones, Universidad de Texas, Austin, Estados Unidos, 1979. MSc en Ciencias de la Computación, Universidad de Texas, Austin, Estados Unidos, 1972. Ingeniero Electricista, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 1969. Consultor independiente. Correo electrónico: fpalacio2007@gmail.com.

## Metodología de optimización para la toma de decisiones en la red de suministro de biodiesel en Colombia

### RESUMEN

Este artículo propone una metodología de toma de decisiones, basada en modelos de optimización determinísticos y estocásticos, para diseñar la red de suministro de aceite de palma y biodiesel en Colombia. Tiene en cuenta las proyecciones de la tecnología disponible para el parque automotor en escenarios con probabilidades asociadas a la demanda de biodiesel en cada periodo del horizonte de planeación. A partir de un escenario base se determinan la apertura de bio-refinerías, los planes de producción, los flujos óptimos de materia prima y de producto terminado a través de la red, así como el porcentaje de cumplimiento de la demanda. Esta metodología es una herramienta flexible que permite definir las líneas de acción según las condiciones de la red de suministro, apoyando la toma de decisiones a nivel táctico y estratégico.

### Palabras clave:

Biodiesel, red de suministro, optimización, análisis de escenarios, planeación.

Clasificación JEL: M11, C44, C61.

## Methodology of optimization for decision-making in the biodiesel supply network in Colombia

### ABSTRACT

This article proposes a methodology for decision-making based on deterministic and stochastic optimization models to design the network for the supply of palm oil and biodiesel in Colombia. It takes account of the projections of technology available to the transportation sector in scenarios of probabilities associated with the demand for biodiesel in each period of the planning horizon. A base scenario is used to determine the opening of bio-refineries, production plans, optimum flows of raw material and finished products through the network, and the percentage of demand met. This methodology is a flexible tool that allows lines of action to be defined depending on the conditions of the supply network, supporting strategic and tactical decision-making.

### Keywords:

Biodiesel, supply chain, optimization, scenario analysis, planning.

JEL Classification: M11, C44, C61.

## Metodologia de otimização para tomada de decisões na rede de fornecimento de biodiesel na Colômbia

### RESUMO

Este artigo propõe uma metodologia de tomada de decisões, baseada em modelos de otimização determinísticos e estocásticos, para desenhar a rede de fornecimento de azeite de palma e biodiesel na Colômbia. Levando em consideração as projeções da tecnologia disponível para o parque automotor em cenários com probabilidades associadas à demanda de biodiesel em cada período do horizonte de planejamento. Partindo de um cenário base determina-se a abertura de bio refinarias, os planos de produção, os fluxos ótimos de matéria prima e de produto terminado através da rede, assim como a porcentagem de cumprimento da demanda. Esta metodologia é uma ferramenta flexível que permite definir as linhas de ação segundo as condições da rede de fornecimento, apoiando a tomada de decisões a nível táctico e estratégico.

### Palavras chave:

Biodiesel, rede de fornecimento, otimização, análise de cenários, planejamento.

Classificação JEL: M11, C44, C61.

## Introducción

En enero de 2008 tuvo inicio la comercialización de mezcla de biodiesel con diesel de petróleo en una proporción del 5% (B5), y se proyectó un aumento de la proporción de la mezcla al 10% (B10) a partir del año 2010. Colombia enfrenta el reto de avanzar en áreas estratégicas para este sector, entre las que se encuentran: i) la reducción de los costos de producción de los biocombustibles en los puntos más críticos de la cadena productiva y, ii) la diferenciación del producto colombiano con miras a facilitar el acceso a mercados internacionales, en particular incorporando variables para la protección de la seguridad alimentaria. El documento Conpes 3510 (Conpes 3510, 2008) proporciona los lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia e identifica las ventajas y desventajas de la producción de biodiesel. El presente trabajo apoya y profundiza algunas de las recomendaciones centrándose principalmente en:

- La armonización de la política nacional de biocombustibles con la política nacional de seguridad alimentaria;
- La continuación de la política de mezclas de biocombustibles con combustibles fósiles, y
- La construcción de una herramienta que permita identificar el comportamiento de la red de suministro con el fin de tomar decisiones sobre esta bajo el criterio de minimización de costos. La función de costos toma en cuenta la planeación de

cultivos de materia prima, la subutilización de la capacidad instalada de producción en las plantas extractoras de aceite y la producción y distribución de biodiesel.

Para la presente investigación tienen especial relevancia dos trabajos. El primero fue presentado por la UPME (Chahin et al., 2007) y en él se genera un modelo de teoría de juegos con el fin de simular el comportamiento del mercado nacional de biocombustibles frente a cambios en los niveles de mezcla. Sin embargo, de una parte, solo se analiza el caso particular de la palma de aceite, y, de otra, no se estudian las diferentes materias primas aptas para producir biodiesel ni la capacidad de producción de las plantas extractoras de aceite. El segundo trabajo fue presentado por Biofuels Consulting (Biofuels, 2007) y en él se propone un modelo de programación lineal que permite configurar una red de transporte donde los nodos de origen son las plantas de producción de biodiesel y los nodos de destino son las plantas de abasto o mayoristas, identificando además los flujos y niveles de producción de aceite y biodiesel. Ahora bien, dicho trabajo tampoco toma en cuenta el comportamiento de las áreas cultivadas ni los rendimientos de los cultivos en función de la edad de las plantas.

El objetivo del presente artículo es proponer una metodología basada en modelos matemáticos para la estructuración e integración de toma de decisiones relacionadas con la producción de biocombustibles en Colombia, con el fin de coordinar de manera estructurada cada uno de los eslabones que conforman la red de suministro para la producción de biodiesel, uniendo la etapa de producción

agrícola y la de procesos agroindustriales. Los modelos planteados permiten la inclusión de otras materias primas para la producción del biocombustible buscando la eficiencia en los procesos de cultivo y producción. Así mismo, los modelos permiten identificar los planes de producción y los flujos de materia prima y producto terminado, esto con miras a minimizar los costos en que incurren definiendo las actividades para cada uno de los eslabones que conforman la red de suministro. Entre las decisiones a tomar se encuentran:

- La planeación de cultivos de materias primas;
- La planeación de la producción de aceite crudo y biodiesel, y
- La identificación del producto disponible para exportación.

Una vez analizado un escenario base se generan escenarios que tienen en cuenta la ampliación de la capacidad de procesamiento actual en las plantas de extracción y las biorrefinerías, y se identifica el momento del periodo de planeación para poner en marcha las biorrefinerías en los lugares propuestos a partir del escenario base.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera. La primera sección presenta conceptos fundamentales sobre la optimización de redes de suministro industriales y agroindustriales, analizando la literatura científica, y presenta las características de la red de suministro de biodiesel en Colombia. La segunda sección expone las principales consideraciones sobre el problema bajo es-

tudio, en aspectos tales como la demanda de biodiesel, la construcción de escenarios de análisis y los supuestos en el modelo de toma de decisiones. La tercera sección está dedicada a considerar los escenarios analizados en el proceso de toma de decisiones y optimización. La cuarta sección describe la metodología de optimización propuesta e implementada en el análisis. Los resultados numéricos del estudio se presentan en la quinta sección. En la última sección se formulan las conclusiones del trabajo y las perspectivas de investigación.

### **Optimización de las redes de suministro y características de la red de suministro de biodiesel en Colombia**

Por red de suministro o abastecimiento se entiende el conjunto de todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de productos en un mercado específico, actividades que comienzan desde el mismo instante en que se obtienen las materias primas, pasando por uno o varios pasos de transformación, almacenamiento y distribución, hasta llegar como producto final al consumidor (Gunnarsson, 2007; Gunnarsson et al., 2001, 2003 y 2004).

El uso de la investigación de operaciones, y específicamente las técnicas de optimización, han tenido éxito en las últimas décadas en su aplicación a la agroindustria en diferentes países (Weintraub et al., 2006; Epstein et al., 1999; Gunn et al., 1987; Rodríguez et al., 2011a; Plà et al., 2009; Philpott et al., 2001). La aplicación y clasificación de modelos de planificación en este sector es ampliamente

detallada por Ahumada et al. (2009) y Martell et al. (1998): Ahumada et al. presentan su relevancia para la toma de decisiones y sus implicaciones en la salud de las personas; Martell et al., por su parte, muestran los retos y oportunidades de la agroindustria con la utilización de la investigación de operaciones.

En el sector agroindustrial, las decisiones que se apoyan en modelos de programación matemática incluyen principalmente: decisiones estratégicas, que involucran el manejo a largo plazo de cosechas y plantaciones con el objetivo de maximizar la producción agroindustrial sostenida preservando el medio ambiente (Quariguasi et al., 2006); decisiones tácticas, de mediano plazo, que se preocupan principalmente del secuenciamiento y definición de las áreas a cosechar y los caminos a construir para satisfacer una demanda estimada; y, por último, decisiones de tipo operativo, de corto plazo, que tienen que ver con decisiones de transporte diario, programación de recolección de las cosechas y programación de maquinaria. El manejo de bosques (Weintraub et al., 1996, 2002 y 2006; Carlsson et al., 2006 y 1999), el manejo de cosechas (Gunnarsson, 2007; López et al., 2006), la industria de animales para consumo humano (Rodríguez et al., 2009, 2011a y 2011b; Plà, 2007 y 2010; Plà et al., 2003, 2004 y 2010; Ezcurra et al., 2011; Marin et al., 2005) y la industria de bebidas y alimentos (Wagner et al., 2005) han sido ampliamente estudiados y trabajados desde el punto de vista de la modelación matemática. El desarrollo de la industria forestal chilena en Latinoamérica, Estados Unidos y varios países europeos, por ejemplo, está sólidamente soportada en herramientas cuantitati-

vas que utiliza la industria para sus procesos de toma de decisiones, cubriendo toda la red de suministro.

El presente estudio tiene como principal objetivo abordar la optimización de la red de suministro de biodiesel en Colombia, desde el punto de vista táctico-estratégico. Uno de los puntos clave a considerar es el de la identificación del momento de puesta en marcha de las biorrefinerías dado un conjunto de localizaciones. Van Roy y Erlenkotter (1982) abordaron los problemas de localización de colegios a través de modelos de programación lineal entera mixta que permiten cerrar y reducir el tamaño de las localidades abiertas. Así mismo se quiere dar lineamientos para la planificación de las cosechas y la recolección del fruto de palma de aceite para su transformación en aceites o biodiesel. Entre los trabajos sobre la planificación, administración y optimización de redes de suministro se destacan aquellos realizados por Geoffrion (1974 y 1982), Cohen et al. (1993), Kalenatic et al. (2010 y 2011), López et al. (2011) y Shapiro et al. (2001 y 2004), en los cuales se presentan varios modelos para la optimización de la gestión de la cadena en producción. Goetschalckx et al. (2002) presentan una extensa revisión de la literatura técnica sobre optimización de redes de suministro y sus variados campos de aplicación.

Los modelos matemáticos de optimización se han aplicado a una serie de industrias de procesos que incluyen, entre otras, operaciones relacionadas con la recolección de fruto de palma de aceite (Gutiérrez et al., 2008), la distribución de alimentos (García et al., 2007), la industria alimentaria (Ahumada

et al., 2009; Graham, 2011) y la industria siderúrgica (Gutiérrez et al., 2010). Se destacan los trabajos de Neiro y Pinto (2004) y de Othman (2008), en donde se describe un marco general para modelar una red de suministro de petróleo por medio de un programa no lineal entero mixto, en el cual la estructura de la red se crea mediante la conexión de tres modelos básicos: un modelo para el abastecimiento de crudo, un modelo para la operación de la refinería y un modelo para los oleoductos. La función objetivo planteada no incluye sanciones por demanda insatisfecha ni por atraso en la entrega del producto final, lo cual significa que la satisfacción del mercado no es considerada en el modelo. En el trabajo de Arntzen (1995) se presenta un modelo de programación entera mixta multi-periodo y multi-producto para optimizar una cadena de abastecimiento global. Goetschalckx et al. (2002) adelantan una revisión enfocada en la aplicación de modelos de programación matemática para el diseño de estrategias de decisión y mejora de sistemas logísticos globales.

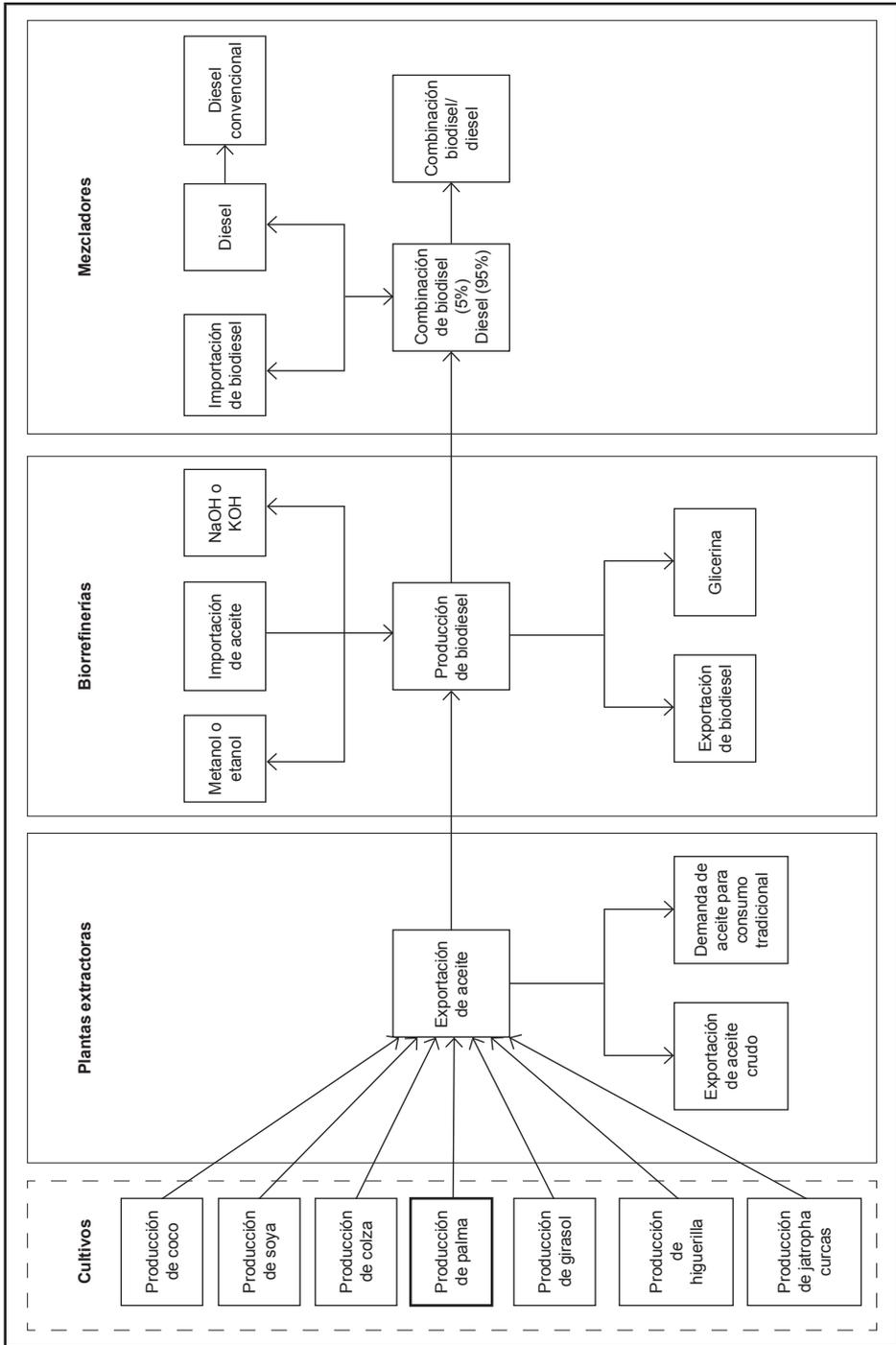
Para el caso particular de la red de suministro de biodiesel en Colombia, la gráfica 1 muestra un esquema donde se identifican los siguientes eslabones: cultivo de materias primas, plantas extractoras, biorrefinerías y mayoristas o mezcladores. Actualmente, en Colombia la producción de biodiesel se realiza a partir de aceite de palma debido principalmente a la gran diferencia en el rendimiento de producción para convertirse en biodiesel y a la poca producción y desarrollo de infraestructura para la obtención de otras materias primas. La gráfica 2 muestra las etapas que se siguen para la producción de

aceite crudo de palma para uso tradicional y para producción de biodiesel.

## **Consideraciones sobre el problema**

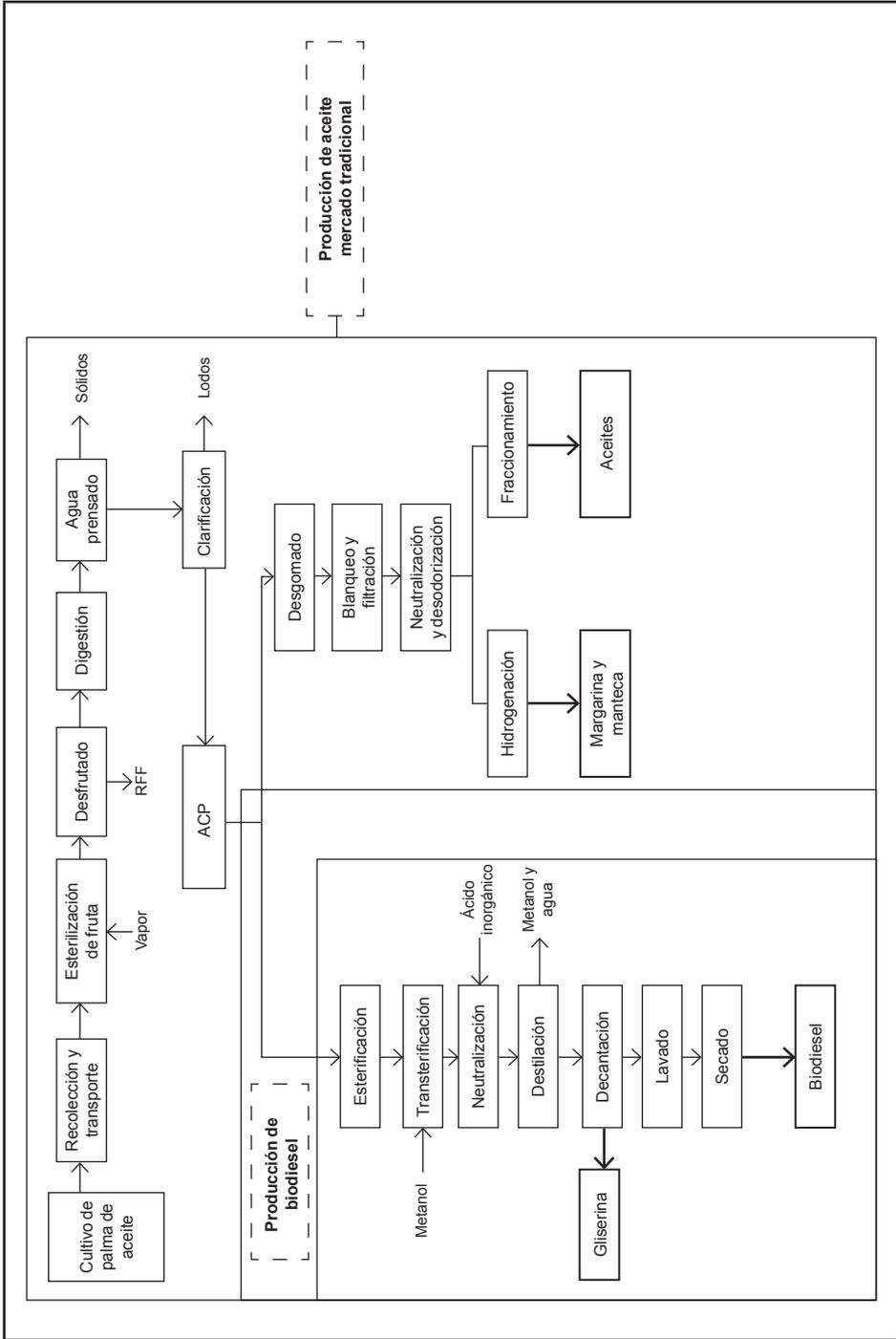
El problema del suministro de biodiesel se puede formular a partir de un esquema de red de abastecimiento, donde se quiere identificar la manera de coordinar el flujo y la producción de las materias primas y los productos terminados entre los eslabones que conforman la red de suministro para la satisfacción de la demanda de un mercado específico, esto teniendo en cuenta un conjunto de restricciones en cada uno de los eslabones que conforman la red. Las decisiones a tomar en el diseño y gestión de redes de suministro pueden ser de nivel estratégico, táctico u operativo. Para el caso bajo estudio, las decisiones estratégicas corresponden a la planeación de cultivos de palma de aceite y a la identificación de los lugares y el momento para la localización y puesta en marcha de las plantas de extracción y las biorrefinerías. Las decisiones tácticas y operativas se refieren a decisiones de corto y mediano plazo concernientes a los procesos logísticos y de producción: las áreas a cosechar, las cantidades de materia prima necesaria para satisfacer la demanda final de biodiesel, el inventario de materia prima en cada uno de los eslabones de la red, la producción de biodiesel y el flujo de transporte entre productores, biorrefinerías y mayoristas o mezcladores. Es importante destacar que respecto del problema citado existen diversas fuentes de incertidumbre, entre las cuales cabe señalar: precios de la materia prima y productos finales, plagas o enfermedades que afectan los cultivos, y demanda de los productos finales, entre

Gráfica 1  
Red de suministro para producción de biodiesel



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 2  
Etapas del aceite crudo de palma



Fuente: elaboración propia.

otros. En este contexto, el estudio aquí desarrollado analiza la toma de decisiones bajo incertidumbre por concepto de la demanda de biodiesel, considerando que la demanda en el tiempo puede modelarse mediante un conjunto de escenarios con distintas probabilidades asociadas.

### ***Demanda de biodiesel en Colombia***

En estudios realizados por la Agencia Internacional de Energía (EIA) se muestra que el crecimiento del mercado de los biocombustibles está asociado con la demanda de combustibles fósiles, que a su vez depende de factores como el crecimiento económico, los desarrollos tecnológicos y la implementación de medidas dado el cambio climático, entre otros. El documento Conpes 3510 determina: “Colombia no es, ni puede ser, ajena a la tendencia mundial del mercado de crudo y sus derivados. Este hecho abre espacio para la producción de bienes, como es el caso de los biocombustibles, que permitan diversificar la canasta energética disponible en el mercado local y que puedan ser exportados al mercado internacional”. En Colombia, la producción de biodiesel empezó en enero de 2008 con una capacidad de 86.000 toneladas al año, con la expectativa de que a partir de 2009 se tuviera una capacidad instalada de 696.000 toneladas para atender la demanda del país (Conpes 3510). La estimación de la demanda nacional de biodiesel está determinada por la política de mezclas descrita en el documento Conpes; estos pronósticos se basan en las estimaciones de demanda de los combustibles fósiles realizadas por la UPME. La asignación de la demanda a cada uno de los mayoristas se hizo de acuerdo con la

participación mostrada en el estudio realizado por Biofuels Consulting (Biofuels, 2007).

### ***Construcción de escenarios alternativos***

Según la demanda proyectada por el Conpes y la capacidad de producción planificada para los próximos años, aproximadamente a partir del año 2012 se generará una demanda insatisfecha de biodiesel debida a la falta de capacidad instalada; es así como se ha estructurado un escenario base que toma estas características para identificar una configuración eficiente bajo dichas condiciones. Los resultados de este modelo como escenario base abren la posibilidad de crear escenarios alternativos que contemplen variaciones en la demanda y ampliaciones en las capacidades instaladas de producción en las plantas extractoras y las biorrefinerías. Según el Decreto 2629 de 2007, el porcentaje de mezcla para los años 2008 y 2009 se fijó en el 5%, destinado a aumentar a un 10% a partir de 2010; estas estimaciones para la demanda de biodiesel son realizadas por la UPME. Los porcentajes de mezcla y la demanda de biodiesel están estipulados en el documento Conpes 3510 y fueron tomados para la construcción de un escenario base en la presente investigación. El mismo decreto estipula que a partir del 1° de enero de 2012 el parque automotor que requiera para su funcionamiento combustible diesel deberá estar acondicionado para que sus motores utilicen como máximo una mezcla B-20. Adicionalmente, desde el 16 de agosto de 2007 se han realizado pruebas en buses de Transmilenio con mezclas del 5%, el 10%, el 20%, el 30% y el 50%, lo cual sugiere la posibilidad de

aumentar el porcentaje de mezcla por encima del 20%. Bajo estas posibilidades cabe generar una serie de escenarios, los cuales pueden ser definidos como la representación de la posible evolución del sistema hacia un estado futuro. Para el caso de estudio, estos escenarios representarían una situación hipotética en función de una demanda diferente para determinadas mezclas de biodiesel. Se establecieron entonces tres escenarios posibles: bajo, medio y alto, los cuales tienen una probabilidad de ocurrencia para cada periodo de tiempo y para cada región. Estos escenarios fueron construidos variando el porcentaje de mezcla de biodiesel con diesel convencional de acuerdo a las proyecciones del parque automotor para los próximos años.

### **Principales supuestos y consideraciones para la formulación de un modelo de optimización**

Supuestos generales:

- El modelo no tiene en cuenta cómo es afectado el precio del ACP destinado al mercado tradicional por la producción de biodiesel, ni el impacto del aumento de los cultivos en el precio de otro tipo de alimentos que se podrían sembrar en tierras destinadas a la producción de palma de aceite.
- Colombia no tiene una posición dominante como productor de aceite crudo de palma en el mercado internacional, por lo que no tiene influencia significativa sobre el precio y está supeditado a las decisiones de los productores con mayor participación

en el mercado, los cuales inciden de manera decisiva en el precio local del aceite.

- Se considera un periodo de planeación por años, cuyo horizonte es el lapso de tiempo 2008-2019, que corresponde a las proyecciones de la demanda de biodiesel presentadas en el documento Conpes 3510.
- El modelo que se propone en este trabajo parte del supuesto de que los proyectos de montaje de biorrefinerías ya tienen estructurado un estudio de factibilidad técnica y financiera, incluyendo en la estructura de la red de suministro los nueve proyectos de biodiesel presentados.
- El modelo asume que, una vez satisfecha la demanda interna de ACP y biodiesel, los excedentes quedan disponibles para exportación; es decir, no se realiza un estudio de los potenciales compradores internacionales y sus respectivos mercados.
- Se asume que las mezclas de biodiesel/diesel descritas vía decreto por el gobierno son de carácter obligatorio para todo el territorio nacional.
- El modelo no contempla los efectos medioambientales por la producción de biodiesel.

*Eslabón de cultivos de materias primas.* El modelo es válido en presencia de diferentes tipos de materia prima, aunque en el caso de estudio solo se considera el fruto de la palma de aceite para producir biodiesel y aceite para consumo tradicional. Las áreas actua-

les destinadas a producción y desarrollo son tomadas como información de entrada; se asume que en las áreas en desarrollo la palma se encuentra entre los tres primeros años de vida, arrojando rendimientos menores que en las áreas en producción, en las cuales las plantaciones tienen entre 4 y 20 años de vida: en efecto, el rendimiento de aceite es proporcional a la edad de la palma.

De otra parte, se asume que las áreas disponibles para nuevos cultivos se encuentran adecuadas para la siembra y poseen los recursos necesarios para el establecimiento de los mismos (disponibilidad de agua, calidad del suelo, etc.).

*Eslabón de plantas extractoras de aceite.* Colombia cuenta con más de cincuenta plantas de extracción que han sido agrupadas y descritas en cuatro zonas por Fedepalma; para este eslabón se identifica la producción de aceite crudo disponible para exportación, para la producción de biodiesel y para la elaboración de aceite destinado al mercado tradicional. Para este último mercado se asume una demanda país tomada de las proyecciones de Fedepalma.

*Eslabón de biorrefinerías.* El modelo considera la importación de aceite de soya para la producción de biodiesel, asumiendo que las plantas productoras pueden procesar aceite crudo de palma y soya previamente homogeneizado. Las localizaciones de las biorrefinerías son consideradas como información de entrada del modelo, el cual define el inicio de operaciones de las mismas y los flujos entre estas y los mayoristas.

*Eslabón de mayoristas o mezcladores.* La mezcla de biodiesel con diesel convencional es realizada por los mayoristas para su posterior comercialización en el sector transporte; en caso de presentarse demanda de biodiesel insatisfecha se asume que esta es cubierta con diesel convencional. Para efectos del análisis, los mayoristas se encuentran agrupados en cuatro regiones consumidoras. La demanda de los mayoristas agrega el 5% de la demanda necesaria para realizar la mezcla con diesel convencional.

*Costos.* Los costos a lo largo del periodo de planeación se consideraron como parámetros que siguen una distribución normal con una desviación del 10% sobre la media, de acuerdo con los costos del documento “Actualización de Costos de Producción de Aceite de Palma” (2005) de Fedepalma. Los costos de transporte se tomaron con base en las tablas de fletes del Ministerio de Transporte y en la Resolución 181661 de octubre de 2007 del Ministerio de Minas y Energía. La variación de estos costos durante el periodo de planeación se realizó siguiendo una distribución normal con una desviación del 30% sobre la media.

*Precios.* La variación del precio del biodiesel y el diesel durante el periodo de planeación fue proyectada con base en los porcentajes previstos por la EIA tomando como referencia el precio actual del diesel y del biodiesel establecido por Ecopetrol. El precio del biodiesel se proyectó con base en el comportamiento del diesel ya que, de un lado, no se encontró información respecto de aquel pero, de otro, existe una alta correlación entre los mismos. De igual manera, el precio de importación y

exportación del biodiesel fue proyectado con base en los porcentajes previstos de variación, tomando como referencia el precio del biodiesel en ARA presentado en el F.O. Licht's World Biodiesel Price Report (Vol. 2). El modelo no contempla el efecto producido por las operaciones realizadas por el Fondo de Estabilización de Precios del sector palmero en Colombia ni el efecto de la producción de biodiesel sobre el precio de los demás energéticos.

### **Descripción y formulación de los modelos de optimización**

Los modelos tienen en cuenta el ciclo de vida de los cultivos de materia prima, así como los procesos industriales para la producción de aceite crudo y biodiesel. Cada uno de los modelos determina los planes de producción y los flujos óptimos de materia prima y producto terminado. Igualmente, los modelos permiten determinar el cumplimiento de la demanda de los mezcladores o mayoristas de biodiesel con diesel tradicional para cumplir los porcentajes de mezcla definidos por un planificador central para periodos anuales. Esto con el objetivo de seleccionar el mejor uso de los recursos disponibles a lo largo del periodo de planeación. Una vez analizados los resultados para el escenario base se hace una formulación que permite la ampliación de la capacidad de procesamiento para las plantas de extracción y las biorrefinerías, y se prueban diferentes escenarios de demanda de acuerdo a las proyecciones para el parque automotor. A continuación se realiza una descripción de los escenarios analizados.

*Escenario base.* Los valores de referencia son calculados a partir de un modelo de progra-

mación lineal entera mixta que permite determinar el comportamiento de la cadena de abastecimiento a partir de la configuración de plantas extractoras y biorrefinerías propuestas en los documentos consultados. Los resultados de este escenario abren la posibilidad de realizar otros análisis tales como los referidos a la ampliación de la capacidad en las plantas extractoras y las biorrefinerías y a la posibilidad de ocurrencia de una demanda estocástica de acuerdo a la tecnología del parque automotor en los años del horizonte de planeación.

*Escenario de ampliación de capacidades para la demanda de los escenarios base, alto, medio, bajo y promedio.* Es un modelo de programación lineal entera mixta que tiene como fin determinar las ampliaciones de la capacidad instalada en las plantas de extracción y las biorrefinerías para los escenarios planteados con base en las proyecciones del parque automotor; además se busca identificar la ampliación necesaria para el escenario base y se prueba una demanda promedio construida con los tres escenarios propuestos y la probabilidad de ocurrencia de los mismos.

*Escenario de ampliación de capacidades con demanda estocástica.* Es un modelo de programación lineal entera mixta estocástica bi-etapa, que se utiliza para la identificación del comportamiento de la cadena de abastecimiento bajo escenarios de incertidumbre. La primera etapa tiene en cuenta el área de palma de aceite que se debe cultivar y la producción de aceite crudo de palma como variables determinísticas; la segunda etapa identifica la producción de biodiesel y la ampliación de la capacidad necesaria tanto en las plantas de extracción como en las biorrefinerías pa-



ra cada uno de los escenarios generados por una demanda estocástica durante el horizonte de planeación. En la gráfica 3 se presenta la metodología para la formulación y el análisis de los modelos matemáticos.

### Metodología para el análisis y la definición de escenarios para el modelo de programación lineal estocástica bi-etapa

La programación estocástica es utilizada en el marco del análisis de redes de suministro para tareas de planificación y toma de decisiones porque permite analizar las incertidumbres y controlar algunos de los riesgos posibles. Se trata de situaciones en las que algunos o todos los parámetros del problema de optimización se describen como variables aleatorias y no como cantidades determinísticas. La programación estocástica, también conocida como análisis de escenarios, es la técnica utilizada en el presente estudio, y consiste en dos etapas. Un modelo de programación lineal estocástica es un modelo lineal en el cual uno o algunos de los parámetros pueden ser considerados inciertos. En general un modelo de programación lineal de dos etapas puede formularse (Birge y Louveaux, 1997) como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } C^T x + E_w Q(x, w) \\ & \quad Ax = b \quad \text{donde} \\ & \quad x \geq 0 \\ Q(x, w) = & \min d_w^T y \\ & \quad T_w x + W_w y = h_w \\ & \quad y \geq 0 \end{aligned}$$

Aquí  $E_w$  es el valor esperado y  $w$  denota un escenario o una respuesta posible con su respectivo espacio de probabilidades  $(\Omega, P)$ . Las

variables del vector  $x$  representan las decisiones de la primera etapa. Estas decisiones son tomadas antes de que las salidas o resultados de los eventos aleatorios  $w$  sean observados, y son representadas por el vector  $y(w)$  que corresponde a las variables de la segunda etapa. Se puede considerar una distribución discreta  $P$  de la siguiente manera:

$$E_w Q(x, w) = \sum_{w \in \Omega} p(w) Q(x, w)$$

A partir de lo anterior se puede formular un modelo de programación lineal que se convierte en un problema determinístico equivalente:

$$\begin{aligned} & \text{Min } C^T x + \sum_w p(w) d_w^T y_w \\ & \quad Ax = b \\ & \quad T_w x + W_w y_w = h_w \\ & \quad x \geq 0; y_w \geq 0 \end{aligned}$$

La función objetivo contiene un término determinístico  $C^T x$  y el valor esperado de la función objetivo de la segunda etapa es  $\sum_w p(w) d_w^T y_w$ . Para cada escenario  $w$  el valor del vector  $y(w)$  es la solución de un modelo de programación lineal. Las primeras restricciones se refieren al problema determinístico, mientras que las segundas se establecen para cada escenario  $w$ . La sucesión de eventos en este modelo es la siguiente: primero, el decisor implementa las decisiones de la primera etapa (vector de variable  $x$ ), segundo, el sistema es sometido al proceso aleatorio descrito por  $(\Omega, P)$ , lo que se traduce en diferentes escenarios  $w \in \Omega$ , que sirven de apoyo para la toma de decisiones teniendo en cuenta los posibles resultados de acuerdo al comportamiento de los elementos aleatorios modelados en la segunda etapa.

## *Análisis y definición de escenarios*

El modelo matemático presentado en este artículo genera diferentes resultados a partir de combinaciones realizadas entre los escenarios alto, medio y bajo, dados para cada región y para cada periodo de tiempo; el número total de escenarios resultantes está dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Número de escenarios generados} = (\text{Número de escenarios dados})^{\text{Número de demandantes}}$$

Colombia posee diez regiones demandantes o mayoristas, y los escenarios generados con estos mayoristas para cada periodo de tiempo son: *Número de escenarios generados*:  $3^{10} = 59.049$  escenarios.

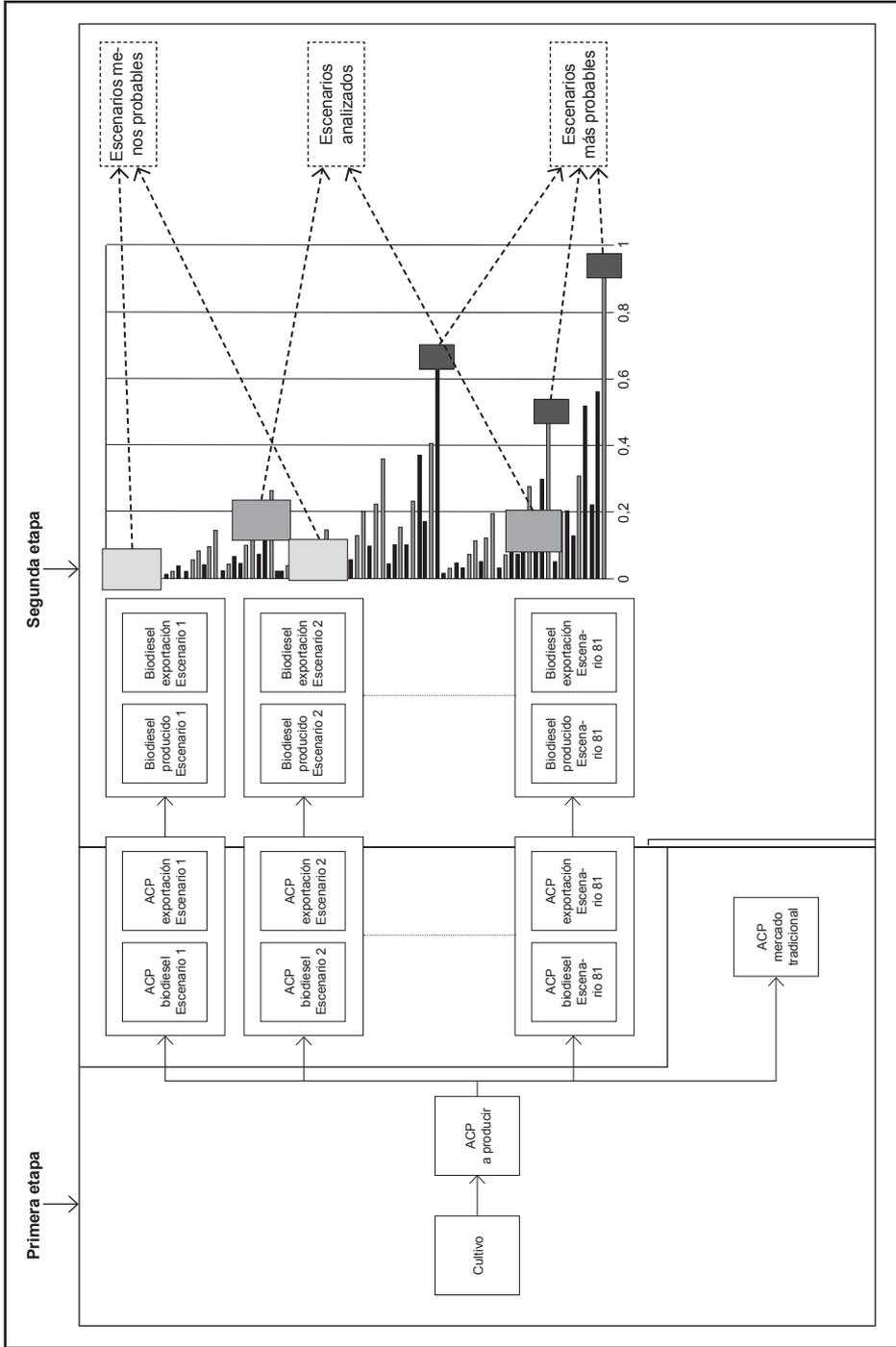
El tiempo de cálculo computacional para solucionar el modelo con los 59.049 escenarios generados superó las 72 horas, por lo cual se decidió agrupar el número de demandantes en cuatro grandes grupos de mayoristas con el fin de alcanzar tiempos manejables para el análisis.

$$\text{Número de escenarios generados: } 3^4 = 81 \text{ escenarios para cada periodo de planeación}$$

Cada uno de los escenarios generados tiene asociada una probabilidad de ocurrencia. Se debe tener en cuenta que la adecuación del parque automotor para el uso de mezclas superiores al 5% implica un esfuerzo técnico y económico por parte de los fabricantes, razón por la cual la probabilidad de ocurrencia de escenarios con mezclas superiores es baja. En otros términos, es mayor la probabilidad de demanda del escenario bajo y menor la del

escenario alto. Así mismo, la probabilidad de ocurrencia de la demanda depende en cada caso de la región de consumo, por lo cual se asignó una mayor probabilidad a las regiones con mayor participación en el consumo nacional de diesel. Estos escenarios se construyeron con el fin de analizar el comportamiento de la red de suministro bajo eventuales cambios en el parque automotor. Una vez conocidas las distribuciones de probabilidad de los escenarios dados, se buscó determinar todas las posibles combinaciones de dichos escenarios para cada mayorista y para cada periodo de planeación. Los escenarios resultantes se denominan escenarios conjuntos. La demanda de cada uno de estos escenarios conjuntos tiene asociada una probabilidad de ocurrencia. Las probabilidades son independientes, por lo que para calcular la probabilidad conjunta de un escenario específico se multiplica la probabilidad de ocurrencia de cada una de las demandas que lo conforman. En total, se identificaron 81 escenarios con las demandas y probabilidades correspondientes para cada uno de los periodos de planeación. La gráfica 4 muestra el esquema seguido para la elaboración y el análisis de un modelo de programación lineal entera mixta estocástica bi-etapa para la planificación de la red de suministro. Bajo este enfoque se buscó identificar el comportamiento de la cadena a largo plazo. La primera etapa tuvo en cuenta el área que se debe cultivar en la tierra disponible para cada una de las materias primas y la cantidad de ACP a producir; la segunda etapa identificó la ampliación de capacidad necesaria tanto en las plantas de extracción como en las biorrefinerías para la producción de ACP y biodiesel. El criterio utilizado para la selección de los escenarios a

Gráfica 4  
**Generación de escenarios para un año, en el modelo de programación lineal entero mixto estocástico bi-etapa**



Fuente: elaboración propia.

analizar fue el mínimo costo obtenido durante todo el horizonte temporal de planeación y en cada periodo.

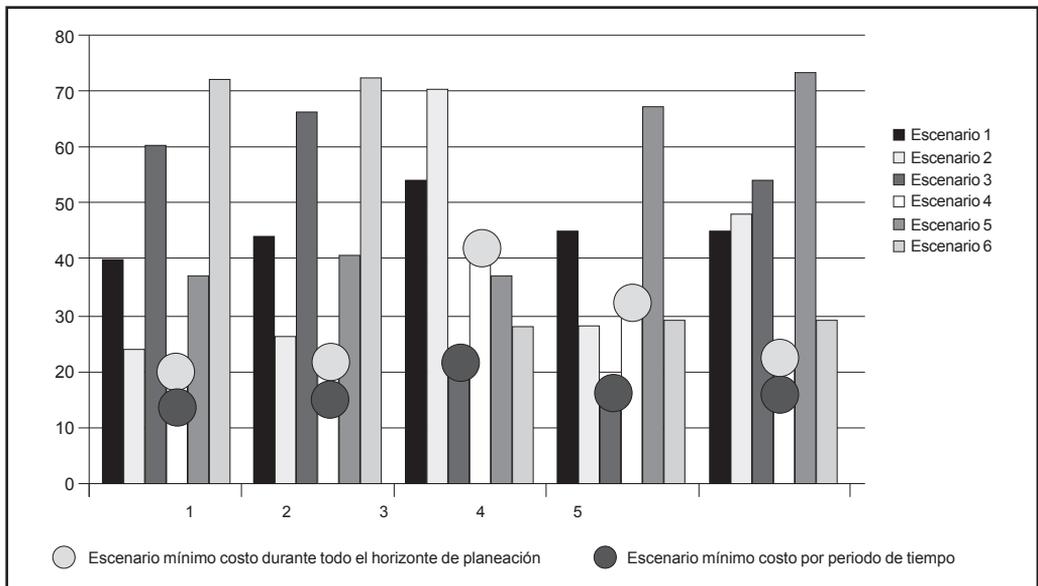
La gráfica 5 muestra los costos obtenidos por 5 escenarios respecto de un horizonte de planeación de 5 periodos. Al sumar los costos obtenidos por cada uno de los escenarios durante todo el horizonte de planeación el menor valor es obtenido por el escenario 4, sin bien se puede observar que para los diferentes periodos el escenario que presenta el menor costo no es siempre el mismo: así, para los periodos 1 y 2 el menor costo lo presenta el escenario 4, para los periodos 3 y 4 el escenario 3, y para el periodo 5 el escenario 4. La unión de estos escenarios seleccionados en cada periodo sirve como base para la creación de un escenario con demanda propuesta.

## Resultados

Se construyó una serie de escenarios para analizar las principales características y comportamientos de los modelos de optimización propuestos. Los resultados fueron comparados con el escenario base, cuyos análisis son el resultado de un modelo de programación lineal entera mixta determinístico, que opera bajo las condiciones actuales de la red de abastecimiento. Los demás escenarios representan variaciones en la demanda y la capacidad de producción.

La comparación entre estos escenarios se realizó en términos de: área de cultivo, producción de aceite crudo de palma y biodiesel, cumplimiento de la demanda y ampliación de la capacidad de producción. Estos escenarios fueron solucionados en un com-

Gráfica 5  
Metodología para el análisis de los resultados de este modelo



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 1  
**Estadísticas computacionales de cada escenario**

	Escenario base (2008-2019)	Escenarios (M.P.A.C.) con ampliación de capacidades (2009-2019)	Escenario estocástico (2009-2019)
Número total de restricciones	2.374	2.208	100.668
Número total de variables binarias	99	143	8.063
Número total de variables continuas	3.573	3.375	182.792
Número total de variables enteras	0	385	24.145
Tiempo computacional (segundos)	2	71	42.86

Fuente: elaboración propia.

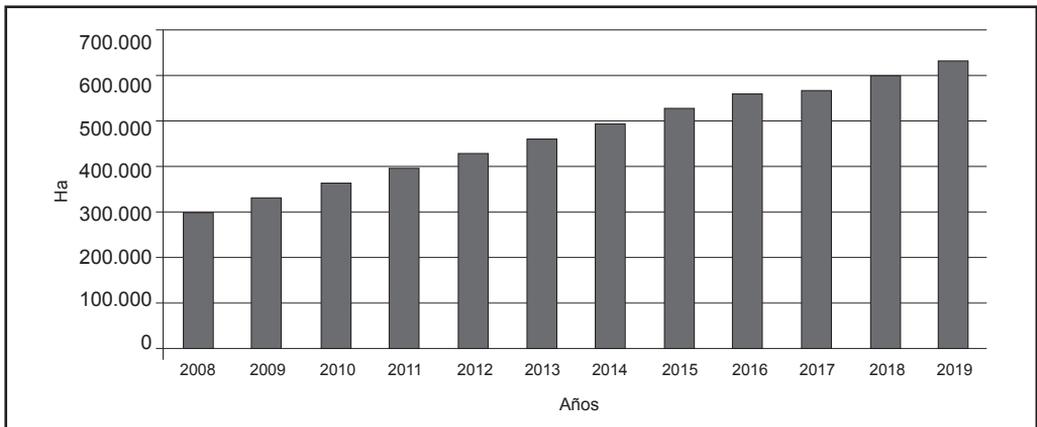
putador Pentium 4 con 3,0 GB de RAM. El cuadro 1 presenta las estadísticas computacionales para cada uno de los escenarios construidos.

**Resultados del escenario base**

Los resultados del escenario base se resumen en los siguientes puntos, destacando las principales decisiones a tomar:

*Cultivo.* Durante todo el periodo de planeación el cultivo corresponde a 355.302 hectáreas, de las cuales el 28.38% ubicadas en la zona norte, el 27.13% en la zona centro, el 30.41% en la zona oriental y el 14.06% restante en la zona occidental; lo anterior muestra un esfuerzo por concentrar los cultivos de palma en la zona oriental debido, de una parte, a los menores costos de cultivo y, de otra, a la presencia de una de las mayores demandas de ACP para la producción de biodiesel.

Gráfica 6  
**Área sembrada total - Escenario base, 2008-2019**



Fuente: elaboración propia.

La gráfica 6 describe el comportamiento de este eslabón.

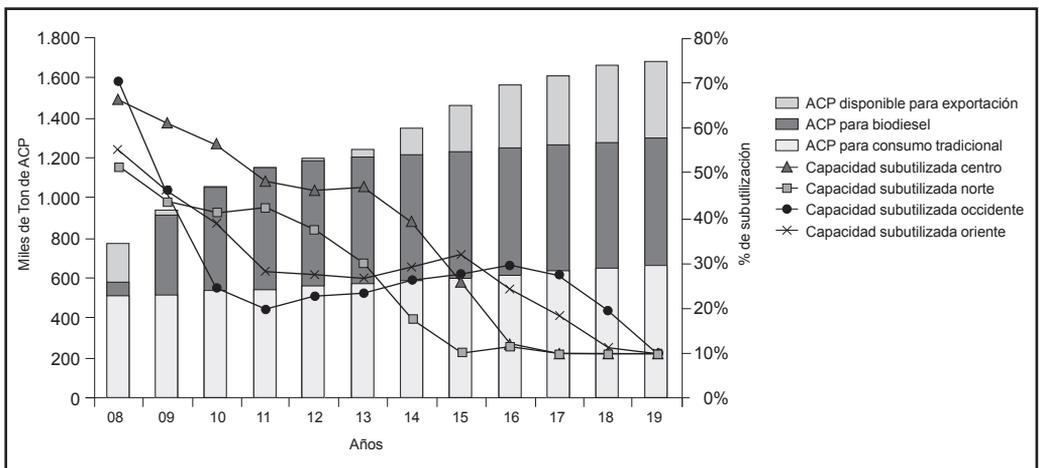
*Plantas extractoras.* Durante todo el periodo de planeación se produjeron 15.714.295 toneladas de ACP, las cuales fueron destinadas en un 45% a satisfacer la demanda del mercado de consumo tradicional, en un 43% a la producción de biodiesel y en un 12% a la exportación. Las plantas ubicadas en las regiones oriental y central satisfacen en mayor proporción la demanda de consumo tradicional y las de las zonas norte y oriente, la demanda para la producción de biodiesel; por último, las plantas que generan en mayor proporción excedentes de ACP disponibles para la exportación se encuentran ubicadas en las regiones norte y central. La capacidad subutilizada en todas las plantas de extracción presenta un comportamiento decreciente a lo largo del horizonte de planeación, debido principalmente al incremento de los cultivos de palma en todas las regiones como respuesta

al nuevo mercado de ACP para la producción de biodiesel. La gráfica 7 describe el comportamiento general de las plantas de extracción durante todo el periodo de planeación.

*Biorrefinerías.* Los resultados del modelo indican que deben abrirse seis biorrefinerías en 2009 para llegar a una capacidad de 596.000 toneladas, y otra más en 2010 para completar un total de 696.000 toneladas a partir de ese año. El orden de apertura de las biorrefinerías obedece principalmente a los supuestos adoptados respecto de los cultivos de materia prima y la demanda interna de biodiesel. Al comparar la demanda proyectada con la capacidad instalada se identificó a partir del año 2011 una demanda de biodiesel insatisfecha por cubrir con diesel convencional. En promedio, el porcentaje de la demanda satisfecha con biodiesel nacional es del 76.29%. En total la producción fue de 6.613.016 toneladas de biodiesel a partir de ACP, con destino, en un 98.2%, a la satisfacción del

Gráfica 7

**Comportamiento de las plantas de extracción - Escenario base, 2008-2019**



Fuente: elaboración propia.

mercado interno y, en el 1.8% restante, a la exportación. Como principales regiones con excedentes de producción disponibles para exportación aparecen la norte y la oriente. La gráfica 8 describe el comportamiento general de las biorrefinerías durante todo el periodo de planeación.

**Costos.** Las plantas de extracción presentan la mayor participación dentro de los costos totales, contribuyendo con el 46%, seguidas por las biorrefinerías con el 35%, y los cultivos con el 19% restante. El costo que presenta la mayor contribución en el eslabón de cultivo es el relacionado con los actuales cultivos en producción y desarrollo, con un 46%; en las plantas de extracción lo es la compra de RFF, con un 87%, y en las biorrefinerías, la compra de ACP, con un 78%. La gráfica 9 describe la estructura de costos de la cadena de suministro.

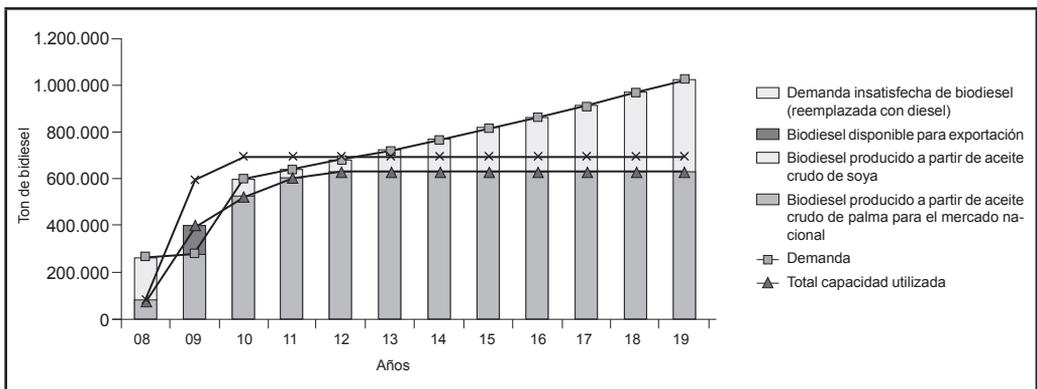
**Ingresos.** Los ingresos obtenidos por las plantas de extracción representan el 59% del total, siendo la venta de ACP para la produc-

ción de biodiesel el destino de mayor contribución al ingreso, con el 44%; a su turno, los ingresos obtenidos por las biorrefinerías representan el 42% del total, en donde la venta de biodiesel al mercado nacional es el destino que mayores ingresos genera, equivalentes al 96% de los obtenidos por este eslabón. La gráfica 10 describe la estructura de los ingresos de las plantas de extracción y las biorrefinerías.

**Resultados del escenario base: ampliación de capacidades**

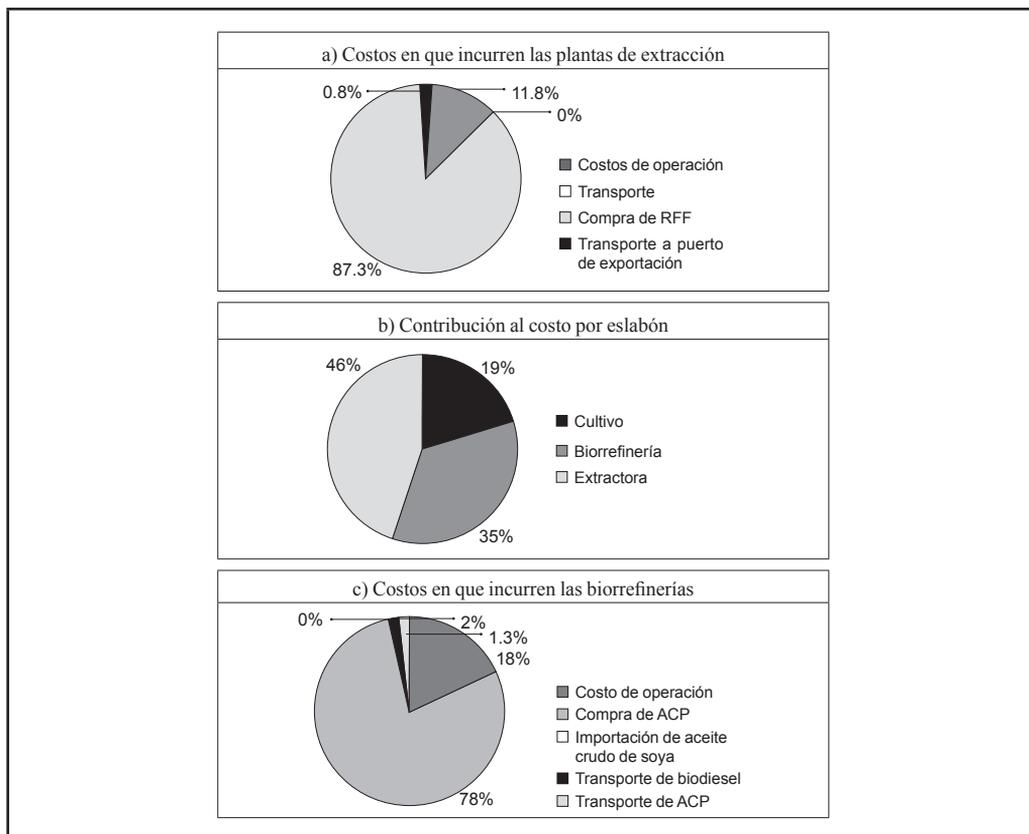
Los resultados obtenidos en este escenario indican que el área cultivada en cada periodo del horizonte de planeación debe aumentar en un 128% en comparación con el área cultivada en el escenario base. La capacidad instalada en las plantas de extracción aumenta según la proyección en un 69%, y la región que presenta la mayor ampliación de su capacidad de producción en este escenario y para este horizonte de tiempo es la oriental, con un 121%, seguida por la región norte,

Gráfica 8  
Comportamiento de las biorrefinerías, 2008-2019



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 9  
Estructura de costos de la cadena de suministro



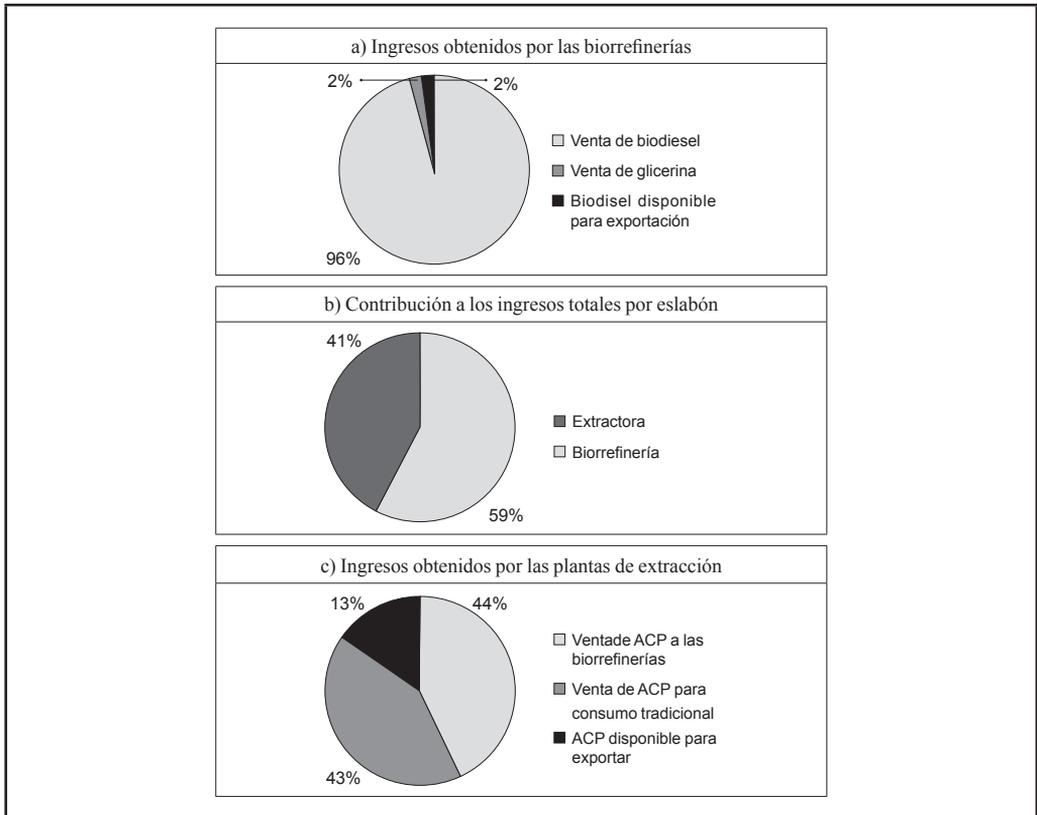
Fuente: elaboración propia.

con un 67.3%, la occidental, con un 41.1%, y la central, con un 31.8%. Por otro lado, la capacidad instalada en las biorrefinerías aumenta en un 178%, pasando de 696.000 toneladas en 2009 a 1.936.000 en 2019. Las ampliaciones realizadas tanto en las plantas de extracción como en las biorrefinerías permiten satisfacer la totalidad de la demanda y generar excedentes de producción disponibles para exportación, tanto de ACP como de biodiesel. La gráfica 11 describe el comportamiento general de las biorrefinerías en este escenario.

### Resultados para los escenarios de demanda planteados

La ampliación de la capacidad de producción en las plantas de extracción y las biorrefinerías permite disminuir considerablemente la demanda insatisfecha, sin embargo para los escenarios medio y alto las ampliaciones propuestas son insuficientes, presentándose una demanda insatisfecha en los últimos periodos del horizonte de planeación. En el cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios planteados.

Gráfica 10  
**Estructura de ingresos para la cadena de suministros**



Fuente: elaboración propia.

**Resultados del escenario estocástico**

La selección de escenarios a analizar siguió la metodología descrita arriba. A continuación se presentan los resultados obtenidos para dichos escenarios.

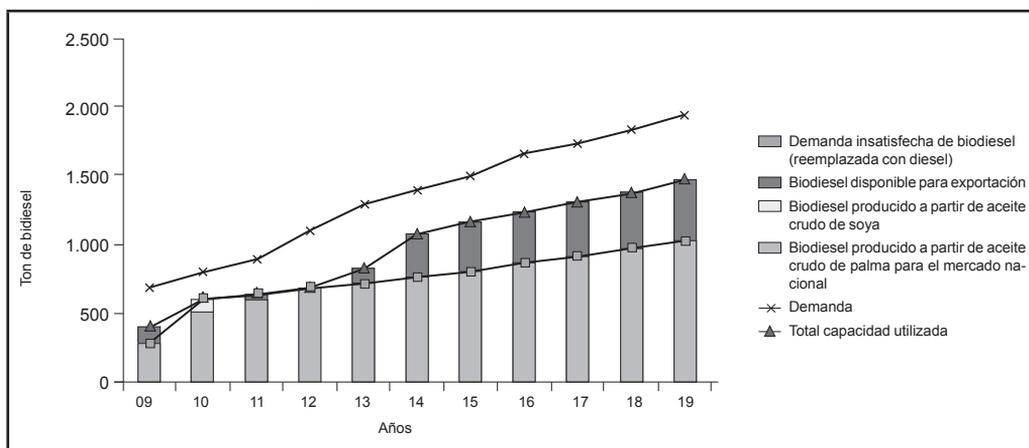
**Escenario del mínimo costo**

El escenario que presenta el menor costo dentro del total de 81 escenarios generados combina los porcentajes de mezcla dados pa-

ra los escenarios alto, medio y bajo, estableciendo un porcentaje de mezcla por región, como lo muestra el cuadro 3. La demanda de este escenario se encuentra ubicada entre el escenario medio y el bajo.

El área cultivada total para este escenario durante el periodo de planeación equivale a 1.082.622 hectáreas, lo cual implica un aumento en la capacidad de producción de las plantas de extracción del 110%, y de 2.570.000 toneladas en las biorrefinerías. Es-

Gráfica 11  
Comportamiento de las biorrefinerías, 2009-2019



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 2  
Resultados obtenidos en cada uno de los escenarios planteados

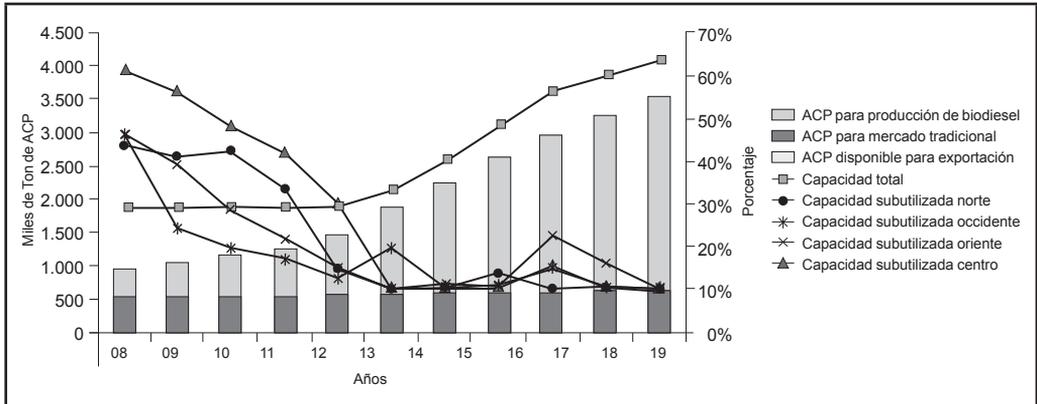
Valor de las variables para todo el periodo de planeación	Unidades	Base (2008-2019)	Ampliación de la capacidad (2009-2019)				
			Base	Bajo	Medio	Alto	Promedio
Área cultivada	Ha	355.302	811.057	974.435	1.139.699	1.139.703	1.091.403
ACP producido	Ton	15.714.295	19.556.560	21.354.963	23.083.785	23.084.967	22.595.566
ACP para el mercado tradicional	Ton	7.000.024	6.492.624	6.492.624	6.492.624	6.492.624	6.492.624
ACP para la producción de biodiésel	Ton	6.686.569	10.758.233	21.354.963	16.575.034	16.576.216	16.086.815
ACP disponible para exportación	Ton	2.027.703	2.305.703	504.108	16.127	16.127	16.127
Biodiésel producido	Ton	6.613.016	10.754.467	14.200.291	17.278.179	20.467.487	16.097.415
Biodiésel disponible para exportación	Ton	120.080	2.486.540	3.264.212	483.343	120.081	1.638.330
Demanda de biodiésel insatisfecha (reemplazada por diesel)	Ton	2.038.469	0	0	19.288	1.512.107	0
Aceite de soja importado para producir biodiésel	Ton	0	115.849	0	895.320	4.118.917	189.641
Ampliación de la capacidad instalada de las plantas de extracción	Ton	0	1.283.256	1.755.000	2.223.936	2.223.936	2.091.960
Ampliación de la capacidad instalada de las biorrefinerías	Ton	0	1.220.000	2.390.000	2.700.000	2.700.000	2.650.000

**Cuadro 3**  
**Resultados obtenidos en cada uno de los escenarios planteados**

Mayorista	Año (porcentajes)										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Centro	5	10	10	15	15	15	20	25	25	30	30
Oriente	5	10	10	15	15	15	20	25	25	30	30
Norte	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20
Occidente	5	5	5	10	10	10	15	15	15	20	20

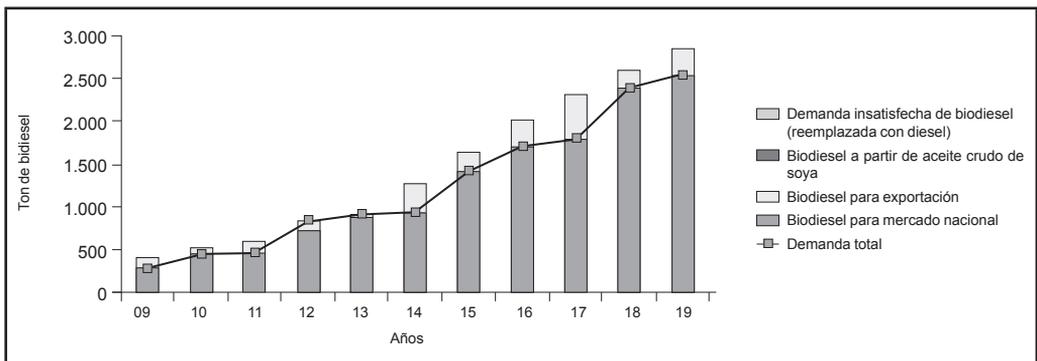
Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 12**  
**Comportamiento general de las plantas de extracción**



Fuente: elaboración propia.

**Gráfica 13**  
**Comportamiento general de las biorrefinerías. Escenario 31**



Fuente: elaboración propia.

tas ampliaciones permiten satisfacer el 99% de la demanda nacional de biodiesel estimada con los porcentajes de mezcla mostrados anteriormente. Las gráficas 12 y 13 describen el comportamiento general de las plantas de extracción y las biorrefinerías en este escenario.

### Escenario de demanda propuesta

A partir de los resultados obtenidos en el escenario de ampliación de capacidades con demanda estocástica se construyó una demanda propuesta con base en los escenarios que presentaron los menores costos en cada periodo del horizonte de planeación; esta demanda propuesta varía los porcentajes de mezcla para cada región y para cada periodo de tiempo. El cuadro 4 muestra los porcentajes de mezcla propuestos.

El área cultivada total para este escenario durante el periodo de planeación es igual a 1.139.699 hectáreas, lo que implica un aumento en la capacidad de producción de las plantas de extracción del 118%, y de 2.700.000 toneladas en las biorrefinerías. Estas ampliaciones permiten satisfacer el 99.9% de la demanda nacional de biodiesel estimada con los porcentajes de mezcla mos-

trados con anterioridad. Las gráficas 14 y 15 describen el comportamiento general de las plantas de extracción y las biorrefinerías en este escenario.

### Conclusiones

En este artículo se estudia el problema de la configuración de la red de suministro de biodiesel en Colombia. El trabajo recurre a una metodología basada en modelos matemáticos para la estructuración e integración de toma de decisiones con el objeto de aplicarla a la producción de biocombustibles en Colombia. Los modelos buscan la coordinación de manera estructurada de cada uno de los eslabones que conforman la red de suministro para la producción de biodiesel integrando las etapas de producción agrícola y de procesos agroindustriales. El resultado es que dichos análisis sirven para hacer una planeación estratégica de la industria de biodiesel en el país. Los modelos y las soluciones permiten identificar el comportamiento de la producción de biodiesel a nivel doméstico, así como posibles estrategias para su producción y distribución. Los modelos matemáticos determinísticos y estocásticos empleados en la implementación de la metodología propuesta

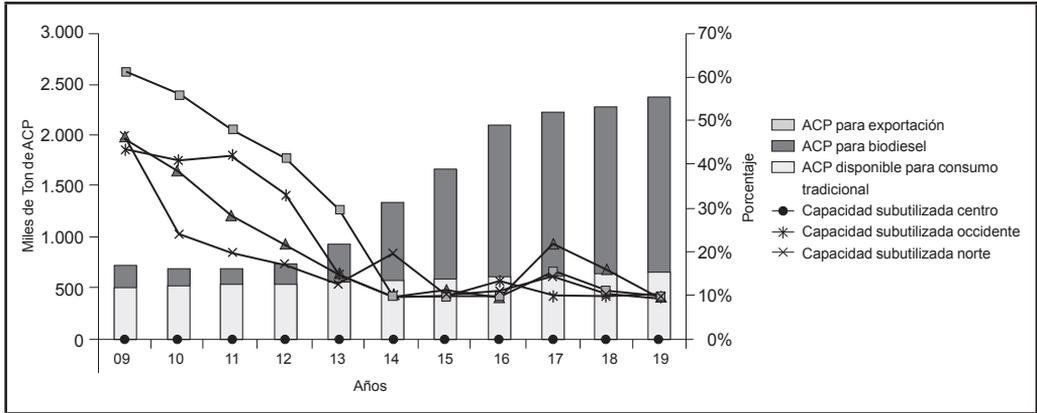
Cuadro 4  
Porcentajes de mezcla propuestos

Mayorista	Año (porcentajes)										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Centro	5	10	10	15	20	20	20	30	30	30	30
Oriente	5	10	15	20	20	20	20	30	30	30	30
Norte	5	10	10	10	10	20	20	30	30	30	30
Occidente	5	10	15	15	15	25	25	25	25	30	30

Fuente: elaboración propia.

Gráfica 14

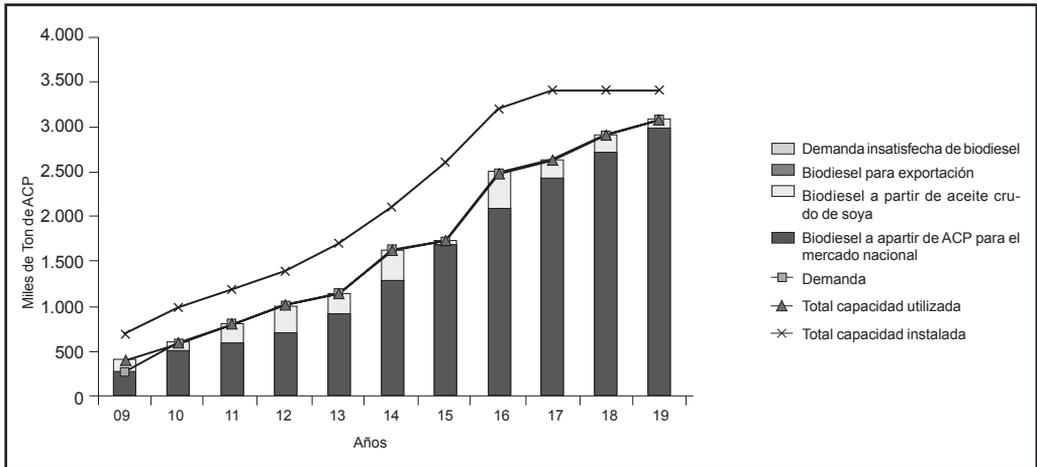
**Comportamiento general de las plantas de extracción. Escenario demanda propuesta**



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 15

**Comportamiento general de las biorrefinerías. Escenario demanda propuesta**



Fuente: Elaboración propia.

en este trabajo constituyen una herramienta flexible útil para que un planificador central pueda definir líneas de acción de acuerdo con las condiciones de la red de suministro. Es así que la utilidad de los modelos y los escenarios propuestos consiste en ser herramientas que pueden ser utilizadas para evaluar la in-

clusión de nuevas materias primas, definir la ampliación de capacidades en las plantas de producción y, en general, poder tomar decisiones de tipo táctico y estratégico para las labores de logística y producción. Así mismo, los modelos se pueden extender para la producción de otros biocombustibles.

En términos de perspectivas de investigación, la metodología propuesta puede ser enriquecida con información específica acerca de materias primas diferentes a la palma de aceite y así convertirse en una herramienta útil para otras cadenas de suministro de biocombustibles. Esto en respuesta a la gran preocupación existente en la comunidad internacional, específicamente en Europa, ante la deforestación y el uso de materias primas comestibles para la producción de biodiesel. De otra parte, en la medida en que se cuente con información sobre las pérdidas en los cultivos a causa de las plagas y enfermedades se hace posible modelar la incertidumbre generada por estos factores en los cultivos. Otra línea de trabajo puede ser el desarrollo de un sistema de soporte a la decisión (*software*) con una interfaz flexible que permita automatizar los procesos de toma de datos y análisis de las soluciones.

## Referencias

- Ahumada, O. and Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review, *European Journal of Operational Research*, 195, 1-20.
- Arntzen, B.; Brown, G.; Harrison, T.; and Trafton, L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interfaces*, 25 (1), 69-93.
- Biofuels Consulting (2007). Desarrollo y consolidación del mercado de biocombustibles en Colombia. Extraído de [http://www.fedebiocombustibles.com/conferencias/presentacion\\_estudio\\_bfc\\_upmea2007.pdf](http://www.fedebiocombustibles.com/conferencias/presentacion_estudio_bfc_upmea2007.pdf)
- Birge, J. R. and Louveaux, F. (1997). *Introduction to Stochastic Programming*. New York: Springer-Verlag, Springer Series in Operations Research.
- Carlsson, D. and Rönnqvist, M. (1999). Wood flow problems in the Swedish forestry, The Forestry Research Institute of Sweden Report n. 1.
- Carlsson, D.; D'Amours, S.; Martel, A.; and Rönnqvist, M. (2006). *Supply chain management in the pulp and paper industry*. Working Paper DT-2006-AM-3, Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation, CIRRELT. Québec: Université Laval.
- Chahin, C.; Cadena, A. y Espinosa, M.A. (2007). *Marco normativo y de desarrollo de una metodología de formación de precios de los biocombustibles*. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente.
- Cohen, M.; and Kleindorfer, P. (1993). Creating value through operations: The legacy of Elwood S. Buffa. In R.K. Sarin (Ed.), *Perspectives in Operation Management (Essays in honor of Elwood S. Buffa)* (pp. 3-22). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Conpes 3510 (2008). *Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia*. Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación.
- Epstein, R.; Morales, Serón, J.; and Weintraub, A. (1999). Use of OR systems in the Chilean forest industries. *Interfaces*, 29 (1) 7-29.
- Ezurra, X. and Plà, L. (2011). AnaPorkDSS: A decision support system to evaluate pig production economics. *Proyecto Social*, 14, 23-44.
- Fedepalma (2005). *Actualización de costos de producción de aceite de palma*. Bogotá: Fedepalma.
- García, R.; Martínez, M.; and Palacios, F. (2007). *Tactical and operative optimization of the supply chain in the oil palm industry*. Applied Mathematical Modelling.
- GAMS (2001). *GAMS. The Solver Manuals*. Washington, D.C.: GAMS Development Corporation.

- Geoffrion, A.; Graves, G.; and Lee, S. (1978). Strategic distribution system planning: A status report. In A. C. Hax (Ed.), *Studies in operations management* (pp. 179-204). Amsterdam: North-Holland.
- Geoffrion, A.; Graves, G.; and Lee, S. (1982). A management support system for distribution planning. *INFO*, 20 (4), 287-314.
- Geoffrion, A. and Graves, G. (1974). Multicommodity distribution system design by Benders decomposition. *Management Science*, 20 (5), 822-844.
- Goetschalckx, M.; Vidal, C.; and Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistic system: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143 (1), 1-18.
- Graham, M. (2011). Food supply. *Chain food safety and system management (QA)*, AgLinkEd Professional Development Conference Harvey 2011, Department of Agriculture and Food, Curtin University (May).
- Gunn, E. and Rai, A. (1987). Modelling and decomposition for planning long-term forest harvesting in an integrated industry structure. *Canadian Journal of Forest Research* 17, 1 507-1518.
- Gunnarsson, H. (2007). Optimization approaches to tactical planning problems in the forest industry, Licentiate thesis LiU-TEK-LIC-2003: 70. Sweden: Institute of Technology.
- Gunnarsson, H.; Lundgren, J.; and Ro, M. (2001). *Optimering kan sa produktionskostnaderna for skogsbr ansle*. The Forestry Research Institute of Sweden, Report n. 20 (in Swedish).
- Gunnarsson, H.; Lundgren, J.; and Ro, M. (2003). Supply chain modeling of forest fuel. In G.J. Arthaud and T.M. Barrett (Eds.), *Systems Analysis in Forest Resources: Proceedings of the Eighth Symposium, September 27-30, 2000*, Snowmass Village, Colorado. Norwell: Kluwer Academic Publishers.
- Gunnarsson, H.; Ro, M.; and Carlsson, D. (2004). Annual planning of the supply chain and ship routing problem in the pulp industry. In H. Aronsson (Ed.), *Nofoma 2004. Book of abstracts*. Sweden: Linko Spring.
- Gutiérrez, E.; Fuquen, H. y Abril, D. (2010). Planificación integrada de producción y distribución para un conglomerado industrial. *Revista Facultad de Ingeniería*, 53, 88-105.
- Gutiérrez, E.; Cadena, A. y Palacios, F. (2008). *Planificación estratégica del sector de biodiesel en Colombia*. XIV Congreso Ibero Americano de Investigación de Operaciones, Claio. Cartagena de Indias, Colombia.
- Kalenatic, D.; López, C.; González, L. y Rueda, F. (2010). *Modelos matemáticos aplicados a logística focalizada*. Bogotá: Kalenatic Editor.
- Kalenatic, D.; López C. y González, L. (2011) *Modelos de Planeación de la Producción en un Contexto de Economías de Escala*. Bogotá, Colombia Kalenatic Editor.
- López, C.; Kalenatic, D. y Figueroa, J. *Secuenciación de Trabajos. Modelos determinísticos*. Bogotá, Colombia Kalenatic Editor.
- López, E.; Miquel S.; and Plà, L. (2006). Sugar cane transportation in Cuba, a case study. *European Journal of Operational Research*, 174, 374-386.
- Marín, J.; Plà, L.; and Ríos, D. (2005). Inference for some stochastic process models related with sow management. *Journal of Applied Statistic*, 32 (8), 797-812.
- Martell, D.; Gunn, E.; and Weintraub, A. (1998). Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research*, 104, 1-17.
- Neiro, S. and Pinto, J. (2004). A general modeling framework for the operational planning of petro-

- leum supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 28, 871-896.
- Othman D. (2008). Supply chain optimization of petroleum organization under uncertainty in market demands and prices. *European Journal of Operational Research*, 189, 822-840.
- Plà, L. (2007). Review of mathematical models for sow herd management. *Livestock Production Sciences*, 106, 107-119.
- Plà, L. (2010). DSS in Pig Production Systems. In B. Manos, N. Matsatsinis, K. Paparrizos and J. Papatthanasiou (Eds.), *DSS in Agriculture, Food and the Environment* (101-117). New York: IGI-Global.
- Plà, L.; Faulin, F.; and Rodríguez, S. (2009). A linear programming formulation of a semi-Markov model to design pig facilities. *Journal of Operational Research Society*, 60, 619-625.
- Plà, L.; Pomar, C.; and Pomar, J. (2003). A Markov decision sow model representing the productive lifespan of herd sows. *Agricultural Systems*, 76, 253-272.
- Plà, L.; Pomar, C.; and Pomar, J. (2004). A Decision Support System based on a Markov decision sow model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 45 (1-3), 51-69.
- Philpott, A. B. and Everett, G. (2001). Supply chain optimisation in the paper industry. *Annals of Operations Research*, 108, 225-237.
- Quariguasi, J. and Bloemhof-Ruwaard, J. (2006). *Designing and Evaluating Sustainable Logistics Networks*. ERIM Report Series Research Management.
- Rodríguez, S.; Alborno, V.; and Plà, L. (2009). A two-stage stochastic programming model for scheduling replacement in sow farms. *TOP*, 17 (1), 171-189.
- Rodríguez, S.; Jensen, T.; Plà, L.; and Kristensen, A. (2011a). Optimal replacement policies and economic value of clinica observations in sow herds. *Livestock Science*, 138, 207-219.
- Rodríguez, S., Plà, L. and Alborno, V. (2011b). Modelling tactical planning decisions through a linear optimization model in sow farms. Accepted in *Livestock Science*.
- Shapiro, J. F. (2001). *Modeling the Supply Chain*. Duxbury, Pacific Grove, CA: Duxbury Thomson Learning Inc.
- Shapiro, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers and Chemical Engineering*, 28, 855-861.
- Wagner, M. and Meyr, H. (2005). Food and beverages. In H. Stadler and C. Kilger (Eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning* (pp. 371-388). Berlin: Springer-Verlag, Berlin.
- Weintraub, A.; Epstein, R.; Morales, R.; Serón, J.; and Traverso, P. (1996). A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. *Interfaces*, 26 (4), 1-12.
- Weintraub, A. and Epstein, R. (2002). The supply chain in the forest industry: Models and linkages. In J. Geunes, P. M. Pardalos and H. E. Romeijn (Eds.), *Supply chain management: Models, applications, and research directions* (pp. 343-362). Dordrecht: Kluwer.
- Weintraub, A. and Romero, C. (2006). Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: A review and comparison. *Interfaces* 36 (5), 446-457.

