

DISEÑO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOCOMBUSTIBLE A
PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ CONSIDERANDO LA DISPONIBILIDAD
ESTACIONAL DE LA MATERIA PRIMA

MÓNICA YULENI CASTRO PEÑA

CÉSAR AUGUSTO PEÑUELA MENESES

Asesor

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA Y ESTADÍSTICA
PEREIRA, 2017

RESUMEN

En el desarrollo de la presente investigación se propone el modelo para el diseño de una cadena de suministro para la producción en Colombia de biocombustible, usando como materia prima para la generación de bioetanol residuos y subproductos del café. Teniendo en cuenta que el diseño de la cadena de suministro se identifica como un factor clave para la reducción de costos operativos y sostenimiento confiable del flujo de materia prima dentro del proceso de producción y satisfacción de la demanda, se consideran las características de disponibilidad estacional de los residuos de café según la posición geográfica de las zonas de producción dentro del territorio nacional, de forma que se logre la decisión óptima de la ubicación de instalaciones para el acopio y procesamiento de la materia prima. El modelo propuesto es resuelto usando GAMS obteniendo resultados en bajos tiempos computacionales y los cuales muestran que la ubicación óptima de las instalaciones puede variar en el tiempo debido a que la materia prima fluye desde lugares diferentes. Bajo estas consideraciones se propone una solución global y se presentan ideas para trabajos futuros.

Palabras Claves: Biocombustible, Cadena de suministro, Residuos de café, Localización.

ABSTRACT

In the present work, we propose a model aiming to design a supply chain for the bio-fuel production in Colombia using as raw materials the coffee residues and its by-products. Taking into account that the supply chain design is identified as a crucial factor for the reduction of operative costs and the reliable support of the raw material flow into the production process and the demand satisfaction, we consider the seasonal availability of coffee residues according to the geographic position of the production zones in Colombia. This availability is used to take optimal decisions about the facility locations for the gathering and the processing of raw materials. The proposed model is solved by using the software GAMS obtaining results in low computationally times. This results show that the optimal location of the facilities varies since the raw material flows from different places. Under these considerations, we propose a global solution y we present ideas for future work.

Keywords: Biofuel, Supply Chain, coffee residues, Location.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	2
1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	9
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	10
1.1.1. Antecedentes de la situación problemática.....	10
1.1.2. Formulación del problema de investigación	14
1.1.3. Sistematización del problema	14
1.2. SISTEMA DE OBJETIVOS.....	15
1.2.1. Objetivo General	15
1.2.2. Objetivos específicos	15
1.3. JUSTIFICACIÓN	15
1.4. MARCO DE REFERENCIA	19
1.4.1. Aproximación al problema desde el estado del arte	19
1.4.2. Fundamentación teórica.....	23
1.4.3. Marco legal	28
1.5. DISEÑO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	30
1.5.1. Tipo de investigación	30
1.5.2. Hipótesis general de la investigación	30
1.5.3. Estrategia Metodológica.....	31
2. ASPECTOS CONSIDERADOS EN EL DISEÑO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOCOMBUSTIBLE	33
2.1. Variables y Parámetros	34
2.2. Caracterización de residuos.....	38
2.3. Indicadores.....	43
2.4. Estacionalidad de la materia prima	44
2.4.1. Mucílago y pulpa.....	44
2.4.2. Renovación por siembra.....	48
2.4.3. Renovación Zoca.....	51

3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA PARA EL DISEÑO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOCOMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ.....	54
3.1. Consideraciones previas	54
3.2. Modelo de optimización.....	55
3.2.1. Parámetros	56
3.2.2. Variables De Decisión	58
3.2.2.1. Función Objetivo	60
3.2.3. Restricciones	61
4. VALIDACIÓN DE DESEMPEÑO	68
4.1. Descripción Estudio De Caso.....	68
4.1.1. Selección de componentes de subíndices.....	68
4.1.2. Determinación de parámetros	75
4.2. Análisis de resultados para caso de estudio	80
4.2.1. Identificación de ubicaciones.....	81
4.2.2. Optimización De Flujos	85
5. CONCLUSIONES	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS	113

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de cosechas – Colombia.	13
Figura 2. Distribución de los artículos a través del tiempo	22
Figura 3. País de origen de los autores.....	23
Figura 4. Triángulo de la toma de decisiones logísticas	34
Figura 5. Serie de tiempo – Producción café	45
Figura 6. Autocorrelaciones estimadas	45
Figura 7. Autocorrelaciones estimadas orden no estacional 1	46
Figura 8. Autocorrelaciones estimadas diferenciación estacional	47
Figura 9. Serie de tiempo suavizadaFuente: Elaboración propia.	48
Figura 10. Serie de tiempo – Renovación siembra.....	49
Figura 11. Autocorrelaciones – Renovación siembra	49
Figura 12. Autocorrelación con diferenciación no estacional – Renovación Siembra	50
Figura 13. Serie renovación siembra suavizada.....	50
Figura 14. Serie de tiempo – Renovación zoca.....	51
Figura 15. Autocorrelaciones estimadas - Renovación zocaFuente: Elaboración propia	52
Figura 16. Suavización promedio móvil 5 – Renovación zoca	53
Figura 17. Suavización promedio móvil 12 – Renovación zocaFuente: Elaboración propia.	53
Figura 18. Eslabones de la cadena de suministro propuesta	55
Figura 19. Mapa de zonas objeto de estudio	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Categorización de artículos	19
Tabla 2. Normatividad general de biocombustibles en Colombia.....	28
Tabla 3. Propiedades de residuos y subproductos de café - etanol	39
Tabla 4. Subproducto/Residuo materia prima para la producción de bioetanol	39
Tabla 5. Cosechas principales por zona en Colombia	47
Tabla 6. Subíndices utilizados en el modelo	55
Tabla 7. Parámetros del modelo	56
Tabla 8. Variables seleccionadas.....	59
Tabla 9. Departamentos productores de café seleccionados.....	69
Tabla 10. Indicadores de alternativas de ubicación.....	72
Tabla 11. Centros de mezcla por departamentos.....	74
Tabla 12. Subíndices utilizados en el modelo	75
Tabla 13. Estadísticas de modelo propuesto	80
Tabla 14. Variable de apertura centros de acopio.....	82
Tabla 15. Recuento ubicaciones centros acopio	82
Tabla 16. Variable apertura plantas de producción	83
Tabla 17. Recuento ubicaciones plantas de producción	84
Tabla 18. Estadísticas modelo propuesto (Flujos).....	85
Tabla 19. Flujo de materia prima desde cada departamento a los centros de acopio para el primer trimestre (en toneladas)	87
Tabla 20. Flujo de materia prima desde cada departamento a los centros de acopio para el segundo trimestre (en toneladas)	88
Tabla 21. Flujo departamentos – Centros de acopio (Tercer trimestre - en toneladas).....	89
Tabla 22. Flujo departamentos – Centros de acopio (Cuarto trimestre).....	90
Tabla 23. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Primer trimestre).....	91
Tabla 24. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Segundo trimestre) .	92
Tabla 25. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Tercer trimestre)	92

Tabla 26. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Cuarto trimestre).....	93
Tabla 27. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Primer trimestre)	95
Tabla 28. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Segundo trimestre)	96
Tabla 29. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Tercer trimestre)	97
Tabla 30. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Cuarto trimestre)	98
Tabla 31. Atención a centros de mezcla	99

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Hechos como las crisis energéticas y el estado actual del medio ambiente han influenciado notoriamente en la conciencia ambiental de diversos organismos y países, que debido a su gran dependencia de los combustibles fósiles no renovables, han centrado sus esfuerzos en cuestiones como la eficiencia energética, el consumo de materias primas y la eliminación de desechos que permitan continuar con el crecimiento industrial y el fortalecimiento de las economías a nivel mundial (Zapiain, 2003).

Si bien los biocombustibles surgen como una alternativa de solución, aspectos de su producción tales como la biomasa y los impactos generados en su cadena de suministro deben ser guiados para que las decisiones que se tomen al respecto sean convenientes para factores ambientales y sociales. La biomasa utilizada por los biocombustibles de primera generación ha generado impactos negativos a la canasta familiar, como alza de precios y riesgo en la seguridad alimentaria (FAO, 2015), aspectos que no son representativos de los biocombustibles de segunda generación; sin embargo, sus costos de producción y comercialización se presentan como las principales limitantes, y a los cuales se les puede hacer frente desde el diseño de su cadena de suministro (Jiménez & Hernández, 2002).

En la práctica los modelos en el diseño de cadenas de suministro se usan, entre otras decisiones, para determinar los sitios donde se establecerán las instalaciones y la capacidad que se le asignará a cada una, siendo la meta maximizar las utilidades sin dejar de satisfacer las necesidades del cliente (Chopra, 2008).

Para el diseño de cadena de suministro de biocombustible se tendrá como materia prima los residuos de café, que han sido identificados como biomasa potencial para la producción de biocombustible (Funes et. al., 2011). Este uso alternativo, aporta positivamente al ecosistema, ya que los residuos y sub-productos de café

constituyen una fuente de grave contaminación y problemas ambientales en los países productores (Organización Internacional del café, 2005).

En la revisión realizada en la literatura, es posible establecer que el diseño de cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café es un problema que está en fase de desarrollo, dando lugar al despliegue de un proceso investigativo, el cual será propuesto en el presente documento a través de la siguiente estructura: se inicia con el planteamiento del problema sustentado con la revisión sistemática de la literatura; posteriormente se exponen los objetivos que determinarán las fases del proyecto, justificación, diseño metodológico y plan de trabajo. Posteriormente se plantea un modelo matemático en cumplimiento del objetivo propuesto. Se resuelve el modelo usando el Solver GAMs y se analizan los resultados.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.1. Antecedentes de la situación problemática

Las actividades humanas, tales como el uso de combustibles fósiles para la producción de energía, están generando grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo el CO₂ uno de los más importantes por las grandes cantidades en las que se emite (Inspiration, 2011). Esto provoca que la temperatura media terrestre aumente debido el denominado efecto invernadero, modificando las condiciones de vida habituales y poniendo en riesgo ecosistemas enteros (Twenergy, 2012).

La problemática mencionada, junto con la disminución evidente de las reservas de petróleo, y su impacto directo en la seguridad energética mundial, han generado un interés creciente en la búsqueda de fuentes de energía renovable de menor impacto en el efecto invernadero (FAO, 2011), y que disminuyan la dependencia de los

combustibles fósiles, surgiendo los biocombustibles como una opción que aporta al cumplimiento de estos objetivos (WWF, 2009).

Los biocombustibles se han clasificado en tres categorías de acuerdo con la materia prima utilizada para su producción: los de primera generación proceden de materias primas con alto contenido en almidón, azúcares y aceites (SADM, 2011), la segunda generación hace uso de biomasa lignocelulósica provenientes de residuos agrícolas o forestales (González & Castañeda, 2008); y, finalmente, las micro y macro algas surgen como materia prima para la producción de biocombustibles de tercera generación a través del proceso de transesterificación de los aceites presentes en ellas (Martínez, 2014).

Una desventaja en la producción de biocombustibles de primera generación ha sido la deforestación, el alza del precio de los alimentos, y la creciente competencia por la tierra y agua al utilizarse el suelo agrario para el cultivo directo de biocombustibles (Hernández y Hernández, 2008). En contraste, los de segunda generación figuran como una de las mejores alternativas al contribuir en la reducción del uso de tierra debido a su potencial rendimiento energético por hectárea, al no requerir tierras cultivables adicionales a las que se emplean para consumo humano (Loera-Quezada & Olgún, 2010).

Los residuos de café han sido considerados como biomasa potencial para la producción de biocombustible de segunda generación, y ha sido expuesto de esta manera en estudios como Triana (2010), Bonilla – Hermosa, Duarte & Schwan (2014), Funes et. al. (2011), y Rocha et. al. (2014), entre otros. Siendo este un uso alternativo adicional a los propuestos por la Organización Internacional del Café (2005), al evidenciar que en los países productores los residuos y sub-productos del café constituyen una fuente de grave contaminación.

No obstante, a pesar de las ventajas que tienen los biocombustibles de segunda generación en general, las características de su materia prima (lignocelulosa)

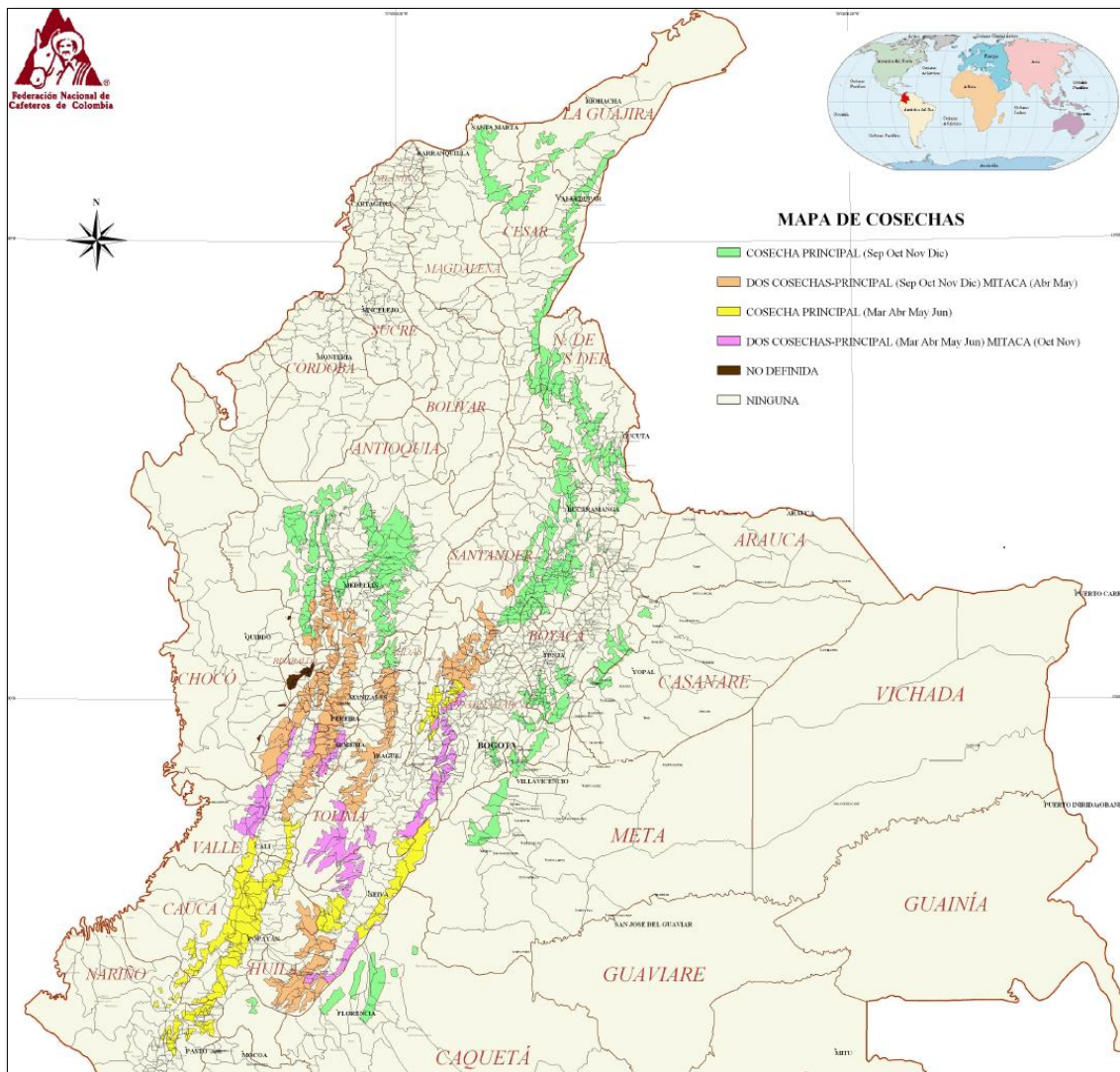
desfavorecen su elaboración al presentar dificultades técnicas importantes, lo que encarece el costo de producción y de comercialización (Serna, Barrera & Montiel, 2011). Al ser el factor económico un limitante para su desarrollo a gran escala, el diseño de su cadena de suministro se identifica como un factor clave para la disminución de costos de operación (Jiménez & Hernández, 2002).

En consecuencia, un gran número de estudios se han centrado en el objetivo económico a través de la minimización de costos (Balaman & Selim, 2014), maximización de ganancias (Yeh et. al. ,2015), e incluso tomando como referencia términos financieros como el valor presente neto (VPN) (Kelloway et. al., 2013), valor presente neto esperado (VANE) formulado por Bagajewicz, valor en riesgo condicional (CVaR), y riesgo financiero (Dal mas et. al., 2011).

En el contexto específico del café, cultivo generador de los residuos y subproductos que se proponen tomar en cuenta en el desarrollo del presente estudio, y las características que le otorga sus propiedades y la posición geográfica de Colombia, hacen necesario que se considere dentro del modelo la variabilidad de la disposición de lo que sería la materia prima. Cada región cafetera de Colombia presenta condiciones particulares de disponibilidad de agua, temperatura, radiación solar, y régimen de vientos para el cultivo del grano.

Las zonas cafeteras centrales del país permiten que se coseche café fresco regularmente durante todo el año, debido a que presenta los periodos secos y lluviosos de manera intercalada. Sin embargo, existen en la mayoría de regiones cafeteras dos periodos de floración: uno que va de enero a marzo, y otro de julio a septiembre, siendo la cosecha principal en estas zonas realizada entre septiembre y diciembre, y una segunda cosecha entre abril y junio (denominada “mitaca”). La cosecha principal y la de mitaca pueden alternarse en otras regiones de acuerdo con su latitud, tal como se puede apreciar en la Figura 1. (Federación Nacional de Cafeteros, FNC, 2010).

Figura 1. Mapa de cosechas – Colombia.



Fuente: FNC (2010).

De acuerdo con esto, se requiere un diseño de la cadena de suministro que considere objetivos económicos y restricciones de disponibilidad de materia prima. Esta decisión puede hacer uso de un modelo de localización/asignación, *Location Allocation Problem* (LAP), el cual es un problema combinatorial que consiste en determinar la posición de k instalaciones sobre n posibles posiciones y asignar los clientes a la instalación más cercana (Torrent, Muñoz & López, 2012). El LAP es considerado en la literatura como problema NP-duro (Zurita-Milla & Huisman, 2011), que requiere una metodología de solución que haga frente a la complejidad computacional y se puedan obtener resultados en tiempos de ejecución razonables.

1.1.2. Formulación del problema de investigación

De acuerdo con los planteamientos anteriores, y la identificación de que el diseño de una de cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, considerando objetivos económicos y disponibilidad de la materia prima, es un problema que se encuentra en fase de desarrollo. La pregunta de investigación que reúne los aspectos clave y es guía en el desarrollo del presente proyecto de investigación, es la siguiente: ¿cómo diseñar una cadena de suministro de biocombustible de residuos de café, a partir de un diseño de decisiones de instalaciones, considerando la disponibilidad variable de la materia prima, que resulte viable desde el punto de vista de la complejidad computacional?

1.1.3. Sistematización del problema

- Desde el punto de vista conceptual ¿Cómo debe estructurarse una cadena de suministro de acuerdo a decisiones de instalaciones?
- ¿Cuáles son los objetivos, variables, parámetros y restricciones que debe incorporar el diseño de la cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café?
- ¿Cómo se debe estructurar el modelo matemático para abordar el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café?

1.2. SISTEMA DE OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Diseñar una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café considerando la disponibilidad estacional de la materia prima.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar desde el punto de vista conceptual los aspectos que deben ser considerados en el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café teniendo en cuenta la disponibilidad estacional de la materia prima.
- Plantear un modelo de optimización matemática que permita el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, considerando las características establecidas.
- Validar el desempeño del modelo matemático propuesto a través de simulación computacional.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El efecto invernadero es quizás una de las preocupaciones que más atañen en la actualidad a las sociedades y gobiernos, y no es una situación ajena a Colombia. Sumado a esto, en los informes que se emiten en el país, se revela que hay reservas de petróleo sólo para siete años (Bendeck-Olivella, 2013). Lo anterior, permite pensar que se requiere una opción que ayude a prolongar las reservas de las

fuentes energéticas no renovables (hidrocarburos) y que contribuya a mitigar el efecto invernadero.

Como alternativa de solución a lo expuesto se encuentran los biocombustibles, los cuales son obtenidos de fuentes renovables de energía, lo que permite que los gases producidos en la cadena de suministro, desde los cultivos hasta el uso vehicular, sean reabsorbidos por la siembra siguiente, equilibrando así la emisión y absorción de los GEI. Según Bendeck-Olivella (2013), por cada kilogramo de petróleo quemado se emiten 7,1 Kg de CO₂, mientras que por cada kilogramo de alcohol quemado se emiten 0,9 Kg de CO₂.

Sin embargo, la producción de biocombustibles de primera generación ha traído consigo impactos negativos como su influencia sustancial en el alza de precio de los alimentos (FAO, 2015). Sin embargo, esto no es un problema representativo de los biocombustibles de segunda generación. Aunque sus costos de producción y comercialización se presentan como uno de los limitantes, pueden ser subsanados al maximizar la eficiencia de su operación, como, por ejemplo, desde el diseño de su cadena de suministro (Jiménez & Hernández, 2002).

Desde el caso específico de Colombia, el gobierno nacional reconoce su responsabilidad ambiental y el aporte significativo del uso de biocombustibles. Por tal razón ha venido desarrollando un conjunto de instrumentos orientados a la promoción de biocombustibles. En el Plan Nacional de Desarrollo (PND) (Departamento Nacional de Desarrollo, 2008), se destaca la evaluación de la viabilidad de eliminar aranceles a la importación de biocombustible e incrementar el porcentaje dentro de la mezcla con combustible fósiles (actualmente se encuentra en 10% para la gasolina y en un 5% para biodiesel).

Según Cenicafé (2011), la preparación de la bebida de café aprovecha apenas el 5% del peso del fruto fresco, y se desaprovecha el 95% restante, representado por residuos orgánicos con un alto contenido energético. Es evidente un gran potencial

en generación de combustible a partir de materias primas renovables, y al tiempo se puede evitar que dichos residuos sean arrojados por los caficultores a las quebradas y pequeños riachuelos, generando contaminación a las fuentes y la desaparición de especies acuáticas (Funes et. al., 2011).

Los residuos y subproductos del café pueden ser utilizados como combustible de diferentes formas, entre ellas: como combustible directo, biogás, biodiesel, y bioetanol (alcohol carburante); en el caso del bioetanol, estudios tales como Triana (2010), Castillo, & López (2013), Guzmán (2014), Velasco, R. J. M., & Hoyos, J. L. C. (2011), y Gurram et. al. (2015) han demostrado y estudiado el proceso bajo el cual los tallos, mucílago, y pulpa fresca pueden ser materia prima para la producción de alcohol carburante.

De acuerdo con un estudio realizado por Cenicafé (2010), tomando la pulpa fresca y mucílago como materia prima para la producción de bioetanol, es posible obtener 102 litros de alcohol carburante por una hectárea de café, considerando que de una tonelada de pulpa se obtienen 25,17 litros de etanol, y por el mucílago 58,37 litros; de igual manera afirma que se pueden generar 0,768 y 2,258 toneladas de mucílago y pulpa, respectivamente, por hectárea, cada año.

En cuanto a los tallos de café, de acuerdo con lo expuesto por Triana (2011) se obtiene un rendimiento de 240 litros de bioetanol por cada tonelada de tallos, y se estima que anualmente por concepto de renovación de soca se produce aproximadamente 3,2 toneladas de biomasa de tallos por cada hectárea de café (Rodríguez, 2009). Según Asoexport (s.f.), el total de las hectáreas que se encuentran sembradas en café en Colombia es de 869.157,9 ha.

En la actualidad, Colombia tiene en operación tres plantas para la producción de alcohol carburante (etanol) ubicadas en los departamentos de Cauca, Valle y Risaralda, produciendo 350.000, 1.200.000, y 100.000 litros de etanol por día, respectivamente (FNB Colombia, 2015). La materia prima en común para las tres

plantas es la caña de azúcar, produciendo un total de 1.650.000 litros de etanol por día. De acuerdo con cifras presentadas por la Federación de Biocombustibles, se estima que son necesarias entre diez y doce refinerías para producir los 2,5 millones de litros diarios del alcohol que son necesarios para satisfacer plenamente la mezcla con la gasolina corriente que es consumida en el país. Logrando de esta manera establecer que restan por ser producidos 850.000 litros diarios de alcohol carburante (FNB Colombia, 2009), los cuales podrían ser suplidos con la producción que puede ser obtenida a partir de los residuos y subproductos de café considerados en la presente investigación, y para lo cual representaría recolectar tan sólo la materia prima producida por 356.609 hectáreas de café, correspondiente al 41,02% del área de café sembrada en Colombia.

Además del beneficio ambiental al que aporta el desarrollo del proyecto, se generan impactos de gran envergadura en el factor económico y social, al ser 588 de los 1.102 municipios de Colombia los productores de café, y donde alrededor 553 mil familias dependen de este cultivo, y que al ser considerado este uso alternativo de los residuos de café sería impactada positivamente la fuente de ingresos de estas familias (FNC, 2011).

Desde la perspectiva de la revisión sistemática de la literatura y el entorno específico del desarrollo de las investigaciones, Colombia cuenta con una investigación registrada, estableciéndose así, que el diseño de una de cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café considerando la disponibilidad variable de la materia prima, es aún un problema en fase de desarrollo, dando lugar al despliegue de un proceso investigativo, con miras a generar nuevas aportaciones en el tema.

1.4. MARCO DE REFERENCIA

1.4.1. Aproximación al problema desde el estado del arte

De acuerdo con la necesidad identificada, se realizó una búsqueda sistemática de la literatura con el fin de identificar el estado del arte. Las características de la búsqueda fueron:

- Base de datos: Scopus
- Ecuación de búsqueda: "Supply chain" AND "Biofuel" AND "Location".
- Clasificación de los documentos obtenidos y análisis de las contribuciones relevantes: Al introducir en la base de datos la ecuación de búsqueda, se obtiene un total de 94 documentos, de los cuales son seleccionados los de tipo "artículo", siendo estos los que contienen la información requerida para el análisis.

De acuerdo a este filtro, se obtienen un total de 67 artículos, los cuales a su vez fueron clasificados en: relacionados, y no relacionados, tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorización de artículos

Clasificación	Documentos encontrados	Porcentaje	Observaciones
Relacionados	41 ¹	61,19%	Se realiza el diseño de una cadena de suministro de biocombustibles a partir de modelación matemática.
No Relacionados	26	38,8%	Se desarrollan análisis que no incluyen modelación matemática.

Fuente: Elaboración propia.

¹ Como anexo 1 se listan los artículos relacionados objeto de análisis.

De acuerdo a esta clasificación se analizan los 41 artículos relacionados desde los siguientes componentes: variable de decisión, tipo de biomasa, función objetivo, componente de variabilidad (modelo estocástico o determinístico), técnica de modelado, métodos de solución y líneas de investigación futura.

En cuanto variables de decisión se evidenciaron investigaciones que además de localización incluyeron en sus modelos aspectos como ruteo de vehículos (12,2%), modo de transporte (4,88%) e inventarios (17%). Así mismo, el 4,88% determina la cantidad de tierra que se debería utilizar con fines alimenticios y para biocombustibles, el 24,39% selecciona el tipo de biomasa, y el 31,71% determina la cantidad de biocombustibles por producir.

Con relación a los objetivos considerados, se evidencia una tendencia hacia el modelamiento bajo un único objetivo, el económico (68,29%). Un 26,83% incorporan aspectos económicos y ambientales. Finalmente un 4,88% incluye la triada de sostenibilidad (económico, ambiental y social); en el caso de investigaciones realizadas con fines económicos y ambientales, se evidencia que en algunos de ellos la limitación por datos disponibles lleva a que el modelo sólo sea experimental, y por tanto no realicen un caso de aplicación real, pero dejando a disposición un modelo amplio y robusto que puede ser usado en contextos reales.

En cuanto al concepto de variabilidad la tendencia de las investigaciones es hacia modelación determinística (85,37%), y tan sólo el 14,63% considera la modelación estocástica, siendo los principales aspectos de variabilidad el precio de venta y la demanda del biocombustible, y desde la perspectiva de la biomasa la cantidad disponible y su precio.

Respecto al tipo de biomasa se identificaron contribuciones para biocombustibles de primera y segunda generación con 15,38% y 69,23% respectivamente. También se encuentran cadenas que contemplan la posibilidad de hacer uso de cualquiera de estas (15,38%). Dentro de las biomásas más analizadas se encuentran residuos

forestales, rastrojo de maíz y switchgrass. En contraste, los residuos de café, materia prima objeto de estudio de esta investigación, sólo es considerada en la publicación de Duarte et al (2014) teniendo en cuenta sólo el factor económico.

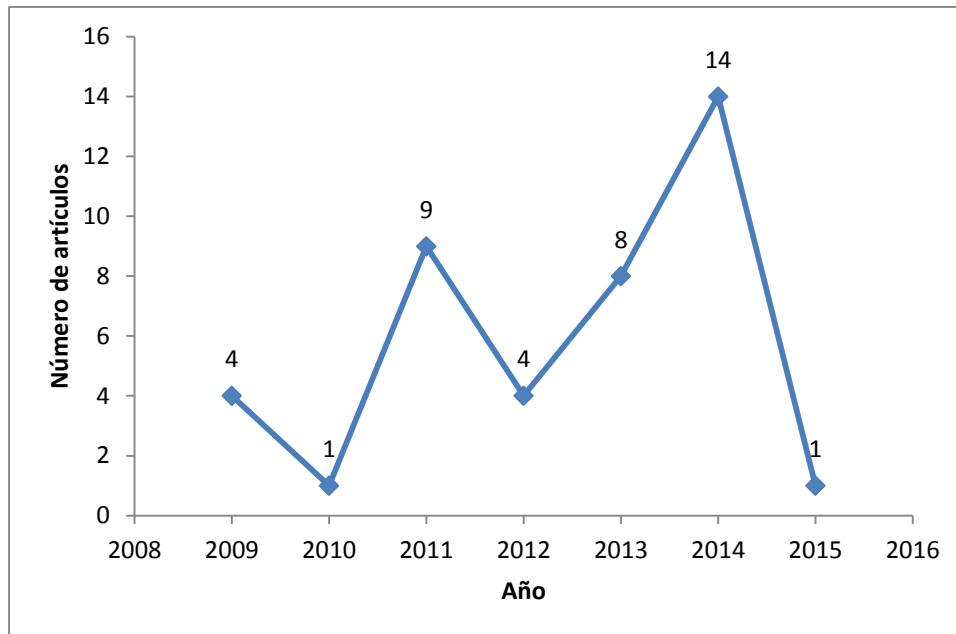
En cuanto a las técnicas de modelado, la Programación lineal entera mixta (MILP), es la que presenta un mayor porcentaje de aplicación con un 80,49%, el resto de investigaciones hacen uso de técnicas de programación no lineal entera mixta (MINLP), Programación lineal binivel (BLPP), Programación cuadrática entera mixta (MIQP), programación fraccional lineal multi-objetivo (MOLFP), programación entera mixta (MIP) y programación por metas. Los métodos de solución incluyen técnicas heurísticas y metaheurísticas como los algoritmos genéticos, al igual que híbridos con programación exacta. Finalmente, como líneas de investigación futuras se presentan temas como la incertidumbre en los modelos (26,83%) y métodos de solución alternativos (19,51%).

En conclusión, de la revisión de literatura expuesta hasta aquí, es posible evidenciar que la disponibilidad de datos es uno de los factores que ha hecho que modelos propuestos sean experimentales, y que la variabilidad de la cantidad disponible de la materia prima para la producción de biocombustible es uno de los factores aún sin considerar dentro de los modelos matemáticos propuestos. De igual manera, es posible establecer que el diseño de una de cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, considerando objetivos económicos, es aún un problema que está en fase de desarrollo y por tanto da lugar al despliegue de un proceso investigativo, con miras a generar nuevos aportes en el tema.

En cuanto a la línea de tiempo de esta búsqueda, la primera investigación realizada bajo los criterios establecidos en la ecuación de búsqueda se registra en el año 2009. En la Figura 2 se muestra la línea temporal de los artículos categorizados como relacionados con el tema de la presente investigación, donde se evidencia el año 2014, como en el que más se realizaron contribuciones en este campo (34,15%), siendo el periodo del 2011 a 2014 en el que se generó el 85,37% de las

contribuciones; por el contrario el 2010 se registra como en el que menor número de contribuciones se realizó.

Figura 2. Distribución de los artículos a través del tiempo



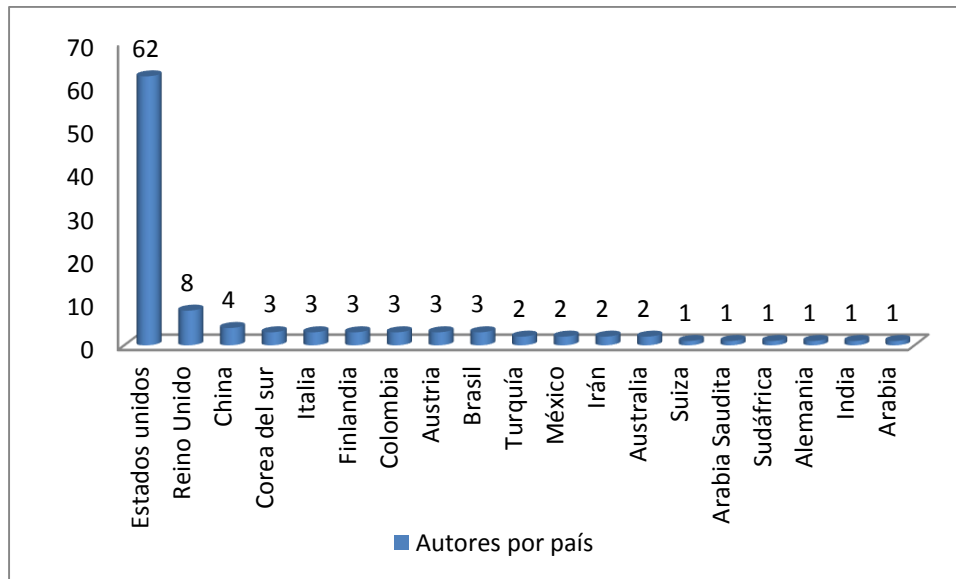
Fuente: Elaboración propia

De otro lado, los artículos analizados se encuentran distribuidos en 19 revistas diferentes, y entre las que representan un mayor número de publicaciones está ELSEVIER. Las siguientes categorías “Applied Energy”, “Energy”, y “Bioresource Technology” con cinco artículos cada una, seguidas por las categorías “Biomass and Bioenergy” y “Computers & Chemical Engineering” con cuatro artículos, las 18 publicaciones restantes se encuentran distribuidas de a una y dos en 14 revistas científicas internacionales.

Los 41 artículos analizados fueron realizados por un total de 106 investigadores, de los cuales, respecto a su país de origen el 58,49% proceden de Estados Unidos, seguido por Reino Unido y China que representan el 7,55% y 3,77% de los autores respectivamente; países como Corea del Sur, Colombia, Finlandia, Italia, Brasil y Austria comparten un 2,83%; Turquía, Australia, Irán y México son representados

cada uno de ellos por dos autores, correspondientes a 1,89%. Los países restantes son representados por un investigador.

Figura 3. País de origen de los autores



Fuente: elaboración propia.

1.4.2. Fundamentación teórica

La investigación de operaciones (IO), se remonta a la segunda guerra mundial, cuando los planificadores militares buscaron maneras de llevar los cálculos científicos a los aliados. Luego, y con motivo de la Revolución Industrial, ha ido teniendo cada vez más importancia dado el crecimiento y complejidad de las nuevas organizaciones.

Como su nombre lo indica, el objetivo de esta disciplina implica “investigar sobre las operaciones”. La IO incluye el término investigación en el nombre, porque utiliza un enfoque similar al aplicado en las áreas científicas establecidas. El método científico es usado para explorar los diversos problemas que deben ser enfrentados. En ocasiones, se usa el término *management science* o ciencia de la administración como sinónimo de investigación de operaciones” (Hillier & Lieberman, 2006).

Cuando se habla de investigación de operaciones se pueden encontrar muchas definiciones, sin embargo la que se considera más pertinente se menciona a continuación:

“La investigación de operaciones es la aplicación, por grupos interdisciplinarios, del método científico a problemas relacionados con el control de las organizaciones o sistemas (hombre-máquina), a fin de que se produzcan soluciones que mejor sirvan a los objetivos de la organización” (Parawda, 2004).

Según el entorno y naturaleza de la situación a estudiar, se han desarrollado modelos de investigación, clasificados de la siguiente manera (Soto, 2006):

- Normativos vs. Descriptivos: Un modelo descriptivo es aquel que representa una relación pero no indica ningún curso de acción. Por el contrario, el modelo normativo (llamado también modelo de optimización) debe indicar el curso de acción que debe tomarse para alcanzar el objetivo.

Los modelos descriptivos son útiles para predecir el comportamiento del sistema, pero no tienen la capacidad de identificar el «mejor» curso de acción para el administrador. La mayoría de los modelos estadísticos son descriptivos (por ejemplo, un modelo de regresión indica la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes, pero este modelo no indica qué valores se deben tomar para las variables independientes).

Los modelos normativos pueden tener submodelos descriptivos, pero, como se dijo antes, se caracterizan porque permiten determinar el mejor (o el óptimo) curso de acción. Esto implica que al modelo se ha incorporado uno o varios objetivos, restricciones, variables y parámetros.

- Determinísticos vs. Estocásticos: En un modelo determinístico las relaciones funcionales, o sea los parámetros del modelo, son conocidos con certeza. Por ejemplo, se puede decir que un tractor recorre diez kilómetros en una

hora. Pero si no estamos ciertos del parámetro, tenemos que introducir la incertidumbre, y decir, por ejemplo, que la probabilidad de que el tractor recorra diez kilómetros en una hora es de 0.75. En este caso se estará desarrollando un modelo estocástico.

- Lineales vs. No-lineales: Un modelo lineal es aquel en el cual las relaciones funcionales son tales que las variables dependientes son proporcionales a las variables independientes. Por otro lado, los modelos no-lineales emplean ecuaciones curvilíneas o no proporcionales.
- Estáticos vs. Dinámicos: Los modelos estáticos se definen para un punto fijo en el tiempo y asumen que las condiciones del modelo no cambian para el período del tiempo en el cual se quiere obtener una solución al modelo. Los modelos dinámicos se diferencian de los estáticos en que la acción óptima es determinada al examinar varios períodos de tiempo.
- Simulación: Es un proceso de modelación/experimentación usado para describir/analizar un problema dado.

Dentro de los modelos que se exponen en la clasificación anterior, se profundizará en los modelos de optimización lineales, debido a que corresponde a la descripción de lo desarrollado en el presente trabajo. Los modelos de optimización de acuerdo a los objetivos pueden recibir denominaciones específicas, como es el caso de **Facility Location**, es menester considerar previamente el concepto de cadena de suministro.

La cadena de suministro (SC) es una red de instalaciones y actividades realizadas en conjunto con el fin de desarrollar de un producto/servicio, entre estos la obtención de materia prima por parte de proveedores, transporte de materiales entre instalaciones, manufactura de productos, distribución de bienes terminados a consumidores, y seguimiento post-venta para el sostenimiento (Mabert &

Venkataramanan, 1998). La cadena de suministro incluye además de la manufactura y proveedores, los transportadores, almacenamiento, distribución y consumidores (Zanjirani & Hekmatfan, 2009).

La ubicación de instalaciones (*Facility location*) puede ser la más crítica y difícil de las decisiones requeridas para lograr la eficiencia en una cadena de suministro. Las decisiones ligadas a aspectos como transporte, inventarios, e información, resultan decisiones que pueden ser fácilmente re-optimizadas en respuesta a cambios sus condiciones dentro de la cadena; pero decisiones referentes a la ubicación de instalaciones son frecuentemente complejas y difíciles de cambiar incluso a mediano plazo por los costos relacionados, entre otros motivos. Por esta razón, las decisiones de ubicación de instalaciones es una decisión estratégica en el manejo de la cadena de suministro y juega un papel crucial en las actividades de logística involucradas en la administración de esta (Zanjirani & Hekmatfan, 2009, p. 474).

Los problemas de *facility location* (FL) ubican un conjunto de instalaciones (recursos) para minimizar los costos satisfaciendo un conjunto de demandas (de consumidores) respecto a una serie de restricciones (Zanjirani & Hekmatfan, 2009, p. 1). Como ejemplificación de los modelos correspondientes a FL, se toma el expuesto por Daskin et. al (2005), tomado de Zanjirani & Hekmatfan (2009), el cual es un modelo clásico de problema de ubicación y hace parte de la base de varios de los modelos de ubicación que se han usado en el diseño de cadenas de suministro.

Entradas del modelo

- I : conjunto de ubicaciones de consumidores, indexadas por i
- J : Conjunto de ubicación de instalaciones candidatas, indexadas por j
- h_i : Demanda del consumidor de la ubicación $i \in I$
- f_j : Costo fijo de una ubicar una instalación en el sitio candidato $j \in J$
- C_{ij} : Costo unitario de envío entre la instalación candidata en el sitio $j \in J$ y el consumidor en la posición ón $i \in I$.

Variable de decisión

- $X_j = \begin{cases} 1, & \text{si se localiza en el sitio candidato } j \in J \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$
- Y_{ij} : Fracción de la demanda del consumidor en la ubicación $i \in I$ que es suplida por la instalación en el sitio $j \in J$

Función objetivo

$$\text{Min } \sum_j^J f_j X_j + \sum_j^J \sum_i^I h_i C_{ij} Y_{ij} \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_j^J Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i \in I; j \in J \quad (3)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$Y_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I; j \in J \quad (5)$$

La función objetivo se representa en la ecuación (1) que minimiza los costos totales, en este caso dado por el costo de ubicar una instalación y el costo del envío del producto desde el conjunto de instalaciones que operan en la red. El conjunto de ecuaciones (2) estipula que cada uno de los nodos de demanda es suplido en su totalidad. El bloque de ecuaciones (3) refiere que un nodo de demanda no puede ser suplido por una instalación que no haya sido abierta en una ubicación. En (4) se hace referencia a la naturaleza de variable binaria, pudiendo tomar valores de 0 o 1; finalmente, en (5) se expresa la no negatividad de los flujos generados entre nodos.

De acuerdo a las características particulares de cada uno de los problemas que se puedan presentar en ubicación de instalaciones y a los objetivos requeridos por parte de los investigadores, el conjunto de restricciones, parámetros, variables de decisión y función objetivo, se ven modificados para representar de una mejor manera la realidad caso de estudio.

1.4.3. Marco legal

La producción y distribución de alcohol carburante o etanol en Colombia, se encuentra enmarcado bajo una serie de normatividades expedidas por el Ministerio de minas y energía. Con el fin de hacer referencia a las resoluciones, leyes y decretos vigentes en el momento del desarrollo de la investigación se expone la Tabla 2, tomada de la Federación Nacional de Biocombustibles (2016).

Tabla 2. Normatividad general de biocombustibles en Colombia

TIPO	NÚMERO	AÑO	CONTENIDO
Resolución	0789	2016 (May.20)	Por la cual se modifica la Resolución 898 de 1995 en lo relacionado con los parámetros y requisitos de calidad del Etanol Anhidro Combustible y Etanol Anhidro Combustible Desnaturalizado utilizado como componente oxigenante de gasolinas y se dictan otras disposiciones.
Resolución	41072	2015 (Oct.01)	Por la cual se establece el porcentaje de mezcla de alcohol carburante para la zona Suroccidental del país para uso en vehículos automotores.
Resolución	40565	2015 (May.15)	Por medio de la cual se establece la metodología para determinar el déficit de alcohol carburante en la oferta nacional.
Ley	1715	2014 (May.13)	Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.
Resolución	90454	2014 (Abr. 29)	Por medio de la cual se modifica la Resolución 180687 de 2003, donde se permite la exportación de alcoholes carburantes en la medida que se garantice el abastecimiento interno y la importación siempre y cuando exista déficit en la oferta.
Resolución	90932	2013 (Oct.31)	Por la cual se establece el porcentaje de mezcla de alcohol carburante con las gasolinas en algunas plantas de abastecimiento mayorista (E10).

TIPO	NÚMERO	AÑO	CONTENIDO
Decreto	4892	2011 (Dic.23)	Por el cual se dictan disposiciones aplicables al uso de alcoholes carburantes y biocombustibles para vehículos automotores.
Resolución	181555	2010 (Ago.31)	Por la cual se modifica la Resolución 8 2438 del 23 de diciembre de 1998 y se establecen disposiciones relacionadas con la estructura de precios de la Gasolina Motor Corriente y Gasolina Motor Corriente Oxigenada.
Decreto	1135	2009 (Mar.31)	Por el cual se modifica el Decreto 2629 de 2007, en relación con el uso de alcoholes carburantes en el país y con las medidas aplicables a los vehículos automotores que utilicen gasolinas para su funcionamiento.
Conpes	3510	2008 (Mar.31)	Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia.
Resolución	2200	2005 (Dic.29)	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1565 del 27 de diciembre de 2004.
Resolución	181069	2005 (Ago.18)	Por la cual se modifica la Resolución 18 0687 del 17 de junio de 2003 y se establecen otras disposiciones.
Resolución	1565	2004 (Dic.27)	Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 898 del 23 de agosto de 1995, que regula los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna.
Resolución	180687	2003 (Jun.17)	Por la cual se expide la regulación técnica prevista en la Ley 693 de 2001, en relación con la producción, acopio, distribución y puntos de mezcla de los alcoholes carburantes y su uso en los combustibles nacionales e importados.
Ley	788	2002 (Dic.27)	Por la cual se expiden normas en materia tributaria y penal del orden nacional y territorial; y se dictan otras disposiciones.
Ley	693	2001 (Sep.19)	Por la cual se dictan normas sobre el uso de alcoholes carburantes, se crean estímulos para su producción, comercialización y consumo, y se dictan otras disposiciones.

Fuente: Federación Nacional de Biocombustibles (2016).

Adicionalmente, en el mencionado documento se hace referencia a la resolución número 4-0717 de 26 de julio de 2016, por la cual se restablece el porcentaje de mezcla de alcohol carburante con gasolina motor en las plantas de abastecimiento ubicadas en los departamentos de Antioquia, Atlántico, Bolívar, Cundinamarca, Huila y Tolima.

Respecto a transporte se remite a la normatividad expuesta en la resolución número 9 – 1867 del Ministerio de minas y energía, por medio de la cual se definen las tarifas de transporte terrestre para biocombustibles, al igual que la No. 003175 de 2008 del Ministerio de transporte en la que se establecen las relaciones económicas entre las empresas de transporte y los propietarios, poseedores o tenedores de vehículos de servicio público de transporte terrestre automotor de carga.

1.5. DISEÑO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Tipo de investigación

El desarrollo de la investigación estará soportado por las ciencias empírico-analíticas, al tener una primera fase de análisis de referentes teóricos, contexto y situación actual de los involucrados en la cadena de suministro para la producción de biocombustible a partir de residuos de café, lo que determinará las características adoptadas por el modelo propuesto. Posterior al planteamiento del modelo, se presenta la segunda etapa, donde será validado su desempeño mediante simulación computacional.

1.5.2. Hipótesis general de la investigación

Al encontrarse soportado el desarrollo de la presente investigación en las ciencias empírico-analíticas, y al ser una de sus etapas la validación, la hipótesis tentativa que guía la investigación, es la siguiente: *Es posible generar un diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, considerando la disponibilidad variable de la materia prima y lograr en esta un funcionamiento eficiente desde la decisión de ubicación instalaciones.*

Tomando como referencia la hipótesis general de la investigación, se derivan las siguientes variables:

- Variables dependientes: desempeño de la cadena de abastecimiento en términos de eficiencia económica.
- Variable independiente: Estructura de la cadena de abastecimiento considerando decisiones referentes a instalaciones, desempeño variable de la materia prima y su disponibilidad de acuerdo a la época del año y región productora.

En este contexto, el desempeño de la estructura propuesta para la cadena de abastecimiento se medirá en función a la eficiencia que ésta represente en cuanto al factor económico. Así, la hipótesis será comprobada si al tener en cuenta los lineamientos anteriores en el diseño de la cadena de suministro se logra un buen desempeño en la minimización del costo total de la cadena.

1.5.3. Estrategia Metodológica

El desarrollo del proyecto, se divide en tres etapas de acuerdo al cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos planteados:

- **Etap 1: Revisión de la literatura y sistematización de los referentes teóricos.** Como primera etapa se realizará una revisión de la literatura que permita identificar los aspectos que deben ser considerados en el diseño de la cadena de suministro de biocombustible en cuanto a decisiones de instalaciones. De esta manera se analizarán las variables, parámetros, objetivos, y la manera en que ha sido abordada la eficiencia económica y ambiental en los estudios existentes.
- **Etap 2: Construcción del modelo matemático.** A través de ecuaciones y relaciones matemáticas, y como insumo los objetivos, variables, parámetros

y restricciones planteados, se construye el modelo matemático que representará el problema tratado. De esta manera, las restricciones serán representadas como ecuaciones que limitan los recursos e influyen en los valores que tomarán las variables de decisión, y éstas últimas aportarán al nivel del objetivo económico que será expresado en función de las variables. Debido a que los modelos problemas de ubicación y asignación discretas son considerados del tipo NP-duro (Murat, Verter & Laporte, 2010), se determina la metodología de solución adecuada para complejidad computacional del modelo.

- **Etapa 3: Validación del desempeño del modelo matemático mediante simulación computacional de las regiones cafeteras de Colombia.** Una vez conformado el marco del modelo matemático y su metodología de solución, se procede a la búsqueda de información necesaria de acuerdo a los parámetros establecidos para validar el desempeño del modelo propuesto.

2. ASPECTOS CONSIDERADOS EN EL DISEÑO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOCOMBUSTIBLE

En el desarrollo de este capítulo se presenta la fundamentación y soporte de cuatro principales aspectos considerados en el planteamiento del modelo de optimización: variables y parámetros, caracterización de residuos, indicadores y la estacionalidad de la materia prima seleccionada para el caso de estudio en Colombia.

En la primera sección, se introducirán las variables y los parámetros que se consideran desde la teoría deben ser involucrados en el momento del planteamiento de modelos como herramientas para la toma de decisiones referentes al diseño de cadenas de suministro. Desde el punto de vista de la caracterización de residuos y subproductos, serán definidos y expuestas sus características, además del volumen de producción de estos en el país caso de estudio, y de acuerdo a estudios previos la cantidad que representan en términos de bioetanol.

Posteriormente, serán definidos algunos de los indicadores expuestos en estudios referentes al diseño de cadenas de suministro, de los cuales se seleccionará el que mejor represente el desempeño de la configuración de la cadena de suministro, y por tanto, del modelo propuesto.

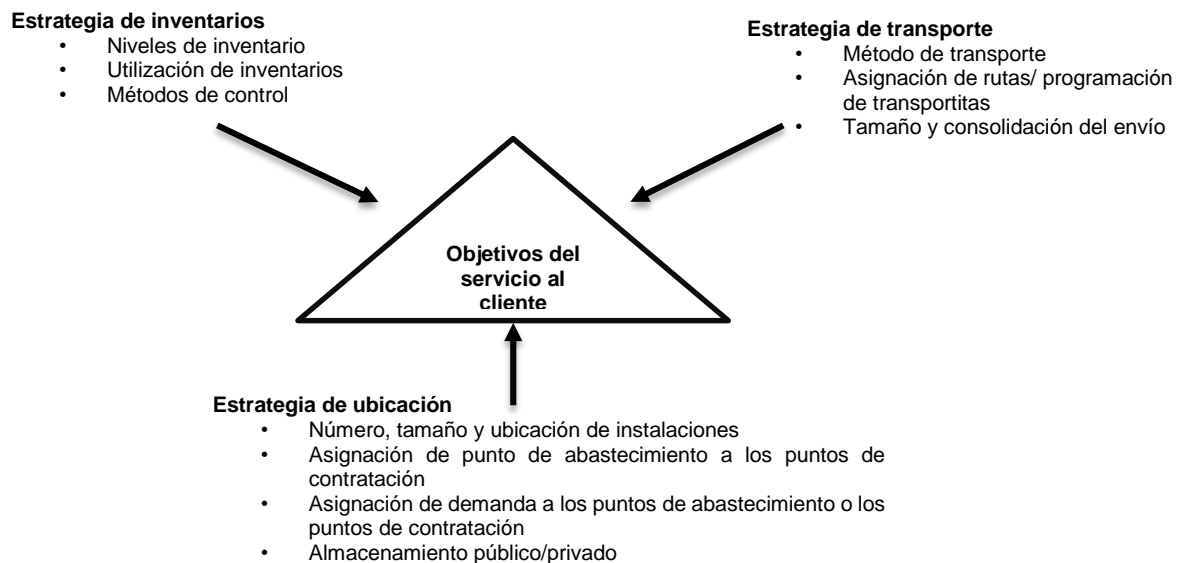
Finalmente, se sustenta el comportamiento estacional de la producción cafetera, y por tanto de sus residuos y subproductos, aspecto que es objeto de estudio y componente del modelo matemático. Así, en este capítulo se considerarán desde referentes teóricos los aspectos que serán incluidos en el modelo matemático, previo a su desarrollo.

2.1. Variables y Parámetros

El concepto de diseño y planeación de cadenas de suministro ha sido objeto de estudio de diferentes autores tales como Chopra & Meindl (2008), Ballou (2004), Bowersox, Closs & Cooper (2007), entre otros, estableciéndose una base de conocimiento teórico y aspectos que han de considerar modelos concernientes al tema en sus variables y parámetros.

Ballou (2004) considera que la planeación logística aborda cuatro áreas principales de problemas: niveles de servicio al cliente, ubicación de instalaciones, decisiones de inventario, y por último las referentes a transporte. Exceptuando la primera de las problemáticas se genera un triángulo de toma de decisiones logísticas, ejerciendo cada uno de los eslabones de la Figura 4 un impacto importante sobre el diseño del sistema.

Figura 4. Triángulo de la toma de decisiones logísticas



Fuente: Ballou (2004).

De acuerdo con la concepción y planteamiento de la presente investigación, el modelo propuesto responde específicamente a problemas de ubicación y

asignación, partiendo de la disposición geográfica de cada uno de los proveedores de materia prima, y alternativas de ubicación para puntos de abastecimiento y demás eslabones de la cadena de suministro, disponiendo así un bosquejo para el plan de logística y por tanto para el modelo de optimización.

Las decisiones de localización de instalaciones (FLD) establecen la ubicación que de acuerdo a los objetivos (económicos, servicio al cliente, entre otros) de los administradores de la cadena de suministro sea la más adecuada. Los problemas concernientes a ubicación han de incluir todos los movimientos y flujos de productos entre los eslabones, y los costos asociados a medida que estos se presenten, debido a que “La búsqueda de asignaciones de costos más bajos, o en forma alternativa, las asignaciones de utilidad máxima, son la esencia de la estrategia de ubicación de instalaciones” (Ballou, 2004). Así, un modelo que contemple la estrategia de ubicación ha de responder a aspectos tales como: número, ubicación y tamaño de las instalaciones y su respectiva asignación de demanda.

Las decisiones referentes a diseño de instalaciones, responden a estrategias que tienen una vigencia de largo plazo, debido a que lo que se proponga requiere generalmente inversiones importantes de capital, comprometiendo a la compañía a desarrollar sus operaciones en dicho sitio por un tiempo considerable, de esta manera un buen diseño puede conllevar a operaciones eficientes por años (Ballou, 2004), y decisiones de este tipo deben ser evaluadas entre otros bajo parámetros asociados a costos de apertura y operación asociados .

Aspectos como el dimensionamiento de las instalaciones son importantes, además de su inversión por que pasan a actuar como restricción sobre las operaciones que se realicen en esta. Así, una decisión errada en este aspecto, al asignar mucha capacidad a una ubicación, conllevará a costos elevados como consecuencia de la utilización deficiente de las instalaciones; en caso contrario, una asignación muy baja propicia inconvenientes en la capacidad de respuesta, lo que perjudicaría el

servicio al cliente al no satisfacer la demanda, y elevaría costos al ser suplida la demanda por otra instalación distante (Chopra & Meindl, 2008).

Las decisiones concernientes a operación de cadenas de suministro se afectan mutuamente, representando implícitamente la modificación de una decisión cambio en otras. Así, se encuentran las decisiones de programación en una cadena de suministro respecto a la asignación con impacto significativo en su desempeño, respondiendo a la coordinación de flujos entre cada uno de los eslabones que la componen, siendo las decisiones de las cantidades que se moverán, determinaciones importantes que han de garantizar el buen y oportuno suministro para el eficiente funcionamiento del sistema. Además de niveles de flujo se hace referencia a la asignación de las fuentes de suministros y mercados a las instalaciones, decisiones que afectan costos totales de producción, inventario y transporte en que se incurre para satisfacer la demanda.

De acuerdo con lo expuesto por Ballou (2004), un aspecto importante por considerar en el momento de la toma de decisiones logísticas, ya sean de carácter estratégico y/u operativo dentro de una cadena de suministro se encuentran los pronósticos, debido a la dinámica presentada en cifras tales como demanda, tiempos, precios y costos. En cuanto al diseño, proporciona flexibilidad y rápida respuesta.

De esta manera, se puede deducir que en la práctica los modelos para el diseño de cadenas de suministro se usan entre otras decisiones, para decidir los sitios donde se establecerán las instalaciones y la capacidad que se le asignará a cada una y/o para asignar la demanda actual a las instalaciones disponibles e identificar las rutas de transporte del producto (Chopra & Meindl, 2008). En ambos casos el objetivo del modelo se remite a maximizar las utilidades, satisfaciendo a su vez las necesidades del cliente.

Con lo expuesto, se puede lograr una aproximación en cuanto a parámetros necesarios en un modelo de ubicación y asignación para la operación de una cadena suministro, siendo los siguientes ítems información de suministro:

- Ubicación de las fuentes de abastecimiento y mercados.
- Ubicación de los sitios de las posibles instalaciones.
- Pronóstico de la demanda por mercado.
- Costos de instalación, mano de obra y material por sitio.
- Costos de transporte entre cada par de sitios.
- Costos de inventario por sitio y como una función de la cantidad.

La información expuesta hasta aquí, sustentada principalmente en Chopra & Meindl (2008) y Ballou (2004), es una visión desde lo teórico referente a las variables y parámetros que se proponen ser considerados en el planteamiento de un modelo de ubicación y asignación de una cadena de suministro.

Existen otros factores como los considerados por Duarte, Sarache & Matallana (2013), en el desarrollo de su estudio: “Factores incidentes en la ubicación de instalaciones: una aplicación en el sector de biocombustibles en Colombia”, donde se identificaron los siguientes: La seguridad y la criminalidad, la actitud del gobierno local hacia un proyecto, la calidad y la fiabilidad de los servicios públicos, la calidad de la infraestructura de transporte, la actitud de la comunidad hacia un proyecto y el impacto social de la región y la capacidad agrícola. Sin embargo, a juicio de los expertos, los dos factores más importantes fueron la calidad de la infraestructura de transporte y la capacidad agrícola de la región. Dichos factores podrían ser adoptados desde un modelo de toma de decisiones referentes a localización que tenga el enfoque de sostenibilidad, contemplando además de factores económicos, los sociales y ambientales; sin embargo como anexo al modelo matemático bajo objetivos económicos que se propone en el desarrollo del presente, se analizan previamente algunos de estos factores en los departamentos que se encuentran como alternativa de ubicación.

2.2. Caracterización de residuos

Al ser arrojados los residuos y subproductos de café al medio ambiente, se convierten en un causante de contaminación de fuentes hídricas, por lo que ha sido objeto de estudio los usos alternativos que le puedan ser dados a estos, identificando en algunos de los subproductos y residuos (pulpa fresca o excarpio, tallos o zoca, y mucílago) las propiedades necesarias para ser materia prima en la producción de bioetanol, obtenido de los azúcares de la biomasa celulósica. La producción de etanol a partir de celulosa se logra a través de la degradación de ésta para obtener celooligosacáridos y glucosa, seguido de la conversión de la glucosa a etanol por diferentes microorganismos como levaduras y bacterias (Kotaka et. al., 2008). Otros residuos como el cisco o la cascarilla son utilizados como combustible directo; y ripios, café deteriorado, y borra, en la generación de biodiesel (Rodríguez & Zambrano, 2010).

De esta manera, se pueden definir los residuos como materiales lignocelulósicos, los cuales a su vez se encuentran clasificados en tres tipos: residuos agrícolas, subproductos de procesos agrícolas y cultivos destinados a la generación de energía (Triana, 2011). Los primeros se generan como resultado de procesos de la agroindustria tales como los tallos de café; por su parte los subproductos de procesos agrícolas resultan de procesos que se practican en el sector agrícola, ejemplo la pulpa fresca y mucílago de café, finalmente los cultivos destinados a la generación de energía, son los que sus productos son reservados exclusivamente para la producción de biocombustible. Para ser materia prima en la generación de biocombustible los tres tipos de materiales lignocelulósicos deben presentar niveles significativos en tres propiedades: celulosa (C), hemicelulosa (H), y lignina (L), en la Tabla 3 se presentan los niveles de las propiedades por dos de las tres materias primas consideradas en el presente estudio para la producción de etanol. Para el mucílago no se registran niveles de hemicelulosa y lignocelulosa, estando su composición caracterizada por 35,8% de sustancias pépticas totales, 45,8 % de azúcares medios y 17% de celulosa (Restrepo, 2010).

Tabla 3. Propiedades de residuos y subproductos de café - etanol

Componente	Zoca			Pulpa		
	C	H	L	C	H	L
Composición (%)	45 – 50	24 – 40	18 -25	20.7	3.6	14.3

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, en la Tabla 4 se exponen datos referentes a los subproductos del cultivo de café mucílago y pulpa, y del residuo tallos/zoca, recopilados de estudios realizados por Cenicafé (2010) y Triana (2010). La primera columna expone cada uno de los tres subproductos y residuos identificados como potencial materia prima para la producción de etanol, en la siguiente columna se expone la cantidad en gramos de cada uno de estos que se obtiene de un kilogramo de café, las “toneladas generadas” se encuentran en función a cada millón de sacos (60 Kg) de café producido, a excepción de los tallos que se encuentran en función de las hectáreas, el siguiente campo expone la cantidad de litros de etanol generado por cada tonelada de residuo, la “producción media” hace referencia a la cantidad de residuos por año, y finalmente la capacidad calorífica generada por cada uno de los residuos.

Tabla 4. Subproducto/Residuo materia prima para la producción de bioetanol

Residuo/ Subproducto	Gramos	Toneladas Generadas	Litros de etanol/ tonelada	Producción media (Kg/ha-año)	Capacidad calorífica (MJ/Kg)
Pulpa Fresca o excarpio	436	162900	25,17	2,258	0,53
Tallos	0,6	16ton/ha (5000 árboles/ha)	240	3,200	14
Mucílago	149	55500	58,37	768	1,23

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se expone una breve descripción de los residuos objeto de estudio para la presente investigación, de cada uno de estos es expuesto en el anexo 2 el debido proceso para la obtención de etanol, correspondientes a estudios previos donde se comprueba químicamente su aptitud para la producción de etanol, por su

parte los flujogramas hacen parte de una recopilación previa realizada por la autora de la presente investigación (Castro, 2015).

La pulpa del café es un subproducto generado durante el procesamiento por vía húmeda, representa el 40% de todo el grano que se despulpa, por lo tanto, es un subproducto agrícola abundante, que a su vez constituye un riesgo potencial de contaminación en los países productores por su alto contenido de fenólicos y otros compuestos (Murthy & Naidu, 2002) (Bonilla-Hermosa, Duarte & Schwan, 2014).

En este contexto, al ser considerado un potencial contaminante para el medio ambiente, se ha buscado usos alternativos para este material. Así, la producción de bioetanol a partir de este subproducto ha sido una opción de uso (Rodríguez, N. (2007); Rodríguez & Cárdenas (2009); Menezes, E. G. T. (2013); Bonilla-Hermosa, V. A., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014); Choi et. al. (2012); Navia, D. P. P., de Velasco, R. J. M., & Hoyos, J. L. C. (2011), y Gurram et. al. (2015), entre otros). Como referencia para exponer el proceso de producción (anexo 2) se toma el estudio de Gurram et. al. (2015), el cual como materia prima consideró 50 g de pulpa de café recién hecho en enero de 2014 de una finca de café en Tanetze, México, en el estado de Oaxaca. La muestra de la pulpa de café se envolvió en doble bolsa de plástico para congelar y se colocó en el interior de varios pares de calcetines para el aislamiento. La muestra se mantuvo congelada a temperatura de -18°C hasta su análisis en abril de 2014 (exceptuando las 24 horas de viaje).

Por su parte como residuo del proceso agrícola, la Zoca o CCS es un corte por encima del suelo donde se encuentra sembrada la planta de café de alrededor de 15 a 20 cm. Este procedimiento es una práctica agrícola la cual permite mejorar la productividad de la planta de café y es una de las técnicas de renovación de cultivos más empleadas en países cafeteros como Colombia. Este material es generado por temporadas en plantaciones de café, siendo apilados en terrenos para ser quemados y en la mayoría de los casos abandonados únicamente.

Actualmente, la zoca de café no tiene un uso definido aparte de servir como fertilizante, regenerador de suelos cuando es quemado, en la fabricación de muebles y para incrementar la productividad de los suelos en forma de cenizas. Sin embargo, la práctica de incineración tiene algunas implicaciones ambientales como polución por CO₂, contribuyendo al incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera.

En la búsqueda de estudios que muestren el proceso de producción de bioetanol a partir de la zoca de café, se registra el realizado por el ingeniero químico y Msc. en ingeniería Cristian Fernando Triana Caranton en el año 2010, su estudio “Producción de etanol a partir de residuos provenientes del cultivo de café”, muestra la caracterización de este residuo agrícola y el proceso mediante el cual se obtiene bioetanol (Proceso: anexo 2).

Finalmente, el grano de café recién despulpado está cubierto de una capa mucilaginosa (mesocarpio), que es 15.55 a 22% del peso del fruto maduro con relación al contenido de humedad. El mucílago es una estructura rica en azúcares y pectina que cubre el endospermo de la semilla y mide aproximadamente 0.4 milímetros de espesor (Anacafé, 2015). Por sus características estudios como Caballero et.al. (2012), Navarro, Castillo, & López (2013), Rodríguez & Zambrano (2014), Rodríguez (2007), Guzmán (2014), entre otros; proponen la generación de etanol a partir de este subproducto.

Para efectos del presente estudio se toma como referencia el proceso propuesto por Guzmán (2014), titulado “Estandarización de producción de bioetanol a base de mucílago de café en la planta de biocombustibles del Tecno-parque Yamboro del SENA Pitalito, Huila” (Anexo 2). Las destilaciones realizadas en el estudio fueron hechas en diferentes semanas inoculando el mucílago en todas las pruebas con un porcentaje de 35% con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*; se destilaron 208 litros de mucílago.

De acuerdo con cálculos realizados por Cenicafe (2010), por cada millón de sacos de café verde producido se genera de pulpa fresca y mucílago fresco, 162.900 y 55.500 toneladas respectivamente, al considerar que por cada tonelada de pulpa fresca se obtiene 25,17 litros de etanol, y por la misma cantidad de mucílago 58,37 litros. Se puede deducir que por cada millón de sacos de café verde producido se obtendría un total de 1.939.162 de galones de etanol, de los cuales 1.083.274 corresponderían a la pulpa, y 855. 888 al mucílago como materia prima.

Según datos presentados por la FNC (2016), en el año 2015 se registró una producción de 14.175 millones de sacos de 60 Kg de café verde, los cuales de acuerdo al factor de conversión expuesto (1 millón de sacos de café = 1.939.162 galones) se hubiese obtenido para el año 2015 una producción de 27.487.621,35 galones de etanol (104.051.916,7 litros) siendo el promedio de producción diaria 285.073,7 litros.

Respecto a la materia prima de tallos de café, puede ser obtenida por dos tipos de labor, renovación por siembra o zoca, las cuales registraron para el año 2014 un total de 33.821 y 26.105 hectáreas, respectivamente (SICA, 2015). Según Cenicafe durante el proceso de renovación se reporta una producción de madera seca de 16 t/ha, de acuerdo con lo anterior se puede deducir que para el 2014 se obtuvo 541.134 ton por la renovación de siembra, y por zoca 417.673 ton. Triana (2011) expone que una tonelada de tallos tiene un rendimiento de 240 litros de etanol, al aplicar dicho factor de conversión a un promedio de producción de litros de etanol por día arrojaría 630.448,6 (renovación siembra: 355.814,3, renovación zoca: 274.634,3). Con el panorama expuesto, asumiendo que toda la materia prima (mucílago, pulpa, tallos) puede ser recolectada, se obtendría en promedio un total de 915.522,3 litros diarios de etanol.

2.3. Indicadores

En los últimos años, se asiste a un desarrollo profuso en el ámbito de los indicadores para la toma de decisiones, particularmente por parte de los países desarrollados y de algunas agencias internacionales, presentándose iniciativas que comprenden escalas diversas y enfoques metodológicos distintos².

Es así, como el desarrollo de un diseño de cadena de suministro con objetivo económico, conlleva a establecer de acuerdo al contexto los indicadores adecuados a ser considerados en el planteamiento del modelo matemático, y que estos sean representativos de la problemática objetivo de solución.

En cuanto a indicadores que representen el aspecto económico en una cadena de suministro, se han establecido hasta el momento varios de estos, siendo estos considerados y analizados al momento de plantear el modelo matemático, y escogiendo el que mejor represente el desempeño de la cadena de suministro para biocombustible y el caso de estudio, Colombia. Considerando el indicador como una medida que sirve para mostrar algo con indicios o señales (RAE), en los diferentes estudios analizados en la aproximación al estado del arte desde el ámbito económico se han identificado los siguientes indicadores:

- Ganancias: hace referencia a la diferencia que existe entre los beneficios menos los costos fijos como variables a los que se incurre en el funcionamiento de la cadena de suministro; siendo de esta manera valor objetivo de ser optimizado con el modelo propuesto.
- Costos: siendo objeto de minimización, los costos hacen referencia a los egresos a los que se incurre para el funcionamiento de la cadena de suministro, dentro de los cuales pueden considerarse: suministro de

² QUIROGA, Rayén. Indicadores de sostenibilidad ambiental y de desarrollo sostenible: estado del arte y perspectivas. Santiago de Chile. Septiembre de 2001, págs. 7. Disponible en: <http://www.uv.mx/mie/files/2012/10/SESSION-7-Quiroga-Indics-Sost-Amb-y-DS-CEPAL-16.pdf>

biomasa, valores fijos y variables de la producción de biocombustible, compra de combustibles fósiles para el proceso posterior de mezcla, transporte de los diferentes flujos generados en la cadena, entre otros que se pueden particularizar en cada caso específico de estudio.

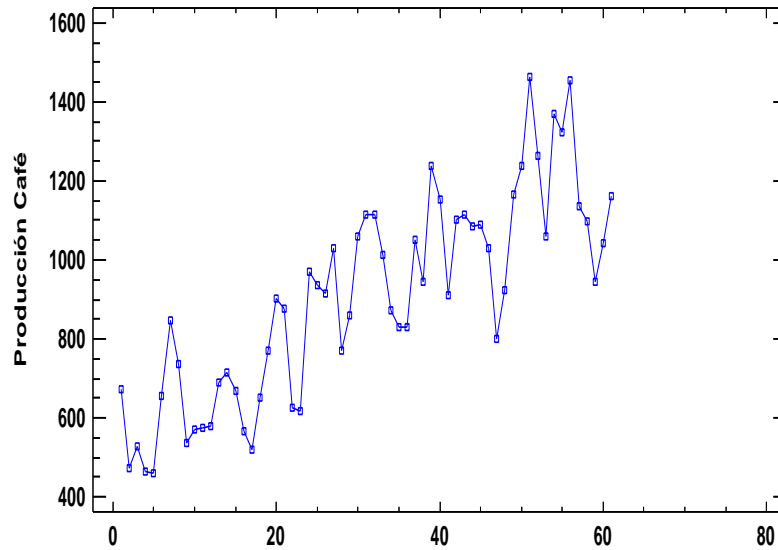
Generalmente, al tratarse de objetivos económicos los que más utilización presentan son la maximización de ganancias, y minimización de costos generados, sin embargo se registraron investigaciones que hacen uso de términos financieros tales como: VPN (Valor Presente Neto) siendo el objetivo maximizarlo, Periodo de recuperación y costo capital, VANE (Valor Actual Neto) y Cvar (Valor en riesgo condicional), siendo este último considerado como un buen indicador de riesgo de mercado en economías emergentes. De los indicadores expuestos, como referente para el planteamiento del modelo matemático son tomados los costos totales, debido a que de manera global brinda un panorama de eficiencia económica en relación a las decisiones de ubicación y asignación, además representar implícitamente costos en los que se incurre para el óptimo funcionamiento de una cadena de suministro.

2.4. Estacionalidad de la materia prima

2.4.1. Mucílago y pulpa

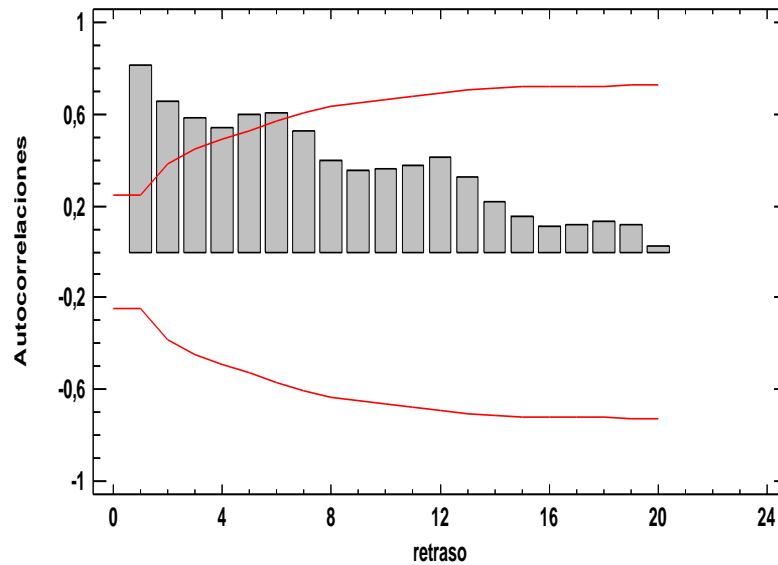
Para el análisis de la estacionalidad de la producción de los subproductos de café (mucílago y pulpa) es seleccionada como base de datos el volumen de producción mensual de café en Colombia. Las cifras se encuentran dadas en miles de sacos de 60 Kg de café verde recopilados entre mayo de 2011 a mayo 2016, para un total de 61 observaciones (FNC, s.f.). A partir de los datos disponibles se obtiene la Figura 5 para el análisis en el tiempo de la producción de café en Colombia.

Figura 5. Serie de tiempo – Producción café



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Autocorrelaciones estimadas



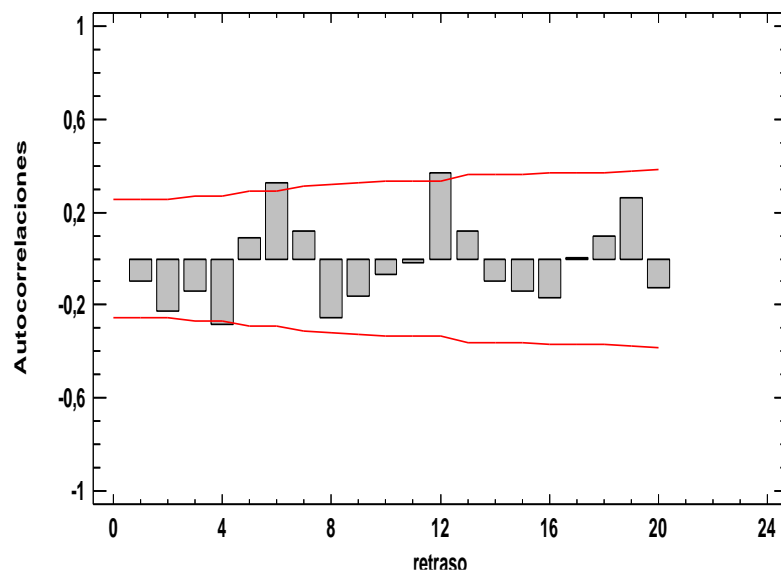
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Gráfica “serie de tiempo – Producción café” de la Figura 5, presenta una aparente estacionalidad. Sin embargo, no se hace clara la longitud de esta, por lo que se expone en la Figura 6 el autocorrelograma de dichos valores, mediante el cual se observa que existe correlación entre los datos de la serie, y para un determinado tiempo t , su valor dependerá de los datos comprendidos entre $t-1$ a t .

6, lo cual indica que la producción obtenida en un determinado mes, dependerá del volumen presentado en los 6 meses anteriores.

Con las gráficas anteriores, se evidencian correlaciones y estacionalidad, al ser esta última no muy clara ya que las correlaciones deberían decrecer exponencialmente. Se aplica diferenciación de orden no estacional 1, y se exponen nuevamente las gráficas donde se observan unos patrones, cada determinado periodo. Al aplicar esta diferenciación, es eliminada la tendencia de la serie.

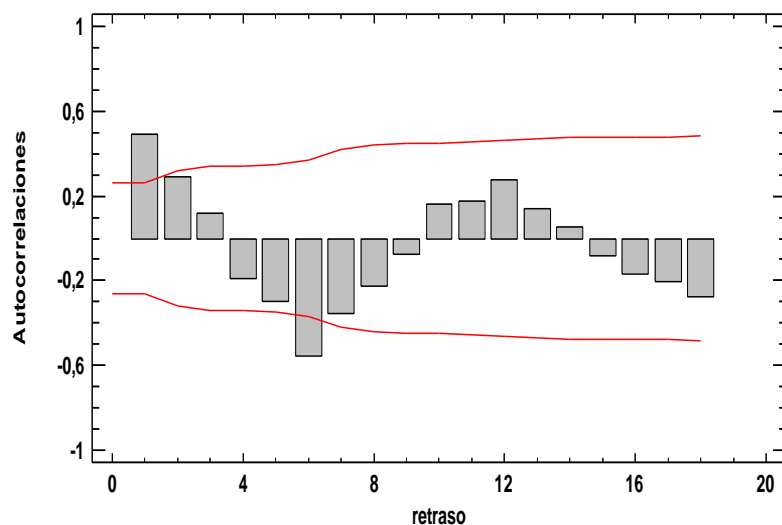
Figura 7. Autocorrelaciones estimadas orden no estacional 1



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las autocorrelaciones estimadas para ajuste de la variable analizada, en la Figura 7 son notorias las dos correlaciones más fuertes dadas en el periodo 6 (0,3244), y en el periodo 12 (0,3667). De igual manera, se evidencia una correlación en el periodo 4 no tan significativa como las anteriores con un valor de -0,2804. Teniendo como referente una estacionalidad de 6 periodos para la serie de tiempo y realizar la diferenciación de orden estacional, se obtiene la Figura 8, donde se observan dos correlaciones significativas: en el periodo 1 (0,489) y la más alta en el periodo 6 (-0,557).

Figura 8. Autocorrelaciones estimadas diferenciación estacional



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, se identifica que la serie de producción de café presenta una longitud de estacionalidad de 6 periodos, coincidiendo el presente análisis de longitud de estacionalidad con los dos periodos de floración que se presentan en el año para este cultivo en Colombia: Uno que va de enero a marzo, y otro de julio a septiembre, siendo la cosecha principal en estas zonas realizada entre septiembre y diciembre y una segunda cosecha entre abril y junio (denominada “mitaca”), (FNC, 2010).

De igual manera, de acuerdo con la Figura 1, referente al mapa de cosechas en Colombia se realiza la Tabla 5, donde se exponen cuatro zonas del país y los periodos de sus respectivas cosechas principales; evidenciándose además dos periodos en el año en los que coinciden tres de las cuatro zonas, generándose un mayor volumen de producción.

Tabla 5. Cosechas principales por zona en Colombia

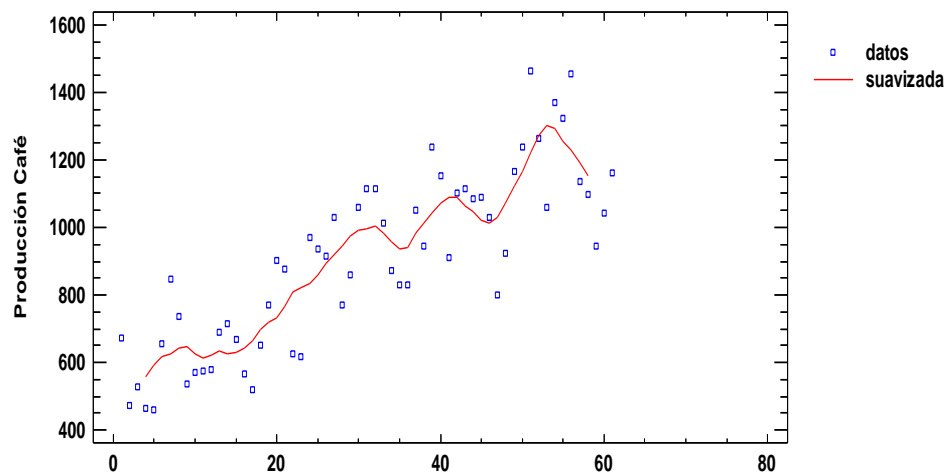
	Zona Nor-oriental	Zona Centro	Zona Centro – sur	Zona sur
Enero	SIN ALTO VOLUMEN DE COSECHA			
Febrero				
Marzo				
Abril				
Mayo				

Junio				
Julio	SIN ALTO VOLUMEN DE COSECHA			
Agosto				
Septiembre				
Octubre				
Noviembre				
Diciembre				

Fuente: Elaboración propia. **NO ES CLARO**

Gráficamente, después de haber suavizado la serie con una longitud de la estacionalidad de 6, y a través del Promedio móvil con longitud 6; se evidencia que la tendencia de la serie es creciente.

Figura 9. Serie de tiempo suavizada

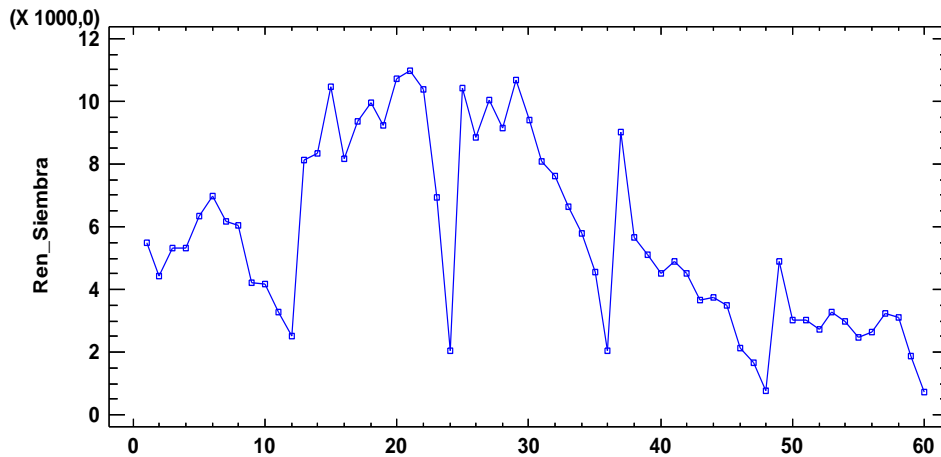


Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Renovación por siembra

Una de las fuentes para la obtención de materia prima “tallos” es la renovación realizada a los cultivos de café por siembra, como serie de tiempo objeto de análisis, se toma la registrada por el Sistema de Información Cafetera (SICA) de la FNC (2015), el periodo observado se encuentra comprendido desde enero del 2010 hasta diciembre de 2014, con un total de 60 observaciones, correspondiendo los datos al número total de hectáreas renovadas por siembra.

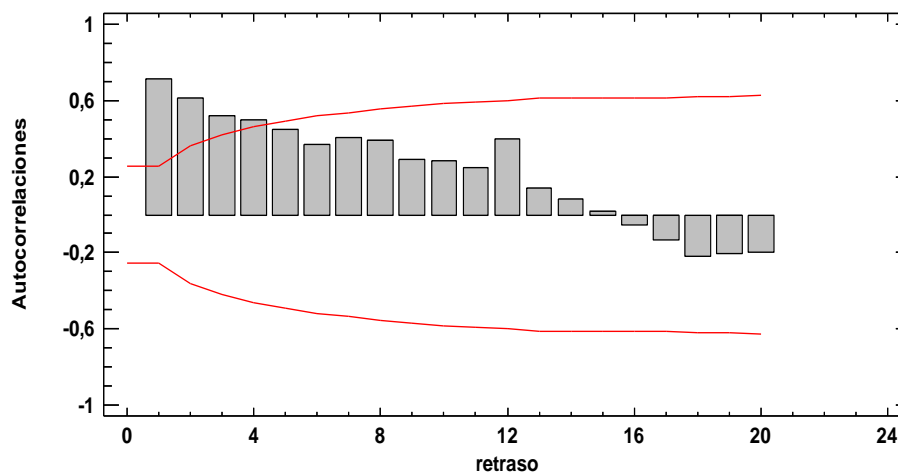
Figura 10. Serie de tiempo – Renovación siembra



Fuente: Elaboración propia

Los datos de la serie son expuestos de manera gráfica en la Figura 10, en la cual se presenta una aparente estacionalidad, de la cual para establecer de una manera más exacta su longitud se remite a la Figura 11, correspondiente al autocorrelograma

Figura 11. Autocorrelaciones – Renovación siembra

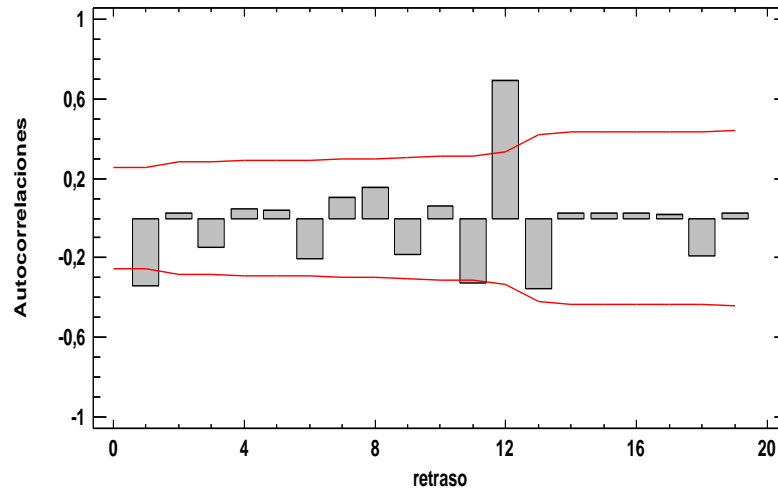


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 11 resulta evidente una correlación entre los datos de la serie, donde un determinado tiempo t depende de los períodos comprendidos entre $t - 1$ a $t - 4$. Sin embargo, la longitud de la estacionalidad no se logra establecer fácilmente

bajo esta gráfica, por lo que se realiza una diferenciación no estacional de orden 1 que se expone en la Figura 12.

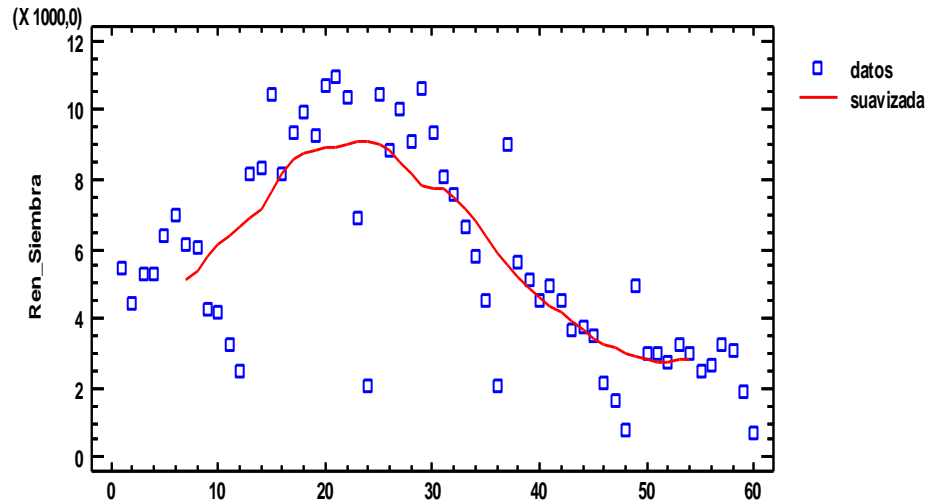
Figura 12. Autocorrelación con diferenciación no estacional – Renovación Siembra



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12 se muestran tres periodos con correlación significativa siendo estos: periodo 1 (-0,341), periodo 11 (-0,3223), y periodo 12 (0,691). Siendo el más significativo y evidente en la gráfica, la correspondiente a 12 periodo, estableciéndose esta como la longitud de la estacionalidad para la presente serie. Con el fin de analizar la tendencia de las hectáreas renovadas por siembra se suaviza la serie mediante promedio móvil con una longitud de 12 (Figura 13), logrando establecer una tendencia decreciente para estos datos.

Figura 13. Serie renovación siembra suavizada

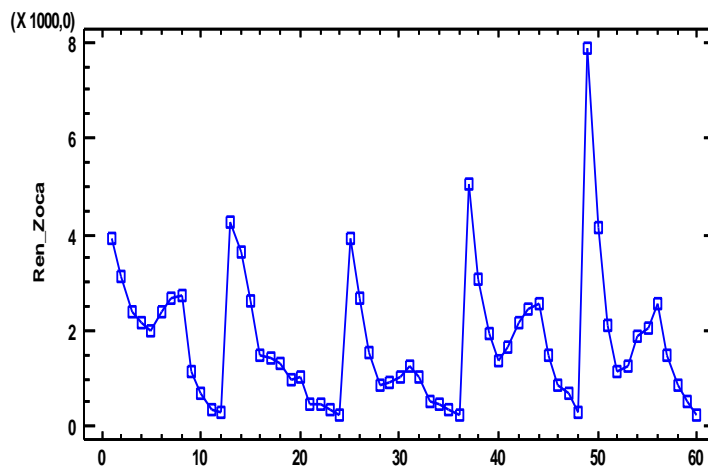


Fuente: Elaboración propia.

2.4.3. Renovación Zoca

La renovación por zoca representa una manera de obtención de tallos de café, y a su vez representa para la planta una técnica para aumentar su productividad. Como serie de tiempo objeto de análisis, se toma la registrada por el Sistema de Información Cafetera (SICA) de la FNC (2015). El periodo observado se encuentra comprendido desde enero del 2010 hasta diciembre de 2014, con un total de 60 observaciones, correspondiendo los datos al número total de hectáreas renovadas por zoca.

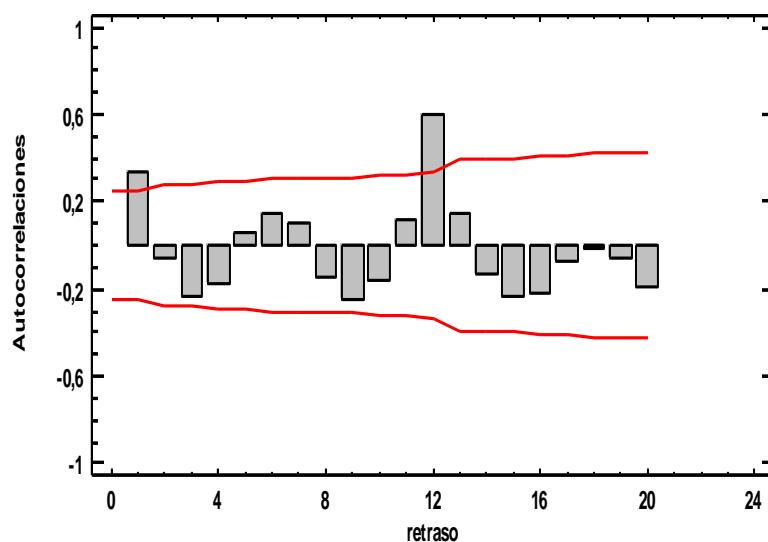
Figura 14. Serie de tiempo – Renovación zoca



Fuente: Elaboración propia

Los datos expuestos en la Figura 14 muestran de manera clara que en la serie existe estacionalidad de longitud 12, afirmación que se respalda con las autocorrelaciones estimadas para los datos (Figura 15), donde existen dos correlaciones significativas: en el periodo 1 (con un valor de 0,3297), y en el periodo 12 (con un valor de 0,6024).

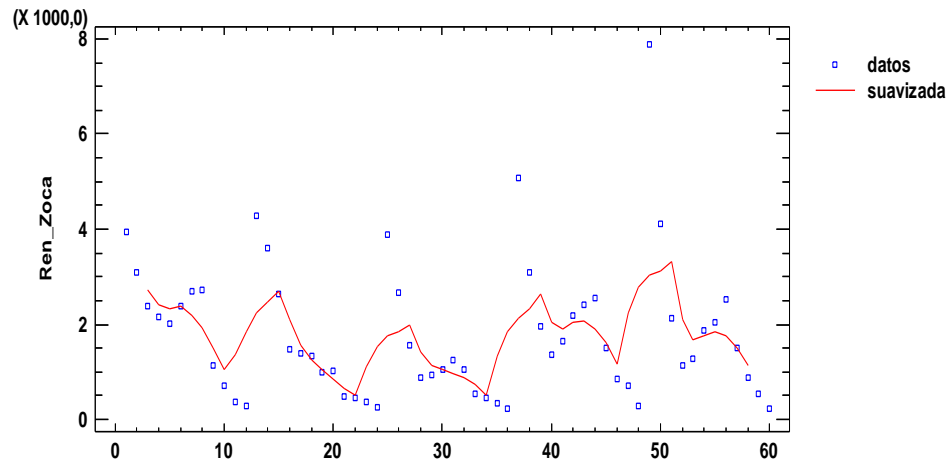
Figura 15. Autocorrelaciones estimadas - Renovación zoca



Fuente: Elaboración propia

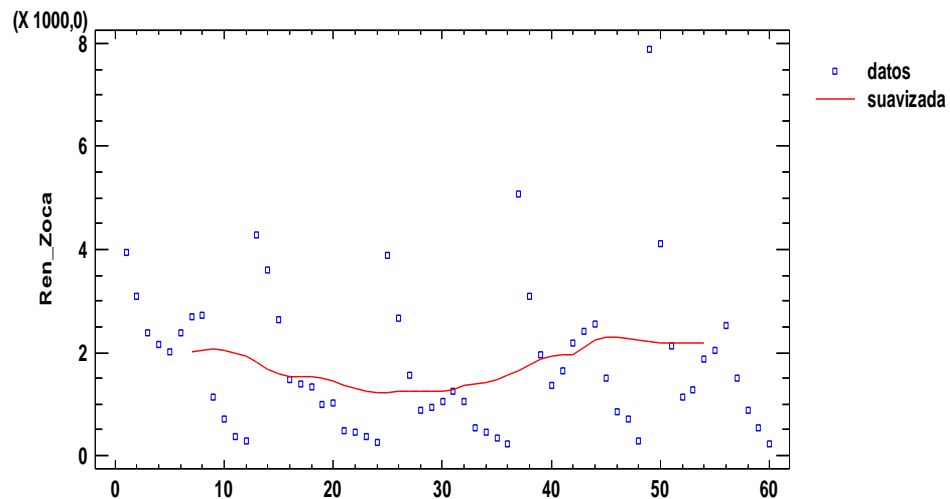
Con el fin de analizar la tendencia de las hectáreas de café renovadas por zoca es suavizada la serie con promedio móvil, siendo en la Figura 16 aún evidente la estacionalidad de los datos, por lo que es suavizada nuevamente con una longitud en promedio móvil de 12 (Figura 17), eliminándose la estacionalidad de la gráfica y estableciendo que la tendencia es constante en los últimos periodos.

Figura 16. Suavización promedio móvil 5 – Renovación zoca



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Suavización promedio móvil 12 – Renovación zoca



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los análisis presentados en series de tiempo del residuo y subproductos de café tomados como materia prima para la generación de etanol, se concluye que presentan una producción variante en el tiempo caracterizada por estacionalidades ligadas a cosechas presentadas en el año y aplicación de buenas prácticas y renovaciones a cultivos. Por tanto, se determina como factor que influye de manera directa en la ubicación de instalaciones; por lo que se considera como aspecto relevante por tener en cuenta en el diseño del modelo matemático a proponer y la toma de decisiones a partir de éste.

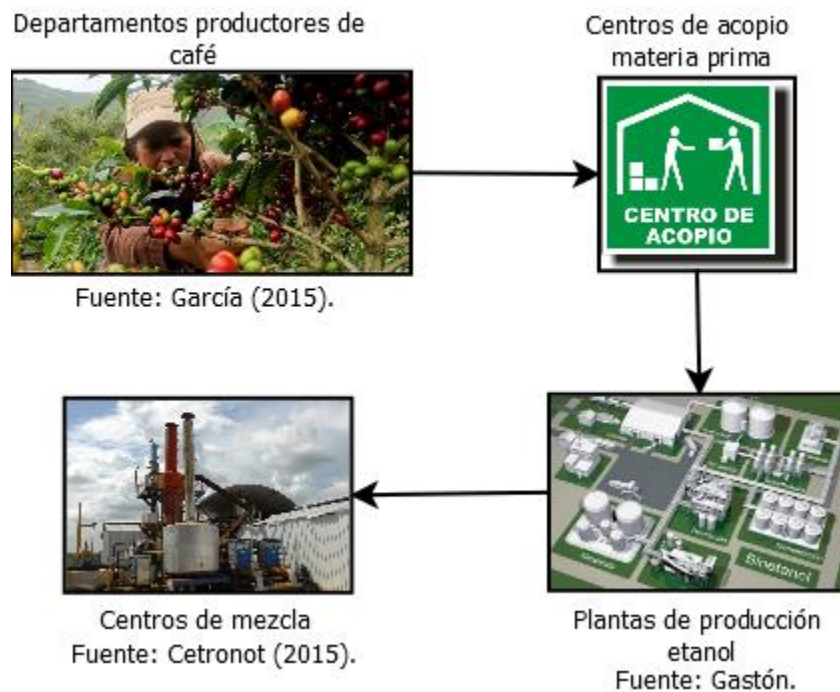
3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA PARA EL DISEÑO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOCOMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ

Con los aspectos relacionados en el capítulo anterior, en el desarrollo del presente numeral se establecen las relaciones matemáticas para el de problema de OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA PARA EL DISEÑO DE UNA CADENA DE SUMINISTRO DE BIOCOMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ. Inicialmente se exponen los datos involucrados en el modelamiento matemático. Luego se presenta el modelo de optimización matemática definido por cuatro componentes: uno en el que se expone el conjunto de datos iniciales o insumos para el modelo, denominados “parámetros”, en el segundo se encuentran las variables, seguido por la definición de la función objetivo del modelo, y, finalmente, las restricciones bajo las cuales se verán limitadas las decisiones que el modelo determine para el problema planteado. De esta manera se da por establecido un modelo de optimización matemática que permite el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café.

3.1. Consideraciones previas

En el desarrollo del presente trabajo de investigación se propone el diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café (tallos, mucílago, y pulpa) bajo un esquema como el expuesto en la Figura 18, donde se muestran los eslabones que la conformarán. Los eslabones propuestos para la cadena de suministro inicial son cuatro: departamentos productores de café, centros de acopio de materia prima, plantas de producción, y centros de mezcla. Dos (2) de éstos eslabones ya tienen ubicación establecida, los departamentos productores de café, y centros de mezcla, siendo objeto de estudio y fin del modelo a proponer, establecer la ubicación de los centros de acopio y plantas de producción, al igual que determinar los flujos que se moverían entre ellos una vez definida su ubicación.

Figura 18. Eslabones de la cadena de suministro propuesta



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Modelo de optimización

Con base en las consideraciones consignadas en el numeral anterior se procede a plantear el modelo matemático, subdividiendo este en sus componentes: parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones. Para efectos de la presentación del modelo se enuncian en la Tabla 6, los subíndices que serán utilizados para la caracterización de los diferentes componentes del modelo.

Tabla 6. Subíndices utilizados en el modelo

Conjunto	Descripción
$j \in J$	Conjunto de departamentos proveedores de biomasa pulpa
$d \in D$	Conjunto de departamentos proveedores de biomasa mucílago
$f \in F$	Conjunto de departamentos proveedores de biomasa tallos
$u \in U$	Conjunto de alternativas de ubicación de centros de acopio de mucílago
$l \in L$	Conjunto de alternativas de ubicación de centros de acopio de pulpa
$z \in Z$	Conjunto de alternativas de ubicación de centros de acopio de zoca

Conjunto	Descripción
$g \in G$	Conjunto de centros de acopio de mucílago
$e \in E$	Conjunto de centros de acopio de zoca
$o \in O$	Conjunto de centros de acopio de pulpa
$p \in P$	Conjunto de alternativas de ubicación de plantas de producción de pulpa
$n \in N$	Conjunto de alternativas de ubicación de plantas de producción de mucílago
$c \in C$	Conjunto de alternativas de ubicación de plantas de producción de zoca
$i \in I$	Conjunto de plantas de procesamiento de mucílago
$k \in K$	Conjunto de plantas de procesamiento de zoca
$a \in A$	Conjunto de plantas de procesamiento de pulpa
$m \in M$	Conjunto de centros de mezcla disponibles
$w \in W$	Etanol

Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Parámetros

A continuación se exponen los parámetros bajo los cuales funcionará el modelo, siendo estos entendidos como los datos inicialmente conocidos para el desarrollo del modelo.

Tabla 7. Parámetros del modelo

Símbolo	Descripción	Unidad
$CBDG_{dgu}$	Costo de transporte del mucílago desde el departamento d al centro de acopio g ubicado en la región u .	\$/ton
$CBJO_{bjo}$	Costo de transporte de la pulpa desde el departamento j hasta el centro de acopio o ubicado en la región l	\$/ton
$CBFE_{fez}$	Costo de transporte de la zoca desde el departamento f hasta el centro de acopio e ubicado en la región z	\$/ton

Símbolo	Descripción	Unidad
$CBGI_{guin}$	Costo de transporte del mucílago desde el centro de acopio g ubicado en la región u a la planta de producción i ubicada en la región n	\$/ton
$CBOA_{olap}$	Costo de transporte de la pulpa desde el centro de acopio o ubicado en la región l a la planta de producción a ubicada en la región p	\$/ton
$CBEK_{ezkc}$	Costo de transporte de la zoca desde el centro de acopio e ubicado en la región z a la planta de producción k ubicada en la región c .	\$/ton
$CEIM_{inm}$	Costo de transporte del etanol desde la planta de producción i ubicada en la región n a centro de mezcla m	\$/Lt
$CEAM_{apm}$	Costo de transporte del etanol desde la planta de producción a ubicada en la región p a centro de mezcla m	\$/Lt
$CEKM_{kcm}$	Costo de transporte del etanol desde la planta de producción k ubicada en la región c a centro de mezcla m	\$/Lt
TPP_w	Tasa de producción de etanol a partir de la pulpa	Lt/ton
TPM_w	Tasa de producción de etanol a partir del mucílago	Lt/ton
TPZ_w	Tasa de producción de etanol a partir de los tallos	Lt/ton
CBP_j	Costo de la materia prima pulpa en la región j	\$/ton
CBM_d	Costo de la materia prima mucílago en la región d	\$/ton
CBZ_f	Costo de la materia prima tallos en la región f	\$/ton
QP_j	Cantidad de pulpa disponible en el departamento j	Ton/mes
QM_d	Cantidad de mucílago disponible en el departamento d	Ton/mes
QZ_f	Cantidad de tallos disponible en el departamento f	Ton/mes
$CFVO_{ol}$	Costos fijos y variables de apertura de centro de acopio o ubicado en la región l	\$
$CFVE_{ez}$	Costos fijos y variables de apertura de centro de acopio e ubicado en la región z	\$
$CFVG_{gu}$	Costos fijos y variables de apertura de centro de acopio g ubicado en la región u	\$

Símbolo	Descripción	Unidad
$CFVA_{ap}$	Costos fijos y variables de apertura de planta de producción a ubicada en la región p	\$
$CFVK_{kc}$	Costos fijos y variables de apertura de planta de producción k ubicada en la región c	\$
$CFVI_{in}$	Costos fijos y variables de apertura de planta de producción i ubicada en la región n	\$
DM_m	Demanda de etanol por el centro de mezcla m	Lt/mes
QCA_{ap}	Capacidad de conversión de la planta de producción a en la región p	Lt/mes
QCK_{kc}	Capacidad de conversión de la planta de producción k	Lt/mes
QCI_{in}	Capacidad de conversión de la planta de producción i	Lt/mes
QAO_{ol}	Capacidad de almacenamiento del centro de acopio o en la ubicación l	Ton/mes
QAE_{ez}	Capacidad de almacenamiento del centro de acopio e en la ubicación z	Ton/mes
QAG_{gu}	Capacidad de almacenamiento del centro de acopio g en la ubicación u	Ton/mes
$CDNS_m$	Costo de demanda no satisfecha en el centro de mezcla m	\$/Lt

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Variables De Decisión

Para el desarrollo del presente modelo se han seleccionado las variables de decisión expuestas en la Tabla 8, donde en el campo de descripción se encuentra la decisión a la cual representan y en unidad el término en el que serán interpretados sus valores.

Tabla 8. Variables seleccionadas

Símbolo	Descripción	Unidad
YI_{in}	1 si la planta de producción i es establecida en la ubicación n ; de lo contrario 0	[0,1]
YK_{kc}	1 si la planta de producción k es establecida en la ubicación c ; de lo contrario 0	[0,1]
YA_{ap}	1 si la planta de producción a es establecida en la ubicación p ; de lo contrario 0	[0,1]
YG_{gu}	1 si el centro de acopio g es establecido en la ubicación u ; de lo contrario 0	[0,1]
YE_{ez}	1 si el centro de acopio e es establecido en la ubicación z ; de lo contrario 0	[0,1]
YO_{ol}	1 si el centro de acopio o es establecido en la ubicación l ; de lo contrario 0	[0,1]
XJ_{jol}	Cantidad de pulpa transportada desde el departamento j hasta el centro de acopio o ubicado en la región l	Ton.
XF_{fez}	Cantidad de tallos transportada desde el departamento f hasta el centro de acopio e ubicado en la región z	Ton.
XD_{dgu}	Cantidad de mucílago transportada desde el departamento d hasta el centro de acopio g ubicado en la región u	Ton.
XBO_{olap}	Cantidad de pulpa enviada desde el centro de acopio o ubicado en la región l enviada a la planta de producción a ubicada en la región p	Ton.
XBG_{guin}	Cantidad de mucílago enviado desde el centro de acopio g ubicado en la región u a la planta de producción i ubicada en la región n	Ton.
XBE_{ezkc}	Cantidad de tallos enviada desde el centro de acopio e ubicado en la región z a la planta de producción k en la región c	Ton.
XEA_{apm}	Cantidad de etanol por enviar desde la planta de producción a ubicada en la región p al centro de mezcla m	Lt
XEI_{inm}	Cantidad de etanol por enviar desde la planta de producción i ubicada en la región n al centro de mezcla m	Lt

Símbolo	Descripción	Unidad
XEK_{kcm}	Cantidad de etanol por enviar desde la planta de producción k ubicada en la región c al centro de mezcla m	Lt
XBM_{inw}	Total de etanol generado a partir de mucílago por la planta i ubicada en la región n	Lt
XBP_{apw}	Total de etanol generado a partir de pulpa por la planta a ubicada en la región p	Lt
XBZ_{kcw}	Total de etanol generado a partir de los tallos por la planta k ubicada en la región c	Lt
$XVIRT_m$	Variable de holgura para satisfacer restricción de demanda del centro de mezcla m	Lt

3.2.2.1. Función Objetivo

La función objetivo del modelo propuesto se encuentra determinada por la minimización de costos por concepto en primera medida por transporte entre los diferentes eslabones, así del primer al tercer componente de multiplicación obedecen a dicho costo entre departamentos proveedores y centros de acopio, los siguientes tres a transporte entre centros de acopio y plantas de producción, y de séptimo a noveno componente al traslado del etanol hasta los respectivos centros de mezcla. Los siguientes costos involucrados corresponden a fijos y variables por apertura tanto de centros de acopio (componente 10 al 12), y plantas de producción (componente 13 a 15), finalmente es considerada una penalización por demanda no satisfecha.

$$\begin{aligned}
Min ZZ = & \sum_{d \in D} \sum_{g \in G} \sum_{u \in U} CBDG_{dgu} * Xd_{dgu} + \sum_{j \in J} \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} CBJO_{jol} * XJ_{jol} \\
& + \sum_{f \in F} \sum_{e \in E} \sum_{z \in Z} CBF E_{fez} * XF_{fez} + \sum_{g \in G} \sum_{u \in U} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} CBGI_{guin} * XBG_{guin} \\
& + \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} \sum_{a \in A} \sum_{p \in P} CBOA_{olap} * XBO_{olap} \\
& + \sum_{e \in E} \sum_{z \in Z} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} CBEK_{ezkc} * XBE_{ezkc} + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} CEIM_{inm} * XEI_{inm} \\
& + \sum_{a \in A} \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} CEAM_{apm} * XEA_{apm} + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} CEKM_{kcm} * XEK_{kcm} \quad (6) \\
& + \sum_{o \in O} \sum_{l \in L} CFVO_{ol} * Yo_{ol} + \sum_{e \in E} \sum_{z \in Z} CFVE_{ez} * Ye_{ez} + \sum_{g \in G} \sum_{u \in U} CFVG_{gu} * YG_{gu} \\
& + \sum_{a \in A} \sum_{p \in P} CFVA_{ap} * Ya_{ap} + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} CFVK_{kc} * Yk_{kc} + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} CFVI_{in} * YI_{in} \\
& + \sum_{i \in I} CDNS_m * XVIRT_m
\end{aligned}$$

3.2.3. Restricciones

Las restricciones del modelo propuesto para efectos de ubicación de eslabones son presentadas por las ecuaciones de la 7 a la 63. El primer conjunto de restricciones de la número 7 a la 16, aseguran la no negatividad de las variables relacionadas.

$$XJ_{jol} \geq 0 ; \forall j \in J; \forall o \in O; \forall l \in L \quad (7)$$

$$XF_{fez} \geq 0 ; \forall f \in F; \forall e \in E; \forall z \in Z \quad (8)$$

$$XD_{dgu} \geq 0 ; \forall d \in D; \forall g \in G; \forall u \in U \quad (9)$$

$$XBO_{olap} \geq 0 ; \forall o \in O; \forall l \in L; \forall a \in A; \forall p \in P \quad (10)$$

$$XBG_{guin} \geq 0 ; \forall g \in G; \forall u \in U; \forall i \in I; \forall n \in N \quad (11)$$

$$XBE_{ezkc} \geq 0 ; \forall e \in E; \forall z \in Z; \forall k \in K; \forall c \in C \quad (12)$$

$$XEA_{apm} \geq 0 ; \forall a \in A; \forall p \in P; \forall m \in M \quad (13)$$

$$XEI_{inm} \geq 0 ; \forall i \in I; \forall n \in N; \forall m \in M \quad (14)$$

$$XEK_{kcm} \geq 0 ; \forall k \in K; \forall c \in C; \forall m \in M \quad (15)$$

$$XVIRT_m \geq 0 ; \forall m \in M \quad (16)$$

Las restricciones 17, 18 y 19, garantizan que la biomasa disponible sea recolectada

Pulpa

$$\sum_{o \in \mathbf{O}} \sum_{l \in \mathbf{L}} XJ_{jol} = QP_j \quad \forall j \in \mathbf{J} \quad (17)$$

Tallos

$$\sum_{e \in \mathbf{E}} \sum_{z \in \mathbf{Z}} XF_{fez} = QZ_f \quad \forall f \in \mathbf{F} \quad (18)$$

Mucílago

$$\sum_{g \in \mathbf{G}} \sum_{u \in \mathbf{U}} XD_{dgu} = QM_d \quad \forall d \in \mathbf{D} \quad (19)$$

Las restricciones de capacidades para centros de acopio (20, 21, y 22), aseguran que la biomasa enviada según sea su tipo, no exceda la capacidad de almacenamiento de los centros de acopio para cada una de las materias primas.

Pulpa

$$\sum_{j \in \mathbf{J}} XJ_{jol} \leq QAO_o * YO_{ol} \quad \forall o \in \mathbf{O}; \forall l \in \mathbf{L} \quad (20)$$

Tallos

$$\sum_{f \in \mathbf{F}} XF_{fez} \leq QAE_e * YE_{ez} \quad \forall e \in \mathbf{E}; \forall z \in \mathbf{Z} \quad (21)$$

Mucílago

$$\sum_{d \in \mathbf{D}} XD_{dgu} \leq QAG_g * YG_{gu} \quad \forall g \in \mathbf{G}; \forall u \in \mathbf{U} \quad (22)$$

Al igual que para centros de acopio, son generadas restricciones de capacidad para las plantas de producción que sean destinadas para el procesamiento de las tres materias primas consideradas, las cuales son expuestas por las ecuaciones 23, 24, y 25.

Pulpa

$$\sum_{w \in W} XBP_{apw} \leq QCA_{ap} * YA_{ap} \quad \forall a \in \mathbf{A}; \forall p \in \mathbf{P} \quad (23)$$

Tallos

$$\sum_{w \in W} XBZ_{kcw} \leq QCK_{kc} * YK_{kc} \quad \forall k \in \mathbf{K}; \forall c \in \mathbf{C} \quad (24)$$

Mucílago

$$\sum_{w \in W} XBM_{inw} \leq QCI_{in} * YI_{in} \quad \forall i \in \mathbf{I}; \forall n \in \mathbf{N} \quad (25)$$

Las ecuaciones 26, 27 y 28, determinan que cada uno de los centros de acopio para las materias primas consideradas son únicos, por lo tanto cada uno de estos podrá establecerse en sólo una de las alternativas de ubicación dadas.

Pulpa

$$\sum_{l \in \mathbf{L}} YO_{ol} = 1 \quad \forall o \in \mathbf{O} \quad (26)$$

Tallos

$$\sum_{z \in \mathbf{Z}} YE_{ez} = 1 \quad \forall e \in \mathbf{E} \quad (27)$$

Mucílago

$$\sum_{u \in \mathbf{U}} YG_{gu} = 1 \quad \forall g \in \mathbf{G} \quad (28)$$

Con el fin de tener una mayor cobertura se establece que del grupo de posibles centros de acopio de cada una de las materias primas, sean cada uno de estos abiertos en alternativas de ubicación distinta, es decir no puede haber dos centros de acopio para una misma materia prima en una misma ubicación. Lo anterior se describe por medio de las ecuaciones 29, 30, y 31.

Pulpa

$$\sum_{o \in \mathbf{O}} YO_{ol} \leq 1 \quad \forall l \in \mathbf{L} \quad (29)$$

Tallos

$$\sum_{e \in \mathbf{E}} Y E_{ez} \leq 1 \quad \forall z \in \mathbf{Z} \quad (30)$$

Mucílago

$$\sum_{g \in \mathbf{G}} Y G_{gu} \leq 1 \quad \forall u \in \mathbf{U} \quad (31)$$

Las ecuaciones 33, 34 y 35, funcionan como trasbordo, determinando que la cantidad enviada de materia prima desde cada centro de acopio hacia las plantas de producción debe ser igual a la cantidad recibida por cada centro de acopio desde los diferentes departamentos proveedores de biomasa.

Pulpa

$$\sum_{a \in \mathbf{A}} \sum_{p \in \mathbf{P}} X B O_{olap} = \sum_{j \in \mathbf{J}} X J_{jol} \quad \forall o \in \mathbf{O}; \forall l \in \mathbf{L} \quad (32)$$

Tallos

$$\sum_{k \in \mathbf{K}} \sum_{c \in \mathbf{C}} X B E_{ezkc} = \sum_{f \in \mathbf{F}} X F_{fez} \quad \forall e \in \mathbf{E}; \forall z \in \mathbf{Z} \quad (33)$$

Mucílago

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} \sum_{n \in \mathbf{N}} X B G_{guin} = \sum_{d \in \mathbf{D}} X D_{dgu} \quad \forall g \in \mathbf{G}; \forall u \in \mathbf{U} \quad (34)$$

Cada uno de los componentes del conjunto de plantas de producción de las materias primas consideradas, puede ser ubicado en una sola de las alternativas de ubicación. Es decir una planta de producción específica no puede ser asignada en más de una ubicación, así se expresa mediante las ecuaciones 36, 37, y 38.

Pulpa

$$\sum_{p \in \mathbf{P}} Y A_{ap} = 1 \quad \forall a \in \mathbf{A} \quad (35)$$

Tallos

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} YK_{kc} = 1 \quad \forall k \in \mathbf{K} \quad (36)$$

Mucílago

$$\sum_{n \in \mathbf{N}} YI_{in} = 1 \quad \forall i \in \mathbf{I} \quad (37)$$

En las restricciones 39, 40, y 41, se establece que en cada una de las alternativas de ubicación para plantas de producción puede ser establecida máximo una, para determinada materia prima.

Pulpa

$$\sum_{a \in \mathbf{A}} YA_{ap} \leq 1 \quad \forall p \in \mathbf{P} \quad (38)$$

Tallos

$$\sum_{k \in \mathbf{K}} YK_{kc} \leq 1 \quad \forall c \in \mathbf{C} \quad (39)$$

Mucílago

$$\sum_{i \in \mathbf{I}} YI_{in} \leq 1 \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (40)$$

La materia prima que ingresa a las plantas de producción multiplicada por la tasa de conversión es igual al total de etanol generado, dicha transformación es representada por las ecuaciones 42, 43, y 44.

Pulpa

$$XBP_{apw} = \left[\sum_{o \in \mathbf{O}} \sum_{l \in \mathbf{L}} XBO_{olap} \right] * TPP_w \quad \forall a \in \mathbf{A}; \forall p \in \mathbf{P}; \forall w \in \mathbf{W} \quad (41)$$

Tallos

$$XBZ_{kcw} = \left[\sum_{e \in \mathbf{E}} \sum_{z \in \mathbf{Z}} XBE_{ezkc} \right] * TPZ_w \quad \forall k \in \mathbf{K}; \forall c \in \mathbf{C}; \forall w \in \mathbf{W} \quad (42)$$

Mucílago

$$XBM_{inw} = \left[\sum_{g \in G} \sum_{u \in U} XBG_{guin} \right] * TPM_w \quad \forall i \in I; \forall n \in N; \forall w \in W \quad (43)$$

Las ecuaciones 45, 46, y 47 determinan que el flujo generado desde cada planta de producción hacia los centros de mezcla corresponde a la cantidad de etanol generado por conversión de materia prima.

Pulpa

$$\sum_{m \in M} XAE_{apm} = XBP_{apw} \quad \forall a \in A; \forall p \in P; \forall w \in W \quad (44)$$

Mucílago

$$\sum_{m \in M} XEI_{inm} = XBM_{inw} \quad \forall i \in I; \forall n \in N; \forall w \in W \quad (45)$$

Tallos

$$\sum_{m \in M} XEK_{kcm} = XBZ_{kcw} \quad \forall k \in K; \forall c \in C; \forall w \in W \quad (46)$$

La restricción 48, indica que lo enviado desde las plantas de producción hacia los centros de mezcla responde a una demanda que se genera en cada uno de estos. Se agrega en esta restricción una variable virtual con el fin de que esta tome el valor del sobrante o faltante de etanol respecto a la demanda.

$$\sum_{a \in A} \sum_{p \in P} XEA_{apm} + \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} XEI_{inm} + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} XEK_{kcm} + XVIRT_m = DM_m \quad \forall m \in M \quad (47)$$

Finalmente, el conjunto de ecuaciones de la 49 a 63 son establecidas con la finalidad de evitar la no linealidad en el modelo, tomando como referencia las variables que representan los flujos generados entre diferentes eslabones, haciendo uso del método Big M .

$$XJ_{jol} \leq M * YO_{ol} \quad \forall j \in \mathbf{J}; \forall o \in \mathbf{O}; \forall l \in \mathbf{L} \quad (48)$$

$$XBO_{olap} \leq M * YO_{ol} \quad \forall o \in \mathbf{O}; \forall l \in \mathbf{L}; \forall a \in \mathbf{A}; \forall p \in \mathbf{P} \quad (49)$$

$$XBO_{olap} \leq M * YA_{ap} \quad \forall o \in \mathbf{O}; \forall l \in \mathbf{L}; \forall a \in \mathbf{A}; \forall p \in \mathbf{P} \quad (50)$$

$$XBP_{apw} \leq M * YA_{ap} \quad \forall a \in \mathbf{A}; \forall p \in \mathbf{P}; \forall w \in \mathbf{W} \quad (51)$$

$$XEA_{apm} \leq M * YA_{ap} \quad \forall a \in \mathbf{A}; \forall p \in \mathbf{P}; \forall m \in \mathbf{M} \quad (52)$$

$$XD_{dgu} \leq M * YG_{gu} \quad \forall d \in \mathbf{D}; \forall g \in \mathbf{G}; \forall u \in \mathbf{U} \quad (53)$$

$$XBG_{guin} \leq M * YG_{gu} \quad \forall g \in \mathbf{G}; \forall u \in \mathbf{U}; \forall i \in \mathbf{I}; \forall n \in \mathbf{N} \quad (54)$$

$$XBG_{guin} \leq M * YI_{in} \quad \forall g \in \mathbf{G}; \forall u \in \mathbf{U}; \forall i \in \mathbf{I}; \forall n \in \mathbf{N} \quad (55)$$

$$XBM_{inz} \leq M * YI_{in} \quad \forall i \in \mathbf{I}; \forall n \in \mathbf{N}; \forall z \in \mathbf{Z} \quad (56)$$

$$XEI_{inm} \leq M * YI_{in} \quad \forall i \in \mathbf{I}; \forall n \in \mathbf{N}; \forall m \in \mathbf{M} \quad (57)$$

$$XF_{fez} \leq M * YE_{ez} \quad \forall f \in \mathbf{F}; \forall e \in \mathbf{E}; \forall z \in \mathbf{Z} \quad (58)$$

$$XBE_{ezkc} \leq M * YE_{ez} \quad \forall e \in \mathbf{E}; \forall z \in \mathbf{Z}; \forall k \in \mathbf{K}; \forall c \in \mathbf{C} \quad (59)$$

$$XBE_{ezkc} \leq M * YK_{kc} \quad \forall e \in \mathbf{E}; \forall z \in \mathbf{Z}; \forall k \in \mathbf{K}; \forall c \in \mathbf{C} \quad (60)$$

$$XEK_{kcm} \leq M * YK_{kc} \quad \forall k \in \mathbf{K}; \forall c \in \mathbf{C}; \forall m \in \mathbf{M} \quad (61)$$

$$XBZ_{kcw} \leq M * YK_{kc} \quad \forall k \in \mathbf{K}; \forall c \in \mathbf{C}; \forall w \in \mathbf{W} \quad (62)$$

Bajo las restricciones expuestas, es determinada la ubicación para centros de acopio de las tres materias primas consideradas, al igual que sus respectivas plantas de producción. Una vez establecidas las ubicaciones de los eslabones que componen la cadena de suministro, se procede a determinar los flujos que se generan entre estos, para lo cual, se toma como base el modelo ya expuesto, siendo eliminadas las variables binarias de apertura, y los subíndices de alternativas de ubicación, y por tanto los componentes de la función objetivo y restricciones que hagan referencia a estos aspectos.

4. VALIDACIÓN DE DESEMPEÑO

Para la validación del modelo propuesto, se ha tomado como país referencia Colombia, mayor productor de café suave arábico lavado del mundo, y cuya producción creció 83% en los últimos cuatro años (FNC, 2016). En el presente capítulo se hará una descripción del criterio de selección de los datos tomados como referencia para efectos de validación del modelo; siendo válido aclarar que la disponibilidad y acceso a estos es un limitante para el desarrollo de la presente investigación, por lo cual, para la validación actual se asumen algunos de los datos incluidos, pretendiendo que se asemejen en lo posible a la realidad.

4.1. Descripción Estudio De Caso

4.1.1. Selección de componentes de subíndices

Siendo los eslabones propuestos para la cadena de suministro: departamentos productores de café, centros de acopio de materia prima, plantas de producción, y centros de mezcla. En el caso del primer y último eslabón, ya se encuentran establecidas las ubicaciones, ya que corresponden a la situación actual del país. Por otro lado, para los centros de acopio de materia prima y las plantas de producción, un conjunto de posibles ubicaciones deben ser seleccionadas de forma tentativa para que el algoritmo de solución determine la combinación óptima para su instalación.

En cuanto a la producción de café, no se encuentra disponible una base de datos oficial de la producción discriminada por departamento, y sólo se dispone de una cifra de producción a nivel nacional, que a 2015 representó un valor de 14.2 millones de sacos de 60 kg (FNC, 2016). Sin embargo, sí se cuenta con cifras oficiales del área cultivada por cada departamento. Con el fin de generar los insumos al modelo, se toman los departamentos que representan a nivel nacional un porcentaje igual o

mayor al 3% del área cultivada de café (de acuerdo con cifras presentadas por la FNC con corte a septiembre de 2015), y se considera que la producción de café es directamente proporcional al área de cultivo. De esta forma, los departamentos seleccionados representan la recolección de residuos y subproductos correspondiente al 95% del área cultivada en café de Colombia. En la Tabla 9 se exponen los departamentos seleccionados y su respectivo porcentaje de área cultivada.

Tabla 9. Departamentos productores de café seleccionados

Departamento	Área Cultivada (%)
Antioquia	14
Caldas	8
Cauca	10
Cesar	3
Cundinamarca	4
Huila	16
Nariño	4
N. Santander	3
Quindío	3
Risaralda	5
Santander	5
Tolima	13
Valle	7

Fuente: Elaboración propia.

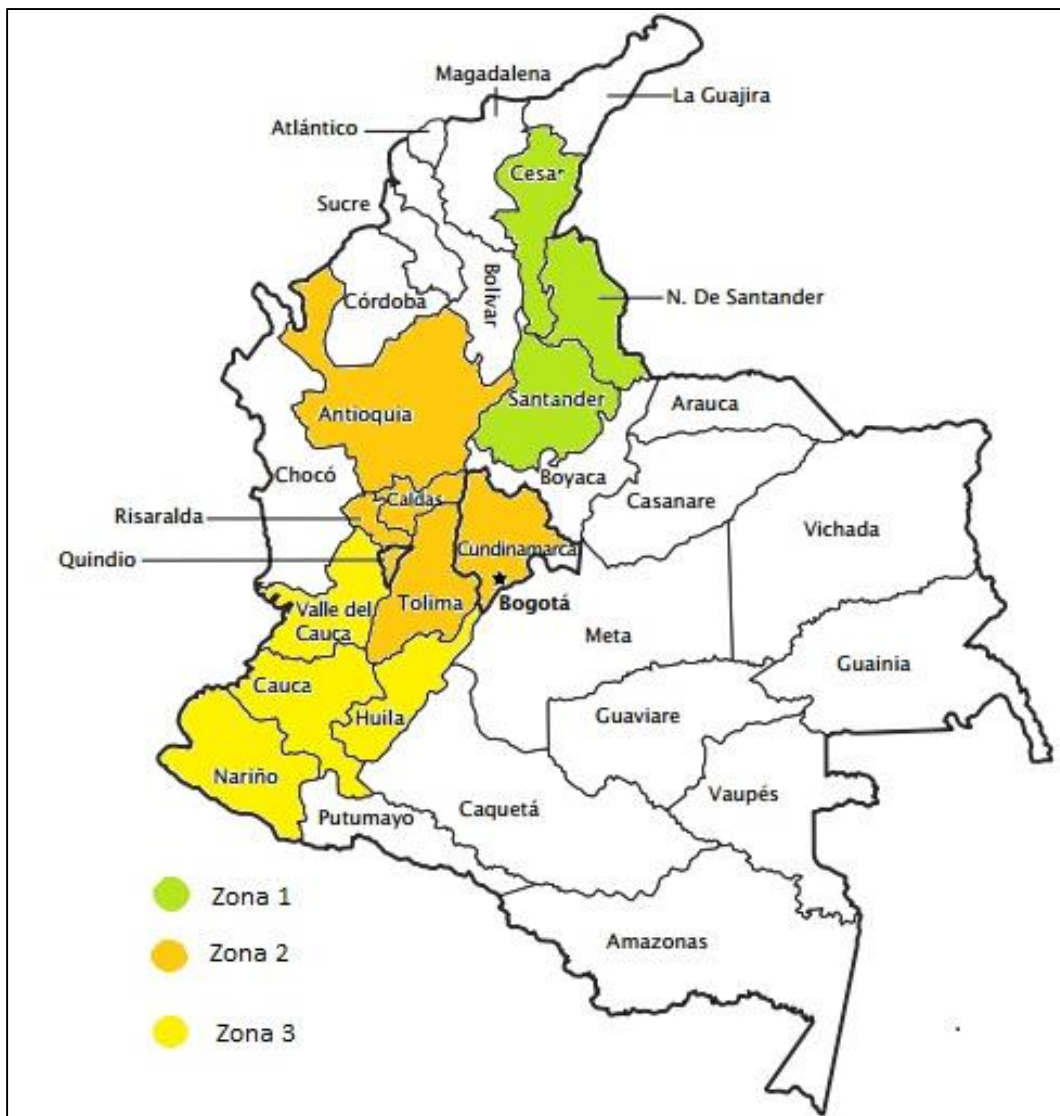
Con el fin de reducir la complejidad computacional del modelo matemático, los departamentos expuestos en la Tabla 9 se agrupan en 3 conglomerados (zonas) con el fin de definir un menor número de alternativas de ubicación para centros de acopio y plantas de producción. Mediante la implementación del algoritmo *k-means* (MacQueen, 1967), alimentado con las coordenadas de las ciudades de los departamentos objeto de estudio, se generan las siguientes zonas:

- **Zona 1:** Cesar, Norte de Santander, Santander.

- **Zona 2:** Antioquia, Caldas, Cundinamarca, Quindío, Risaralda, Tolima.
- **Zona 3:** Cauca, Huila, Nariño, Valle.

Con el fin de hacer gráfico el agrupamiento propuesto por *k-means*, se presenta la Figura 16.

Figura 19. Mapa de zonas objeto de estudio



Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo, de acuerdo a los datos de entrada, y con un criterio geográfico, determina además el centroide o punto medio para cada una de las zonas. Dichos puntos son tomados como ubicaciones alternativas de centros de acopio, por criterio geográfico y términos de distancia.

Así, para la zona 1 se determina que el centroide es Norte de Santander, para la zona 2 el departamento del Tolima, y Cauca como punto medio de la zona 3. Tras analizar que en la zona 1 se recolectaría la materia prima producida por el 11% de miles de hectáreas cultivadas en el país, mientras que de las zonas 2 y 3 recolectarían las correspondientes al 47% y 37%, respectivamente, se propone una alternativa adicional a los puntos medios para cada una de las dos últimas zonas nombradas, siendo el criterio de selección el volumen de área cultivada. De esta manera para la zona 2 punto de referencia seleccionado por producción es Antioquia, y Huila para la zona 3.

De esta manera, los cinco departamentos tomados como puntos de referencia (Norte de Santander, Tolima, Antioquia, Cauca, Huila), son los que en el modelo matemático sirven como alternativas para la ubicación de centros de acopio y planta de producción para las diferentes materias primas.

Adicionalmente, y teniendo en cuenta lo expuesto en el numeral 2.1., donde se nombra la propuesta realizada por Sarache & Matallana (2013) respecto a los factores incidentes en la ubicación de instalaciones, se analiza el estado de dichos factores basados en la información disponible en el documento “Índice de competitividad regional cafetero” realizado por la FNC (2009). El factor incidente denominado “capacidad agrícola” se verá representado por el índice “recursos naturales”, el cual hace alusión a la existencia de tierras y condiciones naturales para los cultivos. La “calidad de la infraestructura de transporte” se le encuentra el equivalente en “infraestructura/localización” que se representa por las posibles ventajas de los departamentos respecto a su localización para que el café sea transportado a los puntos de compra y puertos. Por su parte los factores “actitud de

la comunidad hacia un proyecto e impacto social de la región” y “la calidad y la fiabilidad de los servicios públicos” se representan por “mercado laboral” y “condiciones de vida” los cuales ilustran la suficiencia de mano de obra y posibilidades de los caficultores de realizar sus labores de manera productiva y en un ambiente saludable, indicando estos el desarrollo generado por la actividad cafetera en las regiones. Finalmente, “la seguridad y la criminalidad” se ven reflejadas en el índice de competitividad de las regiones cafeteras por “condiciones de seguridad” que representa el nivel de violencia en las regiones.

De acuerdo con lo expuesto se analizan estos factores para los cinco departamentos propuestos como alternativas de ubicación para centros de acopio y plantas de producción. En el índice general, el departamento que se perfila con un mejor índice de competitividad es Antioquia con un puntaje de 79 (en escala de 0 a 100), seguido por Cauca con 54 puntos, y Huila con 48. Los departamentos restantes presentan calificaciones relativamente bajas (Tolima con 23, y 10 para Norte de Santander). En la Tabla 10, se expone la calificación obtenida por cada uno de los departamentos en los factores incidentes en la ubicación de instalaciones evidenciándose que en “recurso naturales”, “mercado laboral” y “condiciones de vida” las cinco alternativas de ubicación presentan un buen desempeño; sin embargo en “infraestructura” dos alternativas presentan falencias con ponderadores bajos (N. Santander y Huila) y en “localización” Tolima no presenta un buen desempeño.

Tabla 10. Indicadores de alternativas de ubicación

	Recursos naturales	Infraestructura/localización	Mercado laboral	Condiciones de vida	Condiciones de seguridad
N. de Santander	35	0	41	52	64
Tolima	49	58	39	68	0
Antioquia	49	34	30	68	63
Cauca	57	60	63	58	40
Huila	52	12	47	69	27

Fuente: FNC, 2009.

De acuerdo con el panorama expuesto se evidencia que en general las ubicaciones alternativas propuestas tienen un buen desempeño en los índices seleccionados, a pesar de que tres departamentos presentan falencia en uno de estos (N. Santander y Huila: “infraestructura/localización”, Tolima: “condiciones de seguridad”), en el resto de los indicadores presentan desempeños buenos.

Posterior al proceso realizado en las plantas de producción para la obtención de etanol, este es transportado por medio de poliductos a unas plantas de almacenamiento (centros de mezcla) donde es mezclado el alcohol carburante en un 8%, con gasolina (Federación de biocombustibles, 2016). En cuanto al eslabón referente a “centros de mezcla”, los cuales ya se encuentran establecidos en Colombia conocidos también como “Distribuidores mayoristas”, se toma como primera referencia el “Listado agentes de la cadena de distribución de combustibles” presentado por el Ministerio de minas y energía (2012), de los cuales fueron seleccionados para efectos del presente estudio los dedicados específicamente a la mezcla de etanol, enunciados en la resolución número 4-0717 de 2016, y la número 9-0153 de 2014, del Ministerio de minas y energía, donde se establecen plantas de abastecimiento mayoristas de zonas específicas que se dedican a realizar mezclas denominadas E-8 (8% de alcohol carburante con 92% de gasolina motor).

De acuerdo con lo anterior, se obtiene un listado de 38 centros de mezcla, los cuales se agrupan según al departamento donde se encuentran ubicados, y el porcentaje de participación que tiene cada uno de estos en el total de centros tomados para el estudio, como se expone en la Tabla 11.

Tabla 11. Centros de mezcla por departamentos

DEPARTAMENTO	N° CENTROS DE MEZCLA	PORCENTAJE
Cundinamarca	8	21,1%
Risaralda	2	5,3%
Valle	6	15,8%
Tolima	2	5,3%
Huila	1	2,6%
Caldas	2	5,3%
Caquetá	1	2,6%
Amazonas	1	2,6%
Putumayo	1	2,6%
Vichada	1	2,6%
Guanía	1	2,6%
Guaviare	1	2,6%
Bolívar	3	7,9%
Atlántico	2	5,3%
Santander	2	5,3%
Antioquia	4	10,5%
Total	38	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia en la Tabla 11, un total de 16 departamentos, sin embargo a cada uno de estos debe ser calculada la distancia desde las posibles ubicaciones de plantas de producción para el establecimiento de parámetros, proceso que no fue posible realizar con la herramienta *Google maps* para los departamentos de Amazonas y Guanía, por lo que para efectos del presente estudio se tomarán como referencia los 14 departamentos restantes. Es adicionado un centro de mezcla ficticio al que se nombra como “sobrante”, con el fin de que en el caso de generarse una cantidad adicional de etanol al demandado a nivel nacional, este sea dirigido como reserva a dicho nodo, y en el caso que este nodo no sea satisfecho, su penalización por demanda no satisfecha es nula.

Los subproductos y residuos referencia para la configuración de la presente cadena de suministro son los tres que han sido expuestos a lo largo del desarrollo del presente proyecto, y caracterizados en el numeral 2.2.: mucílago, pulpa y tallo. De acuerdo a lo expuesto, los subíndices para el caso de estudio quedan definidos como se expone en la Tabla 12.

Tabla 12. Subíndices utilizados en el modelo

Conjunto	Descripción	Elementos
$b \in \mathbf{B}$	Conjunto de biomásas seleccionadas	[tallos, mucílago, pulpa]
$j \in \mathbf{J}$	Conjunto de departamentos proveedoras de biomasa	[Antioquia, Caldas, Cauca, Cesar, Cundinamarca, Huila, Nariño, Norte de Santander, Quindío, Risaralda, Santander, Tolima, Valle]
$u \in \mathbf{U}$	Conjunto de alternativas de ubicación de centros de acopio	[Norte de Santander, Tolima, Antioquia, Cauca, Huila]
$p \in \mathbf{P}$	Conjunto de alternativas de ubicación de plantas de producción	[Norte de Santander, Tolima, Antioquia, Cauca, Huila]
$m \in \mathbf{M}$	Conjunto de centros de mezcla disponibles	[Cundinamarca, Risaralda, Valle, Tolima, Huila, Caldas, Caquetá, Putumayo, Vichada, Guaviare, Bolívar, Atlántico, Santander, Antioquia, Sobrante]

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Determinación de parámetros

Respecto a los parámetros expuestos en el numeral 3.2.1., referentes a costos de transporte entre los diferentes eslabones, su cálculo es basado en la Tabla de relaciones económicas mínimas entre empresa de transporte y propietario del

vehículo vinculado del Ministerio de Transporte, mediante resolución No. 000888 de marzo 13 de 2006, en la cual se expone el valor por tonelada transportada entre ciertos orígenes y destinos, en el caso de que estos puntos no se encuentren especificados en la tabla, en el párrafo cuarto del artículo segundo de la resolución 3175 del 1 de agosto de 2008 determina que el valor a pagar por tonelada se calculará de acuerdo a la ruta de referencia el origen más cercano que se encuentre en dicha tabla.

Teniendo en cuenta que para cada uno de los destinos la tarifa es distinta, siendo que para su cálculo además de la distancia se consideran factores logísticos, y que para los problemas de ubicación de instalaciones al buscar minimizar la función de costos, estos deben ser directamente proporcionales a las distancias entre las nuevas ubicaciones (Zanjirani & Hematfar, 2009), se calcula la tarifa promedio de las expuestas por el Ministerio, y posteriormente el costo de transporte de acuerdo a la distancia entre departamentos, considerados para el estudio de caso, las cuales fueron calculadas con la herramienta *Google maps*, y tomada como referencia la distancia mínima por carretera entre capitales de los departamentos. Con esta cifra y el promedio de distancias entre los departamentos y alternativas de ubicación para los centros de acopio, se determina el valor promedio de transporte de tonelada por kilómetro, siendo este a su vez dividido por la distancia respectiva entre eslabones, dejándolos descritos en unidades de \$/ton. Este valor se designa para los costos de transporte correspondientes a la materia prima de tallos, ya que no requiere de ningún tratamiento especial (parámetros: *CBFE* y *CBEK*); Por otro lado, el mucílago y la pulpa, que deben estar bajo ciertas condiciones térmicas para evitar la fermentación por vía natural, el costo de transporte de estas biomásas se le incorpora un valor adicional por concepto de la refrigeración necesaria.

Para el cálculo del valor adicional por refrigeración son analizadas diferentes tarifas de alquiler de contenedores con refrigeración entre diferentes orígenes y destinos, hallando la tarifa promedio por kilómetro de las facturas tomadas como muestra, y esta a su vez multiplicada por la distancia en kilómetros entre las posibles

ubicaciones para los eslabones considerados en los parámetros *CDBG, CBJO, CBGI* y *CBOA*.

Los costos referentes a transporte del etanol como producto final hacia los diferentes centros de mezcla considerados, son calculados de acuerdo a una tarifa promedio de las dadas por el Ministerio de Minas y Energía, mediante la resolución No. 18-1088, donde son especificadas para el transporte de alcohol carburante entre plantas destiladoras y plantas de abastecimiento mayoristas. El promedio de las tarifas expuestas en una primera medida dividida por la distancia entre los orígenes y destino descritos en la misma resolución, es pasada a términos de litros, ya que desde el Ministerio es dado en términos de galones, y posteriormente es multiplicado por la distancia existente entre las posibles ubicaciones para los eslabones que interaccionan en los parámetros *CEIM, CEAM, CEKM* para el caso del modelo propuesto.

Respecto a la disponibilidad de materia prima en los departamentos seleccionados como alternativas de proveedores en el presente proyecto, se evidencia un limitante desde la falta de información. Por lo tanto, los datos que se toman para validación son calculados de acuerdo a cifras presentadas en miles de hectáreas por departamento con corte a septiembre de 2015 por la FNC (ver Tabla 7); se calcula el porcentaje de participación de cada uno de los departamentos sobre la producción nacional, el cual es distribuido uniformemente en los meses en que, según información presentada por Asoexport (s.f.), son los periodos de cosecha de café en los diferentes departamentos del territorio colombiano; al tener establecido el porcentaje, este es convertido a su valor en miles de hectáreas que serían cosechadas por mes en cada uno de los departamentos.

Una vez establecido el número de hectáreas de café recolectadas por mes, se acude al valor generado por estudios de la FNC (2015), respecto a la productividad promedio de la caficultura colombiana, la cual supera los 15,4 sacos de 60 kilos de café verde por hectárea. Una vez que se tienen las cifras en estas unidades, se

procede a hacer uso de cálculos realizados por Cenicafe (2010), donde exponen que por cada millón de sacos de café verde producido se genera, de pulpa y mucílago fresco, 162.900 y 55.500 toneladas, respectivamente, quedando así establecidas las toneladas de mucílago y pulpa generada por cada uno de los departamentos en los diferentes meses del año.

Para el caso de los tallos se toma como referencia información generada por parte del Sistema de Información Cafetera SICA (2015) de la FNC, disponiendo del número de hectáreas por tipo de labor (renovación siembra y renovación zoca) en cada uno de los meses del año 2014 por los departamentos productores de café. Se determina que en promedio por hectárea se obtienen 16 toneladas, utilizando dicha cifra como factor de conversión para establecer el total de toneladas de tallos disponible en cada uno de los departamentos seleccionados como proveedores de materia prima, en cada uno de los meses, de esta manera son establecidos los parámetros *QP*, *QM*, y *QZ*.

Las tasas de producción de etanol a partir de pulpa y mucílago corresponden a las expuestas por Cenicafe (2010) considerando que de una tonelada de pulpa se obtienen 25,17 litros de etanol, y por el mucílago 58,37 litros. Para el caso de tallos, de acuerdo con lo expuesto por Triana (2011), con esta materia prima se obtiene un rendimiento de 240 litros por tonelada. De esta manera se establecieron los valores para *TPP*, *TPM*, y *TPZ*. Las materias primas consideradas en este estudio aún no se comercializan, por lo tanto no se cuenta con un costo establecido para su venta, de acuerdo con esto se toma como referencia para el presente estudio, el valor otorgado para la tonelada de tallos en el estudio de Duarte, A. E., Sarache, W. A., & Costa, Y. J. (2014), debido a que el contexto geográfico y social que se toma en este es el mismo, siendo el costo establecido para las tres biomásas en 45 dólares, que en pesos colombianos a tarifa promedio del año 2016 (\$3,050.98) correspondería a \$137,294, siendo este el valor para los parámetros *CBP*, *CBM*, y *CBZ*.

Respecto a la demanda de etanol por cada uno de los departamentos con centros de mezcla considerados y expuestos en la Tabla 9, se referencia la información concentrada en el “Balance del sector azucarero colombiano 2000 – 2016” (Fondo de Estabilización de Precios del Azúcar, FEPA (2016)), donde es expuesto en cuanto a etanol en miles de litros, la producción y las ventas al mercado nacional. Teniendo en cuenta que el eslabón final considerado en el presente estudio son los centros de mezcla y que estos deben suplir la demanda nacional de etanol requerido, se toman el volumen de litros vendidos al mercado nacional en los meses del año 2015, ya que los del 2016 se encuentran sujetos a cambios por parte de la auditoría del FEPA. Con estos datos y la participación en cuanto número de centros de mezcla disponibles en los departamentos seleccionados para la presente validación, es distribuida dicha demanda para cada uno de los meses, quedando definido el parámetro *DM*.

Las capacidades tanto para centros de acopio como para plantas de conversión, son calculadas de acuerdo con la producción máxima por mes que se tendrá de cada uno de los tipos de materia prima consideradas en la presente investigación. **Teniendo en cuenta que en el modelo se supone en (tres) como el número máximo de plantas de procesamiento**, la producción es dividida entre estos; y respecto a las plantas de conversión que se dispone de una para cada materia prima, se calcula el máximo de etanol producido por mes, dando este valor su capacidad máxima.

Finalmente, los costos fijos y variables de apertura tanto para centros de acopio, como para plantas de producción, no serán introducidos dentro de la presente validación; sin embargo el parámetro se deja establecido en el modelo para futuros casos de aplicación. Lo anterior, debido a que en revisiones de la literatura existente al momento, no se registra datos que puedan servir como referencia para el establecimiento del valor de estos parámetros. Por lo anterior, las decisiones de instalación generadas a partir de la presente validación responden a la minimización de costos por concepto de transporte y valor de materia prima recolectada. En el modelo, los costos referentes a apertura se toma como valor de la variable “cero”,

debido a que no se cuenta con suficientes criterios para ser establecidos, ni diferenciados por zonas, la otra opción se genera al asumir valores diferentes de cero que sean iguales para todas las alternativas, sin embargo al no existir valores diferenciadores las decisiones de apertura son las mismas que al asumir un valor de cero.

4.2. Análisis de resultados para caso de estudio

El modelo propuesto es desarrollado por medio del Software GAMS (General Algebraic Modeling System), desarrollado por A. Brooke, D. Kendrick y A. Meeraus, en su versión 21.2, ejecutando el algoritmo CPLEX para su solución, obteniendo buenos tiempos para generación de solución (máximo: 0.05 segundos), en la Tabla 13 se exponen algunas de las características principales.

Tabla 13. Estadísticas de modelo propuesto

Estadísticas	
Bloque de ecuaciones	47
Bloque de variables	20
Elementos no cero	6535
Ecuaciones individuales	1527
Variables individuales	1151
Variables discretas	60

Fuente: Elaboración propia.

El modelo fue ejecutado para cada mes del año (12 veces), variando la cantidad de materia prima disponible en los departamentos seleccionados como proveedores, y la cantidad de etanol demandado en esta misma unidad de tiempo en los departamentos poseedores de los centros de mezcla (distribuidores mayoristas) incluidos en el caso de estudio. Así, el fin del estudio es determinar la estabilidad

respecto a estas dos variables (disponibilidad de materia prima y demanda) de los resultados referentes a ubicación de los centros de acopio y plantas de producción, para posteriormente, con ubicaciones definidas, optimizar los flujos generados entre los diferentes eslabones de la cadena de suministro.

4.2.1. Identificación de ubicaciones

De acuerdo a los parámetros ingresados con el fin de identificar variables de apertura relacionadas a los centros de acopio y plantas de producción, además de los flujos generados entre eslabones, será materia de análisis las variables relacionadas a apertura, con el fin de poder determinar en una primera etapa las ubicaciones que de acuerdo a la disponibilidad de materia prima y demanda de etanol permanecen con una mayor estabilidad en términos de ser seleccionadas en un mayor número de meses bajo las condiciones generadas.

Para el caso de centros de acopio, se propone en el modelo que sean generados como máximo tres (3) para cada tipo de materia prima, de esta manera puede abrirse cualquiera de estos según como sea necesario por condiciones que se generan. En la Tabla 14 se muestran los resultados arrojados en cada uno de los meses para las biomásas estudiadas.

Tabla 14. Variable de apertura centros de acopio

MES	CENTROS DE ACOPIO								
	PULPA			MUCÍLAGO			TALLOS		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ENERO	-	CAUCA	TOLIMA	CAUCA	-	TOLIMA	ANTIOQ.	HUILA	TOLIMA
FEB.	CAUCA	-	-	CAUCA	-	-	HUILA	ANTIOQ.	TOLIMA
MARZO	-	TOLIMA	ANTIOQ.	-	ANTIOQ	TOLIMA	CAUCA	ANTIOQ.	TOLIMA
ABRIL	ANTIOQ	HUILA	TOLIMA	CAUCA	HUILA	TOLIMA	ANTIOQ.	TOLIMA	CAUCA
MAYO	TOLIMA	CAUCA	HUILA	TOLIMA	HUILA	CAUCA	TOLIMA	CAUCA	-
JUNIO	HUILA	CAUCA	TOLIMA	TOLIMA	HUILA	CAUCA	TOLIMA	CAUCA	HUILA
JULIO	-	-	-	-	-	-	TOLIMA	-	CAUCA
AGO.	NS	-	-	CAUCA	-	-	TOLIMA	CAUCA	-
SEPT.	NS	-	-	CAUCA	-	-	TOLIMA	-	CAUCA
OCT.	ANTIOQ.	TOLIMA	HUILA	NS	TOLIMA	ANTIOQ.	CAUCA	-	-
NOV.	HUILA	TOLIMA	ANTIOQ.	ANTIOQ.	HUILA	TOLIMA	-	ANTIOQ.	TOLIMA
DIC.	TOLIMA	HUILA	ANTIOQ.	ANTIOQ.	HUILA	TOLIMA	HUILA	TOLIMA	CAUCA

Fuente: Elaboración propia.

Tomando como referencia la información expuesta en la Tabla 14, se puede observar que debido a la disponibilidad de materia prima, en las temporadas de abril a junio, y de octubre a diciembre, se requiere de un número mayor de centros de acopio, caso contrario para el mes de julio que se requiere sólo dos de estos para la recolección de tallos; el resto de meses cuenta con mínimo una de estas instalaciones para las tres materias primas.

Tabla 15. Recuento ubicaciones centros acopio

UBICACIÓN	MATERIA PRIMA			TOTAL CENTROS DE ACOPIO
	PULPA	MUCÍLAGO	TALLOS	
NS	2	1	0	3
ANTIOQUIA	5	4	5	14
TOLIMA	8	8	11	27
CAUCA	4	7	9	20
HUILA	6	5	4	15

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los datos expuestos en la Tabla 14, se genera la Tabla 15, donde se evidencia de manera más clara un recuento sobre las veces que son seleccionadas las diferentes alternativas de ubicación para servir como centro de acopio de las materias primas. Se evidencia que para las tres materias primas la alternativa de ubicación con más solicitudes de apertura es Tolima. Para el caso de mucílago y tallos, la alternativa a seleccionar es Cauca, y Huila para pulpa. Al encontrarse diferenciados del resto de ubicaciones, situación que no ocurre para la selección del tercer centro de acopio, debido a que los meses de ubicación son similares (casillas grises), se toma como segundo criterio de selección las ubicaciones que tengan mayores aperturas totales, debido a que dicho valor representa una mayor estabilidad; así, la tercera ubicación para centro de acopio de mucílago y tallos es Huila, y para la recolección de pulpa será Cauca. De acuerdo con lo expuesto, la ubicación de los tres centros de acopio para las diferentes materias primas consideradas en la presente investigación coincide en los departamentos de Tolima, Cauca y Huila.

Tabla 16. Variable apertura plantas de producción

MES	PLANTAS DE PRODUCCIÓN			TOTAL ETANOL PRODUCIDO			
	PULPA	MUCÍLAGO	TALLOS	PULPA	MUCÍLAGO	TALLOS	TOTAL
ENERO	TOLIMA	TOLIMA	TOLIMA	2.967.669	2.344.665	48.532.800	53.845.134
FEB.	CAUCA	CAUCA	TOLIMA	613.267	484.529	26.934.960	28.032.756
MARZO	TOLIMA	TOLIMA	TOLIMA	3.651.664	2.885.112	19.351.440	25.888.216
ABRIL	TOLIMA	HUILA	ANTIOQ.	8.918.033	7.045.959	14.295.840	30.259.832
MAYO	HUILA	HUILA	TOLIMA	9.531.300	7.530.489	16.538.160	33.599.949
JUNIO	HUILA	HUILA	TOLIMA	6.947.927	5.489.407	17.804.160	30.241.494
JULIO	-	-	TOLIMA	-	-	16.386.960	16.386.960
AGO.	NS	CAUCA	TOLIMA	2.152.740	1.700.902	18.884.880	22.738.522
SEPT.	NS	CAUCA	TOLIMA	2.152.740	1.700.902	10.059.200	13.912.842
OCT.	TOLIMA	ANTIOQ.	CAUCA	6.299.044	4.976.801	14.460.000	25.735.845
NOV.	TOLIMA	HUILA	ANTIOQ.	7.577.076	5.986.486	8.874.240	22.437.802
DIC.	ANTIOQ.	ANTIOQ.	HUILA	7.577.076	5.986.486	3.183.360	16.746.922

Fuente: Elaboración propia.

Para efectos de análisis de apertura referente a plantas de producción es presentada la Tabla 16, donde se expone el departamento donde se realizaría apertura de planta según las condiciones dadas en cada uno de los meses, al igual que el etanol que se generaría en cada una de estas plantas, finalizando con el total de etanol que se genera en cada uno de los meses a partir de las 3 materias primas consideradas, con esta información se genera el recuento presentado en la Tabla 17.

De acuerdo al recuento de ubicaciones de plantas de producción expuesto en la Tabla 17, se evidencia de manera clara siendo la diferencia con el resto de opciones de ubicación igual o superior a 3 meses, que para el caso de pulpa y tallos, Tolima es el departamento de mejor opción para establecer la planta de producción para obtener etanol. Sin embargo, para el caso del mucílago no es totalmente clara la ubicación que debe tener la planta de producción para su tratamiento, razón por la cual es considerado un segundo criterio igual al de la selección de centros de acopio (ubicación seleccionada en un mayor número de meses en general), siendo para el procesamiento del mucílago, seleccionado el departamento de Tolima, y no Huila (como se concluiría por la información presentada en la Tabla 17), debido a su poca diferenciación respecto al resto de departamentos y la cercanía presentada con Tolima, que de acuerdo con el segundo criterio es el seleccionado.

Tabla 17. Recuento ubicaciones plantas de producción

UBICACIÓN	MATERIA PRIMA			TOTAL PLANTAS DE PRODUCCIÓN
	PULPA	MUCÍLAGO	TALLOS	
NS	2	0	0	2
ANTIOQUIA	1	2	2	5
TOLIMA	5	2	8	15
CAUCA	1	3	1	5
HUILA	2	4	1	7

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la información expuesta anteriormente se concluye que tanto centros de acopio como plantas de producción compartirían ubicaciones. Para el caso de centros de acopio en los departamentos de Tolima, Cauca y Huila, y establecimiento de plantas de producción para el procesamiento de lo recolectado en el departamento del Tolima, por lo cual se podría concluir que es conveniente la construcción de una multi-planta para la producción de etanol a partir de mucílago, pulpa, y tallos, teniendo en cuenta que en el mes de julio procesaría únicamente tallos.

4.2.2. Optimización De Flujos

Una vez determinadas las ubicaciones, se procede a optimizar los flujos entre los diferentes eslabones, los cuales son expuestos en las Tablas 19 a 30, y optimizados mediante el modelo propuesto inicialmente con modificaciones referentes a eliminación de alternativas de ubicación, y por tanto variables binarias de apertura, de esta manera se obtiene un modelo bajo las características expuestas en la Tabla 18.

Tabla 18. Estadísticas modelo propuesto (Flujos)

Estadísticas	
Bloque de ecuaciones	20
Bloque de variables	14
Elementos no cero	669
Ecuaciones individuales	82
Variables individuales	199

Fuente: Elaboración propia.

En las Tablas de la 19 a 22 se exponen los flujos generados entre departamentos y centros de acopio, evidenciándose que en el mes de enero la mayor cantidad de pulpa y mucílago es recolectada en el departamento de Tolima (93.540 y 31.868 toneladas, respectivamente), siendo necesario en ambos casos un segundo centro

de acopio en Cauca que se encargue de recolectar el resto de biomasa disponible, situación similar es presentada en el mes de marzo, recolectando Tolima su capacidad máxima en centros de acopio para mucílago y pulpa (45.000 y 130.000 toneladas, respectivamente). En el mes de febrero por su parte sólo se hace necesario contar con un centro de acopio activo para cada uno de estos dos subproductos en el Departamento del Cauca. Para el caso de los tallos en el primer trimestre del año, permanecerán activos los tres centros de acopio disponibles activos recibiendo Tolima la mayor cantidad de estos, manteniendo su capacidad máxima en uso (Tabla 19).

En el segundo trimestre del año expuesto en la Tabla 20, se presenta una baja en la producción de tallos, por lo que en los meses de abril y mayo, se mantienen activos dos centros de acopio en los departamentos de Tolima y Cauca, sin mantener sus capacidades máximas, sólo en el mes de Junio se activa un tercer centro de acopio en Huila. Caso contrario con los subproductos considerados, ya que la cantidad de estos se incrementa al presentarse en algunos de los departamentos cosecha principal y otros mitaca, permaneciendo durante el segundo trimestre activos los tres centros de acopio, siendo el de mayor recepción, Tolima.

Para el tercer trimestre del año la reducción, especialmente en mucílago y pulpa, es evidente, estando en ambos casos activo como único centro de acopio el ubicado en el departamento de Tolima para los meses de agosto y septiembre, en el mes de julio todos los centros de acopio para estas materias primas se encontrarán inactivos. Para los tallos permanecerán durante los tres meses activos los centros de acopio de Tolima y Cauca. Finalmente, en el cuarto trimestre del año incrementa la cantidad disponible de mucílago y pulpa, contando en el mes de octubre con dos centros de acopio activos en Tolima y Huila, para noviembre y diciembre se activan todos los centros de acopio disponibles. Los tallos, durante todo el trimestre contarán con los centros de acopio ubicados en Tolima y Cauca para realizar las debidas recepciones mostradas en la Tabla 22.

Tabla 19. Flujo de materia prima desde cada departamento a los centros de acopio para el primer trimestre (en toneladas)

DEPARTAMENTOS PROVEEDORES		CENTROS DE ACOPIO								
		Mucílago			Pulpa			Tallos		
		Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila
Antioquia	Enero	-	-	-	-	-	-	-	35730	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	19437	-	-
	Marzo	18323	-	-	53781	-	-	15196	-	-
Caldas	Enero	-	-	-	-	-	-	31669	-	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	16898	-	-
	Marzo	-	-	-	-	-	-	9129	-	-
Cauca	Enero	-	-	-	-	-	-	-	8318	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	-	4884	-
	Marzo	-	-	-	-	-	-	5071	-	-
Cesar	Enero	8236	-	-	24175	-	-	779	-	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	963	-	-
	Marzo	-	-	-	-	-	-	2897	-	-
Cund.	Enero	-	-	-	-	-	-	-	-	2982
	Febrero	-	-	-	-	-	-	-	-	1920
	Marzo	-	-	-	-	-	-	1875	-	-
Huila	Enero	-	-	-	-	-	-	-	-	47608
	Febrero	-	-	-	-	-	-	-	-	26092
	Marzo	-	-	-	-	-	-	4833	-	8823
Nariño	Enero	-	8301	-	-	24365	-	-	4521	-
	Febrero	-	8301	-	-	24365	-	-	1860	-
	Marzo	-	-	-	-	-	-	-	1808	-
N. de Santander	Enero	-	-	-	-	-	-	-	-	2373
	Febrero	-	-	-	-	-	-	1132	-	613
	Marzo	3624	-	-	10637	-	-	1927	-	-
Quindío	Enero	-	-	-	-	-	-	12803	-	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	4390	-	-
	Marzo	3849	-	-	11297	-	-	2647	-	-
Risaralda	Enero	-	-	-	-	-	-	15149	310	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	8805	-	-
	Marzo	-	-	-	-	-	-	6526	-	-
Santander	Enero	-	-	-	-	-	-	9600	-	1938
	Febrero	-	-	-	-	-	-	8560	-	-
	Marzo	-	-	-	-	-	-	4475	-	-
Tolima	Enero	14460	-	-	42443	-	-	-	-	15099
	Febrero	-	-	-	-	-	-	9815	-	-
	Marzo	14460	-	-	42443	-	-	10115	-	-
Valle	Enero	9172	-	-	26922	-	-	-	13341	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	-	-	6860
	Marzo	4744	-	4428	11842	-	15080	5309	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Flujo de materia prima desde cada departamento a los centros de acopio para el segundo trimestre (en toneladas)

DEPARTAMENTOS PROVEEDORES		CENTROS DE ACOPIO								
		Mucilago			Pulpa			Tallos		
		Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila
Antioquia	Abril	18323	-	-	53781	-	-	10568	-	-
	Mayo	18323	-	-	53781	-	-	13160	-	-
	Junio	-	-	-	-	-	-	15053	-	-
Caldas	Abril	10309	-	-	30259	-	-	5688	-	-
	Mayo	10309	-	-	30259	-	-	7428	-	-
	Junio	10309	-	-	30259	-	-	9359	-	-
Cauca	Abril	-	26387	-	-	77451	-	4973	-	-
	Mayo	-	26387	-	-	77451	-	5877	-	-
	Junio	7593	18794	-	20203	57248	-	6020	-	-
Cesar	Abril	-	-	-	-	-	-	4141	-	-
	Mayo	-	-	-	-	-	-	3781	-	-
	Junio	-	-	-	-	-	-	1837	-	-
Cund.	Abril	-	-	5402	-	-	15855	1224	-	-
	Mayo	-	-	5402	-	-	15855	1959	-	-
	Junio	5402	-	-	15855	-	-	2815	-	-
Huila	Abril	-	-	21950	-	-	64427	8600	-	-
	Mayo	-	-	21950	-	-	64427	7173	-	-
	Junio	-	-	21950	-	-	64427	2506	-	3588
Nariño	Abril	-	-	-	-	-	-	-	1284	-
	Mayo	-	8301	-	-	24365	-	-	1116	-
	Junio	-	8301	-	-	24365	-	-	596	-
N. de Santander	Abril	-	-	3624	-	-	10637	1601	-	-
	Mayo	-	-	3624	-	-	10637	2000	-	-
	Junio	-	-	-	-	-	-	1703	-	-
Quindío	Abril	3849	-	-	11297	-	-	2104	-	-
	Mayo	3849	-	-	11297	-	-	2984	-	-
	Junio	-	-	-	-	-	-	4291	-	-
Risaralda	Abril	7236	-	-	21240	-	-	5606	-	-
	Mayo	7236	-	-	21240	-	-	7492	-	-
	Junio	7236	-	-	21240	-	-	9317	-	-
Santander	Abril	-	-	-	-	-	-	2996	-	-
	Mayo	-	-	-	-	-	-	3454	-	-
	Junio	-	-	-	-	-	-	3598	-	-
Tolima	Abril	5283	-	9177	13423	-	29020	7537	-	-
	Mayo	5283	-	9177	13423	-	29020	8816	-	-
	Junio	14460	-	-	42443	-	-	7709	-	-
Valle	Abril	-	4325	4847	-	16861	10061	3244	-	-
	Mayo	-	4325	4847	-	16861	10061	3669	-	-
	Junio	-	-	-	-	-	-	5792	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Flujo departamentos – Centros de acopio (Tercer trimestre - en toneladas)

DEPARTAMENTOS PROVEEDORES		CENTROS DE ACOPIO								
		Mucílago			Pulpa			Tallos		
		Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila
Antioquia	Julio	-	-	-	-	-	-	9421	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	8582	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	5119	-	-
Caldas	Julio	-	-	-	-	-	-	8225	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	6096	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	5912	-	-
Cauca	Julio	-	-	-	-	-	-	4955	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	9755	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	6352	-	-
Cesar	Julio	-	-	-	-	-	-	1648	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	2728	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	2098	-	-
Cund.	Julio	-	-	-	-	-	-	2296	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	2060	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	3306	-	-
Huila	Julio	-	-	-	-	-	-	7529	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	12508	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	13836	-	-
Nariño	Julio	-	-	-	-	-	-	-	2428	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	-	8728	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	-	5902	-
N. de Santander	Julio	-	-	-	-	-	-	981	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	821	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	953	-	-
Quindío	Julio	-	-	-	-	-	-	4749	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	3230	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	2004	-	-
Risaralda	Julio	-	-	-	-	-	-	6416	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	4737	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	4991	-	-
Santander	Julio	-	-	-	-	-	-	3301	-	-
	Agosto	14570	-	-	42764	-	-	3948	-	-
	Sept.	14570	-	-	42764	-	-	3479	-	-
Tolima	Julio	-	-	-	-	-	-	8900	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	8251	-	-
	Sept.	-	-	-	-	-	-	10758	-	-
Valle	Julio	-	-	-	-	-	-	7430	-	-
	Agosto	14570	-	-	42764	-	-	7243	-	-
	Sept.	14570	-	-	42764	-	-	6148	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Flujo departamentos – Centros de acopio (Cuarto trimestre)

DEPARTAMENTOS PROVEEDORES		CENTROS DE ACOPIO								
		Mucílago			Pulpa			Tallos		
		Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila	Tolima	Cauca	Huila
Antioquia	Oct.	18323	-	-	53781	-	-	3109	-	-
	Nov.	14934	3389	-	39667	14114	-	1395	-	-
	Dic.	14934	3389	-	39667	14114	-	406	-	-
Caldas	Oct.	10309	-	-	30259	-	-	4747	-	-
	Nov.	10309	-	-	30259	-	-	2926	-	-
	Dic.	10309	-	-	30259	-	-	112	-	-
Cauca	Oct.	-	-	-	-	-	-	5117	-	-
	Nov.	-	-	-	-	-	-	2103	-	-
	Dic.	-	-	-	-	-	-	448	-	-
Cesar	Oct.	-	-	-	-	-	-	2101	-	-
	Nov.	8236	-	-	24175	-	-	1136	-	-
	Dic.	8236	-	-	24175	-	-	54	-	-
Cund.	Oct.	-	-	5402	-	-	15855	2430	-	-
	Nov.	-	-	5402	-	-	15855	2203	-	-
	Dic.	-	-	5402	-	-	15855	1257	-	-
Huila	Oct.	-	-	21950	-	-	64427	12504	-	-
	Nov.	-	-	21950	-	-	64427	7951	-	-
	Dic.	-	-	21950	-	-	64427	3991	-	-
Nariño	Oct.	-	-	-	-	-	-	-	6218	-
	Nov.	-	-	-	-	-	-	-	3259	-
	Dic.	-	-	-	-	-	-	-	90	-
N. de Santander	Oct.	-	-	3624	-	-	10637	845	-	-
	Nov.	-	-	3624	-	-	10637	790	-	-
	Dic.	-	-	3624	-	-	10637	109	-	-
Quindío	Oct.	3849	-	-	11297	-	-	2305	-	-
	Nov.	3849	-	-	11297	-	-	985	-	-
	Dic.	3849	-	-	11297	-	-	149	-	-
Risaralda	Oct.	7236	-	-	21240	-	-	2738	-	-
	Nov.	7236	-	-	21240	-	-	2796	-	-
	Dic.	7236	-	-	21240	-	-	471	-	-
Santander	Oct.	5283	-	9287	13423	-	29341	2414	-	-
	Nov.	-	-	-	-	-	-	1665	-	-
	Dic.	-	-	-	-	-	-	1092	-	-
Tolima	Oct.	-	-	-	-	-	-	9727	-	-
	Nov.	436	-	14024	3362	-	39081	3740	-	-
	Dic.	436	-	14024	3362	-	39081	733	-	-
Valle	Oct.	-	-	-	-	-	-	5995	-	-
	Nov.	-	9172	-	-	26922	-	6027	-	-
	Dic.	-	9172	-	-	26922	-	4352	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el orden del flujo de la materia prima, se presentan las tablas de la 23 a la 26 donde son expuestas las cantidades (en toneladas) enviadas desde los

centros de acopio hacia plantas de producción, teniendo en cuenta que mediante restricción los centros de acopio funcionan como nodo trasbordo, la materia prima que ingresa a cada uno de estos es igual a la enviada desde cada uno hacia las plantas de producción.

En el primer trimestre, marzo es el mes en el que más flujo de mucílago y pulpa; por el contrario, para los tallos este mes representa el menor flujo en este periodo de tiempo, y en el que se genera uno mayor en enero. Para las dos materias primas nombradas en un principio, febrero es donde se genera el menor flujo total hacia su producción. De acuerdo a lo anterior y a lo que se evidencia en el resto de año el mucílago y la pulpa presentan los mismos meses de menor y mayor flujo debido a que su nivel de producción depende de una misma cantidad de producción de grano de café. Así, para el segundo trimestre mayo es el de mayor y junio el de menor flujo para mucílago y pulpa, y para el caso de tallos junio y abril, respectivamente.

Tabla 23. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Primer trimestre)

CENTROS DE ACOPIO		PLANTAS DE PRODUCCIÓN								
		Mucílago			Pulpa			Tallos		
		Tolima			Tolima			Tolima		
		Enero	Feb.	Marzo	Enero	Feb.	Marzo	Enero	Feb.	Marzo
Mucílago	Tolima	31868	-	45000						
	Cauca	8301	8301	-						
	Huila	-	-	4428						
Pulpa	Tolima				93540	-	130000			
	Cauca				24365	24365	-			
	Huila				-	-	15080			
Tallos	Tolima							70000	70000	70000
	Cauca							62220	6744	1808
	Huila							70000	35485	8823

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Segundo trimestre)

CENTROS DE ACOPIO		PLANTAS DE PRODUCCIÓN								
		Mucílago			Pulpa			Tallos		
		Tolima			Tolima			Tolima		
		Abril	Mayo	Junio	Abril	Mayo	Junio	Abril	Mayo	Junio
Mucílago	Tolima	45000	45000	45000						
	Cauca	30712	39013	27095						
	Huila	45000	45000	21950						
Pulpa	Tolima				130000	130000	130000			
	Cauca				94312	118677	81613			
	Huila				130000	130000	64427			
Tallos	Tolima							58282	67793	70000
	Cauca							1284	1116	596
	Huila							-	-	3588

Fuente: Elaboración propia

Para el tercer trimestre, el mes de julio se encuentran inactivas las plantas de etanol a partir de mucílago y pulpa, ya que la producción del grano de café para este mes es nula, mientras que agosto y septiembre para estas materias primas son similares, recibiendo materia prima únicamente del centro de acopio ubicado en el Tolima para cada una de estas biomásas. Los tallos son recibidos para este trimestre desde Tolima y Cauca, siendo julio el mes que mayor cantidad recibe su planta de producción, y el de menor, abril.

Tabla 25. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Tercer trimestre)

CENTROS DE ACOPIO		PLANTAS DE PRODUCCIÓN								
		Mucílago			Pulpa			Tallos		
		Tolima			Tolima			Tolima		
		Julio	Agosto	Sept.	Julio	Agosto	Sept.	Julio	Agosto	Sept.
Mucílago	Tolima	-	29140	29140						
	Cauca	-	-	-						
	Huila	-	-	-						
Pulpa	Tolima				-	85528	85528			
	Cauca				-	-	-			
	Huila				-	-	-			
Tallos	Tolima							65851	69959	64956
	Cauca							2428	8728	5902
	Huila							-	-	-

Fuente: Elaboración propia

El último trimestre, cuyos flujos son expuestos en la Tabla 26, se presenta un buen flujo tanto para mucílago como para pulpa, generándose en dos de los meses envíos desde los tres centros de acopio disponibles, a su vez de dos de estos la cantidad de la capacidad de centros de acopio para cada una de las materias primas. Los flujos generados con tallo, se generan desde los centros de acopio Tolima y Cauca, en los tres meses, siendo el mes de menor recepción de materia prima diciembre, y el de mayor, octubre.

Tabla 26. Flujo Centros de acopio – plantas de producción (Cuarto trimestre)

CENTROS DE ACOPIO		PLANTAS DE PRODUCCIÓN								
		Mucílago			Pulpa			Tallos		
		Tolima			Tolima			Tolima		
		Oct.	Nov.	Dic.	Oct.	Nov.	Dic.	Oct.	Nov.	Dic.
Mucílago	Tolima	45000	45000	45000						
	Cauca	-	12561	12561						
	Huila	40263	45000	45000						
Pulpa	Tolima				130000	130000	130000			
	Cauca				-	41036	41036			
	Huila				120260	130000	130000			
Tallos	Tolima							54032	33717	13174
	Cauca							6218	3259	90
	Huila							-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Los flujos entre los últimos eslabones de la cadena de suministro (plantas de producción – centros de mezcla), se exponen en las Tablas 27, 28, 29 y 30. En el primer trimestre, cuyos flujos se evidencian en la Tabla 27, se logra atender de los 14 centros de mezcla completamente la demanda del mes de enero, generando adicional una cantidad de etanol sobrante 1,69E+07 litros, los cuales podrían generar una reserva para el mercado nacional, o considerar si se pudiese exportar. En el mes de febrero, no se genera ningún tipo de envío de etanol hacia Vichada, ni Bolívar; se atiende parcialmente la demanda de Atlántico, y completamente la del resto de centros de mezcla considerados. En marzo se desatiende completamente a 5 centros de mezcla (Putumayo, Vichada, Guaviare, Bolívar y Atlántico), se atiende parcialmente a Santander en un 8,8%, y completamente a los 8 centros de mezcla restantes.

En el segundo trimestre, los meses de abril y junio presentan 11 y 10 departamentos abastecidos completamente, con 2 y 3 centros de mezcla no abastecidos, respectivamente. El factor común en los no abastecidos con Vichada y Bolívar, y el adicional en el mes de junio Atlántico; de igual manera los dos presentaron de a un centro de mezcla parcialmente abastecido, en el caso de abril fue Atlántico y en junio, Guaviare. Por su parte el mes de mayo, abasteció la demanda nacional y genera un sobrante de etanol de 3,38 millones de litros.

El tercer trimestre se ve caracterizado por el desabastecimiento, debido a que las plantas de pulpa y mucílago se encuentran inactivas, y el resto de los meses la producción de estas materias es baja. Así, presenta en los meses de julio y septiembre, 5 centros de mezcla abastecidos completamente, 8 no atendidos, y uno de forma parcial (en ambos casos, Valle); el mes de agosto son 7 departamentos atendidos por completo, Valle parcialmente, y los restantes no atendidos. Situación similar se presenta en el último trimestre donde en octubre se generan 7 centros de mezcla no abastecidos, y uno parcialmente, los restantes son atendidos en su totalidad; los meses noviembre y diciembre, atienden por completo a 4 centros de mezcla, en el primero de estos meses, Antioquia es abastecido de manera parcial, y 7 desatendidos, y para diciembre esto últimos son 10 centros de mezcla.

Tabla 27. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Primer trimestre)

PLANTAS DE PRODUCCIÓN		CENTROS DE MEZCLA							
		Cund.	Risaralda	Valle	Tolima	Huila	Caldas	Caquetá	Putumayo
Mucílago (Tolima)	Enero	-	-	-	-	-	-	-	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	-	-
	Marzo	-	1,87E+06	-	-	995026	-	-	-
Pulpa (Tolima)	Enero	-	-	-	-	-	-	-	-
	Febrero	-	-	-	-	-	-	-	-
	Marzo	-	117497	-	-	-	-	-	-
Tallos (Tolima)	Enero	8,21E+06	2,05E+06	6,16E+06	2,05E+06	1,03E+06	2,05E+06	1,03E+06	1,03E+06
	Febrero	7,36E+06	1,84E+06	5,52E+06	1,84E+06	920053	1,84E+06	920053	920053
	Marzo	7,96E+06	-	5,97E+06	1,99E+06	-	1,99E+06	995026	-
		Vichada	Guaviare	Bolívar	Atlántico	Santander	Antioquia	Sobrantes	
Mucílago (Tolima)	Enero	-	-	2,34E+06	-	-	-	-	
	Febrero	-	-	-	431176,42	-	53352,95	-	
	Marzo	-	-	-	-	17530	-	-	
Pulpa (Tolima)	Enero	-	-	732940	2,05E+06	-	-	182991	
	Febrero	-	-	-	-	-	613267	-	
	Marzo	-	-	-	-	-	3,53E+06	-	
Tallos (Tolima)	Enero	1,03E+06	1,03E+06	-	-	2,05E+06	4,10E+06	1,67E+07	
	Febrero	-	920053	-	-	1,84E+06	3,01E+06	-	
	Marzo	-	-	-	-	-	445939	-	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Segundo trimestre)

PLANTAS DE PRODUCCIÓN		CENTROS DE MEZCLA							
		Cundinamarca	Risaralda	Valle	Tolima	Huila	Caldas	Caquetá	Putumayo
Mucílago (Tolima)	Abril	2,81E+06	-	-	-	-	433116	-	-
	Mayo	-	-	-	-	-	1,68E+06	-	-
	Junio	-	-	-	-	-	894623	-	-
Pulpa (Tolima)	Abril	-	-	-	-	950395	1,47E+06	950395	950395
	Mayo	1,09E+06	-	-	-	839542	-	839542	839542
	Junio	5,79E+06	-	-	-	-	1,16E+06	-	-
Tallos (Tolima)	Abril	4,79E+06	1,90E+06	5,70E+06	1,90E+06	-	-	-	-
	Mayo	5,62E+06	1,68E+06	5,04E+06	1,68E+06	-	-	-	-
	Junio	2,42E+06	2,05E+06	6,16E+06	2,05E+06	1,03E+06	-	1,03E+06	1,03E+06
		Vichada	Guaviare	Bolívar	Atlántico	Santander	Antioquia	Sobrantes	
Mucílago (Tolima)	Abril	-	-	-	-	-	3,80E+06	-	
	Mayo	-	-	-	1,68E+06	1,68E+06	-	2,49E+06	
	Junio	-	491309	-	-	-	4,10E+06	-	
Pulpa (Tolima)	Abril	-	950395	-	1,75E+06	1,90E+06	-	-	
	Mayo	839542	839542	-	-	-	3,36E+06	883209	
	Junio	-	-	-	-	-	-	-	
Tallos (Tolima)	Abril	-	-	-	-	-	-	-	
	Mayo	-	-	2,52E+06	-	-	-	-	
	Junio	-	-	-	-	2,05E+06	-	-	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Tercer trimestre)

PLANTAS DE PRODUCCIÓN		CENTROS DE MEZCLA							
		Cundinamarca	Risaralda	Valle	Tolima	Huila	Caldas	Caquetá	Putumayo
Mucílago (Tolima)	Julio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Agosto	1,70E+06	-	-	-	-	-	-	-
	Septiembre	1,70E+06	-	-	-	-	-	-	-
Pulpa (Tolima)	Julio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Agosto	2,15E+06	-	-	-	-	-	-	-
	Septiembre	2,15E+06	-	-	-	-	-	-	-
Tallos (Tolima)	Julio	8,55E+06	2,14E+06	3,52E+05	2,14E+06	1,07E+06	2,14E+06	-	-
	Agosto	4,63E+06	2,12E+06	6,36E+06	2,12E+06	1,06E+06	2,12E+06	-	-
	Septiembre	4,64E+06	2,12E+06	4,93E+06	2,12E+06	1,06E+06	2,12E+06	-	-
		Vichada	Guaviare	Bolívar	Atlántico	Santander	Antioquia	Sobrantes	
Mucílago (Tolima)	Julio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	-	-
	Septiembre	-	-	-	-	-	-	-	-
Pulpa (Tolima)	Julio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	-	-	-
	Septiembre	-	-	-	-	-	-	-	-
Tallos (Tolima)	Julio	-	-	-	-	-	-	-	-
	Agosto	-	-	-	-	-	4,69E+05	-	-
	Septiembre	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Flujo plantas de procesamiento – centros de mezcla (Cuarto trimestre)

PLANTAS DE PRODUCCIÓN		CENTROS DE MEZCLA							
		Cundinamarca	Risaralda	Valle	Tolima	Huila	Caldas	Caquetá	Putumayo
Mucílago (Tolima)	Octubre	9,59E+05	-	-	-	-	2,29E+06	-	-
	Noviembre	132750	2,25E+06	-	224365	1,13E+06	2,25E+06	-	-
	Diciembre	5,99E+06	-	-	-	-	-	-	-
Pulpa (Tolima)	Octubre	2,87E+06	2,29E+06	-	-	1,14E+06	-	-	-
	Noviembre	-	-	5,55E+06	2,03E+06	-	-	-	-
	Diciembre	2,82E+05	2,43E+06	-	2,43E+06	-	2,43E+06	-	-
Tallos (Tolima)	Octubre	5,32E+06	-	6,86E+06	2,29E+06	-	-	-	-
	Noviembre	8,87E+06	-	-	-	-	-	-	-
	Diciembre	3,18E+06	-	-	-	-	-	-	-
		Vichada	Guaviare	Bolívar	Atlántico	Santander	Antioquia	Sobrantés	
Mucílago (Tolima)	Octubre	-	-	-	-	-	1,73E+06	-	
	Noviembre	-	-	-	-	-	-	-	
	Diciembre	-	-	-	-	-	-	-	
Pulpa (Tolima)	Octubre	-	-	-	-	-	-	-	
	Noviembre	-	-	-	-	-	-	-	
	Diciembre	-	-	-	-	-	-	-	
Tallos (Tolima)	Octubre	-	-	-	-	-	-	-	
	Noviembre	-	-	-	-	-	-	-	
	Diciembre	-	-	-	-	-	-	-	

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la información expuesta en las cuatro Tablas anteriores, se genera la Tabla 31, donde se exponen de manera más precisa de los 14 centros de mezcla seleccionados para la validación del modelo, cuántos de estos son atendidos de manera completa, parcial o nula, al igual que los litros de alcohol carburante faltante para satisfacer la demanda nacional en cada uno de los meses; por último, en dos de los meses (enero, mayo) se atiende completamente la demanda nacional, y se presenta una cantidad extra de etanol, la cual podría servir como reserva para meses en los que se requiere de más producción.

Tabla 31. Atención a centros de mezcla

	CENTROS DE MEZCLA			Litros Faltantes (Millones)	Litros Sobrantes (Millones)
	Atendidos completamente	Atendidos parcialmente	No atendidos		
Enero	14	-	-	-	16,9
Febrero	11	1	2	5,08	-
Marzo	8	1	5	9,93	-
Abril	11	1	2	3,95	-
Mayo	14	-	-	-	3,38
Junio	10	1	3	2,50	-
Julio	5	1	8	22,0	-
Agosto	6	1	7	15,4	-
Septiembre	5	1	8	24,3	-
Octubre	6	1	7	15,4	-
Noviembre	4	1	9	18,0	-
Diciembre	4	-	10	27,0	-

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

En la fase previa al modelamiento, se establece que la materia prima seleccionada para la presente cadena de suministro es altamente llamativa por los rendimientos generados en la producción de alcohol carburante, especialmente los tallos que representan un rendimiento comparativamente alto con los subproductos del café, además de requerir de un menor cuidado durante su proceso de producción al no generarse con este residuo el riesgo de fermentación por vía natural; por tanto, no requerir temperaturas de refrigeración, siendo a su vez el tratamiento de este menos costoso. Sin embargo, las características establecidas en estudios previos, respecto al mucílago y la pulpa, permiten que estos sean considerados dentro de esta investigación.

Bajo el enfoque tomado en la presente investigación basada en la variabilidad de disponibilidad de los subproductos de café (pulpa y mucílago), y los tallos como residuo que se genera su cultivo, el modelo *facility location* permite establecer ubicaciones acordes con la realidad seleccionada como caso de estudio, en tiempos computacionalmente buenos.

La validación del desempeño del modelo contó con dos fases, la primera donde se establecen las ubicaciones para centros de acopio y plantas de producción, y en la segunda la optimización de flujos. En la primera fase se concluye que las ubicaciones que favorecen más la variabilidad de disponibilidad de materia prima es compartida por los tres tipos considerados, es así como las ubicaciones para los centros de acopio tanto para los subproductos como para el residuo son las mismas (Tolima, Cauca, y Huila), y en el caso de plantas de producción las tres han de ser en el departamento del Tolima, coincidiendo esta ubicación con el único artículo relacionado de manera directa y en el mismo contexto colombiano con la presente investigación (Duarte et. al., 2014), hallado en la aproximación al estado del arte.

Aportes de la investigación

La presente investigación representa contribuciones al tema de modelos de optimización aplicados a la producción de biocombustibles de segunda generación a partir de las tres materias primas seleccionadas, debido a que en la aproximación realizada al estado del arte (enfocado a Colombia) tiene como único estudio el realizado por Duarte et. al. (2014) en el tema de ubicación de instalaciones, en el cual toma como única materia prima a procesar los tallos de café. La presente investigación involucra el mucílago y la pulpa. Adicionalmente se considera la posibilidad de instalar centros de acopio, a diferencia de los expuesto en Duarte et. al. (2014) donde sólo se consideran las plantas de producción.

Adicionalmente se realizó un análisis de la estacionalidad que presenta la materia prima objeto de estudio, especialmente en la producción de biomasa de café, donde se encontró que presentan una producción variante en el tiempo caracterizada por estacionalidades ligadas a cosechas presentadas en el año, y aplicación de buenas prácticas y renovaciones a cultivos, determinándose como factor que influye de manera directa en la ubicación de instalaciones; por lo tanto se considera como aspecto relevante por tener en cuenta en el diseño del modelo matemático propuesto, y la toma de decisiones es generada en función de la disponibilidad variable mes a mes en los diferentes departamentos productores de café.

Se genera un cálculo aproximado de la producción de café por departamento y por mes, y a su vez de sus subproductos, mucílago y pulpa, por departamento, como insumo del modelo matemático que puede ser utilizado para futuras investigaciones, debido a que no se encuentran establecidos dichos valores, lo anterior bajo supuestos, y factores de conversión expuestos en el documento.

6. TRABAJOS FUTUROS

Como tema para próximos trabajos investigativos se propone que, debido a la ubicación generada para los centros de acopio y plantas de producción, sean calculados los costos como localizaciones multipropósito, donde sean recibidos y procesados los tres tipos de materia prima.

Por otro lado, en la presente investigación los periodos de tiempo (meses) fueron analizados separadamente, motivo por el que se propone generar un único modelo donde sean considerados todos los meses del año como una variable, y realizar una comparación de variación de resultados tanto de ubicación como de flujos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akgul, O., Zamboni, A., Bezzo, F., Shah, N., & Papageorgiou, L. G. (2011). Optimization-based approaches for bioethanol supply chains. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(9), 4927-4938. Recuperado en www.scopus.com

An, H., Wilhelm, W. E., & Searcy, S. W. (2011). A mathematical model to design a lignocellulosic biofuel supply chain system with a case study based on a region in central texas. *Bioresource Technology*, 102(17), 7860-7870. Recuperado en www.scopus.com

Anacafé (2015). Remoción del mucílago. Disponible en: http://www.anacafe.org/glifos/index.php/BeneficiadoHumedo_Mucilago

Asoexport (s.f.). Periodos de cosecha. Disponible en: http://www.asoexport.org/periodos_cosecha_cafe.html

Azadeh, A., Vafa Arani, H., & Dashti, H. (2014). A stochastic programming approach towards optimization of biofuel supply chain. *Energy*, 76, 513-525. Recuperado en www.scopus.com

Bai, Y., Hwang, T., Kang, S., & Ouyang, Y. (2011). Biofuel refinery location and supply chain planning under traffic congestion. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(1), 162-175. Recuperado en www.scopus.com

Bai, Y., Ouyang, Y., & Pang, J. -. (2012). Biofuel supply chain design under competitive agricultural land use and feedstock market equilibrium. *Energy Economics*, 34(5), 1623-1633. Recuperado en www.scopus.com

Balaman, T. Y., & Selim, H. (2014). A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems. *Applied Energy*, 130, 289-304. Recuperado en www.scopus.com

Bendeck-Olivella, (2013). Situación actual y perspectivas de los biocombustibles en Colombia. *Revista Palmas*, Vol. 34, número 3 (2013). Recuperado en: http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/10868/pdf_14

Bendeck-Olivella, (2013). Los biocombustibles, una apuesta social y ambientalmente responsable. *Colombia Energía* (15 de marzo, 2013). Recuperado en <http://www.colombiaenergia.com/article/los-biocombustibles-una-apuesta-social-y-ambientalmente-responsable>

Berger, A. N. and Mester, J. Inside the black box: What explains differences in the efficiencies of Financial Institutions? *Journal of Banking and Finance*, 1997, 21, 1-59.

Bonilla-Hermosa, V. A., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. *Bioresource Technology*, 166, 142-150. doi:10.1016/j.biortech.2014.05.031

Caballero et. al. (2012). Producción de bioetanol a partir del mucilago de café (*Coffea arabica*). *Revista Ciencia y Tecnología*, No. 10, junio 2012, 150-164. Disponible en: <http://www.lamjol.info/index.php/RCT/article/viewFile/1068/899>

Castro P, Mónica. (2015). Diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café considerando objetivos económicos y ambientales. Universidad Libre Seccional Pereira.

Chopra, S. & Meindl, P. (2008). Administración de la cadena de suministro. 3ª. Edición. Pearson, Educación. Prentice Hall.

Cubero-Abarca, Robert, Moya, Roger, Valaret, Jorre, & Tomazello Filho, Mario. (2014). Use of coffee (*Coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and pellets for heat generation. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(5), 461-470. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542014000500005&lng=en&tlng=en.

Dal-Mas, M., Giarola, S., Zamboni, A., & Bezzo, F. (2011). Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 2059-2071. Recuperado en www.scopus.com

Díaz P., Rafael, Hartley B, Marjorie. (2006). Evaluación del ciclo de vida aplicada en agrocadenas productivas: un instrumento de gestión ambiental para el diseño de políticas. *Revista Iberoamericana de economía ecológica*, 3, 1-15. Recuperado en <http://www.raco.cat/index.php/Revibec/article/view/39763/39601>.

Duarte, A. E., Sarache, W. A., & Costa, Y. J. (2014). A facility-location model for biofuel plants: Applications in the colombian context. *Energy*, 72, 476-483. Recuperado en www.scopus.com

Duarte, A., Sarache, W., Matallana, L. (2013), factores incidente en la ubicación de instalaciones: Una aplicación en el sector de los biocombustibles Colombiano, *Ingeniería e Investigación*, vol. 33, No. 3, pp 72 - 75.

Efroymson, R. A., Dale, V. H., Kline, K. L., McBride, A. C., Bielicki, J. M., Smith, R. L., . . . Shaw, D. M. (2013). Environmental indicators of biofuel sustainability: What

about context? *Environmental Management*, 51(2), 291-306. Retrieved from www.scopus.com

Ekşioğlu, S. D., Acharya, A., Leightley, L. E., & Arora, S. (2009). Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 57(4), 1342-1352. Recuperado en www.scopus.com

Ekşioğlu, S. D., Palak, G., Mondala, A., & Greenwood, A. (2013). Supply chain designs and management for biocrude production via wastewater treatment. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 32(1), 139-147. Recuperado en www.scopus.com

El-Halwagi, A. M., Rosas, C., Ponce-Ortega, J. M., Jiménez-Gutiérrez, A., Mannan, M. S., & El-Halwagi, M. M. (2013). Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives. *AIChE Journal*, 59(7), 2427-2434. Recuperado en www.scopus.com

Federación Nacional de Biocombustible Colombia (2009). Biodiesel de palma vs. Material particulado. *Biocombustibles HOY*, Boletín No. 9. Recuperado en <http://www.fedebiocombustibles.com/files/boletin9.pdf>

Federación Nacional de Biocombustibles Colombia (2015). Información Estadística Sector Biocombustibles. Recuperado en [http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_\(Etanol\).htm](http://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm)

Federación Nacional de biocombustibles Colombia (2016). Etanol. Disponible en: http://www.fedebiocombustibles.com/main-pagina-id-4-titulo-proceso_de_los_biocombustibles.htm

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2015). Colombia cerró 2015 con cosecha cafetera récord en los últimos 23 años. Disponible en: https://www.federaciondefcafeteros.org/algrano-fnc-es/index.php/comments/colombia_cerro_2015_con_cosecha_cafetera_record_en_ultimos_23_anos

Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (2011). Colombia es café. Disponible en: https://www.federaciondefcafeteros.org/algrano-fnc-es/index.php/comments/colombia_es_cafe

Federación Nacional de Cafeteros (2010). Nuestras Regiones cafeteras. Disponible en: http://www.cafedecolombia.com/particulares/es/la_tierra_del_cafe/regiones_cafeteras/

Federación Nacional de Cafeteros (s.f.). Área cultivada anual desde 2002. Disponible en: https://www.federaciondecafeteros.org/static/files/Area_cultivada1.xls

Gastón (2014). Villa María ya tiene funcionando su planta de bioetanol. Córdoba Times. Disponible en: <http://www.cordobatimes.com/el-campo/2014/02/27/villa-maria-ya-tiene-funcionando-su-planta-de-bioetanol/>

Giarola, S., Zamboni, A., & Bezzo, F. (2011). Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries. *Computers and Chemical Engineering*, 35(9), 1782-1797. Recuperado en www.scopus.com

González Merino, Arcelia, & Castañeda Zavala, Yolanda. (2008). Biocombustibles, biotecnología y alimentos: Impactos sociales para México. *Argumentos (México, D.F.)*, 21(57), 55-83. Recuperado en 01 de julio de 2015, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952008000200004&lng=es&tlng=pt .

González-Pérez, María A. (2013). Sostenibilidad en la cadena de suministro: un requisito para la internacionalización empresarial. Recuperado de: <http://www.educamericas.com/articulos/columnas-de-opinion/sostenibilidad-en-la-cadena-de-suministro-un-requisito-para-la-interna>

Hajibabai, L., & Ouyang, Y. (2013). Integrated planning of supply chain networks and multimodal transportation infrastructure expansion: Model development and application to the biofuel industry. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 28(4), 247-259. Recuperado en www.scopus.com

Hernández, M., y Hernández, J. (2008). Verdades y mitos de los biocombustibles. *Elementos* 71 , 15-18.

Inspiration. (2011). Combustibles fósiles. Recuperado de: <https://www.inspiration.org/cambio-climatico/efecto-invernadero/combustibles-fosiles>

Jiménez, J.E & Hernández S. (2002). Marco Conceptual de la cadena de suministro: u nuevo enfoque logístico. Mexico: Santandila.

Kelloway, A., Marvin, W. A., Schmidt, L. D., & Daoutidis, P. (2013). Process design and supply chain optimization of supercritical biodiesel synthesis from waste cooking oils. *Chemical Engineering Research and Design*, 91(8), 1456-1466. Recuperado en www.scopus.com

Kim, J., Realf, M. J., & Lee, J. H. (2011). Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 35(9), 1738-1751. Recuperado en www.scopus.com

Kim, J., Realff, M. J., Lee, J. H., Whittaker, C., & Furtner, L. (2011). Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 853-871. Recuperado en www.scopus.com

Kotaka A, Bando H, Kaya M, Kato-Murai M, Kuroda K, Sahara H, Hata Y, Kondo A & Ueda M (2008) Direct ethanol production from barley β -glucan by sake yeast displaying *Aspergillus oryzae* β -glucosidase and endoglucanase. *J. Biosci. Bioeng.* 105: 622-627.

Fondo de Estabilización de Precios del Azúcar, FEPA (2016). Balance del sector azucarero colombiano 2000 – 2016.

García (2015). Un viaje cafetero en el suroeste de Antioquia. *El Tiempo*. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/viajar/turismo-por-la-titiribi-y-fredonia-zona-cafetera/16421440>

Gurram, R., Al-Shannag, M., Knapp, S., Das, T., Singaas, E., & Alkasrawi, M. (2015). Technical possibilities of bioethanol production from coffee pulp: A renewable feedstock. *Clean Technologies and Environmental Policy*, doi:10.1007/s10098-015-1015-9

Guzmán (2014). Estandarización de producción de bio-etanol a base de mucilago de café en la planta de biocombustibles del tecnoparque Yamboro del SENA Pitalito, Huila. Universidad Nacional Abierta Y A Distancia, UNAD. Disponible en: <http://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/3583/3/83258559.pdf>

Hillier & Lieberman (2006). *Investigación Operativa*. Octava Edición. Editorial Mac Graw Hill.

J. B. MacQueen (1967): "Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations, *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*", Berkeley, University of California Press, 1:281-297

Leão, R. R. D. C. C., Hamacher, S., & Oliveira, F. (2011). Optimization of biodiesel supply chains based on small farmers: A case study in Brazil. *Bioresource Technology*, 102(19), 8958-8963. Recuperado en www.scopus.com

Leduc, S., Natarajan, K., Dotzauer, E., McCallum, I., & Obersteiner, M. (2009). Optimizing biodiesel production in India. *Applied Energy*, 86(SUPPL. 1), S125-S131. Recuperado en www.scopus.com

Li, Q., & Hu, G. (2014). Supply chain design under uncertainty for advanced biofuel production based on bio-oil gasification. *Energy*, 74(C), 576-584. Recuperado en www.scopus.com

Li, Y., Brown, T., & Hu, G. (2014). Optimization model for a thermochemical biofuels supply network design. *Journal of Energy Engineering*, 140(4) Recuperado en www.scopus.com

Lin, T., Rodríguez, L. F., Shastri, Y. N., Hansen, A. C., & Ting, K. C. (2014). Integrated strategic and tactical biomass-biofuel supply chain optimization. *Bioresource Technology*, 156, 256-266. Recuperado en www.scopus.com

Liu, Z., Qiu, T., & Chen, B. (2014). A LCA based biofuel supply chain analysis framework. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 22(6), 669-681. Recuperado en www.scopus.com

Liu, Z., Qiu, T., & Chen, B. (2014). A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with multi-conversion paths in china. *Applied Energy*, 126, 221-234. Recuperado en www.scopus.com

Loera y Olgún, 2010. Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, Vol 1 pág. 91-116.

MacQueen, J (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Statistics*, 281--297, University of California Press, Berkeley, Calif., 1967. <http://projecteuclid.org/euclid.bsm/1200512992>.

Martínez R., Yessica M. (2014). Selección de hongos filamentosos con potencial para la degradación de lignocelulosa aislados de desechos agroindustriales de café e higuera. Recuperado de: <http://200.21.94.179:8080/jspui/bitstream/handle/10839/987/Manuela%20Martinez%20Restrepo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mabert, V. A. & Venkataramanan, M. A. (1998). Special research focus on supply chain linkages: Challenges for design and management in the 21st century. *Decision Sciences*, 29/3, 537–552. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1540-5915.1998.tb01353.x>

Marvin, W. A., Schmidt, L. D., & Daoutidis, P. (2013). Biorefinery location and technology selection through supply chain optimization. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(9), 3192-3208. Recuperado en www.scopus.com

Ministerio de minas y energía (2012). Listado agentes de la cadena de distribución de combustibles. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180//23517//37131-Resoluci%C3%B3n-40717-26Jul2016.pdf>

Ministerio de minas y energía (2014). Resolución número 9-0153 de 2014. Disponible en: [http://www.suin-juriscol.gov.co/clp/contenidos.dll/Resolucion/4037231?fn=document-frame.htm\\$f=templates\\$3.0](http://www.suin-juriscol.gov.co/clp/contenidos.dll/Resolucion/4037231?fn=document-frame.htm$f=templates$3.0)

Ministerio de minas y energía (2012). Listado agentes de la cadena de distribución de combustibles. Disponible en: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/488465/AGENTES+DE+LA+CADENA+JUNIO+30-2012.pdf/89d639f4-5515-4370-8614-93b6df3d5a87>

Ministerio de Transporte República de Colombia (2008). Manual de criterios de diligenciamiento manifiesto de carga: Resolución 3924 septiembre 17 de 2008.

Murthy, P. S. and Naidu, M. M. 2012. Recovery of phenolic antioxidants and functional compounds from coffee industry by-products. *Food and Bioprocess Technology*, 5: 897–903.

Natarajan, K., Leduc, S., Pelkonen, P., Tomppo, E., & Dotzauer, E. (2012). Optimal locations for methanol and CHP production in eastern finland. *Bioenergy Research*, 5(2), 412-423. Recuperado en www.scopus.com

Natarajan, K., Leduc, S., Pelkonen, P., Tomppo, E., & Dotzauer, E. (2014). Optimal locations for second generation fischer tropesch biodiesel production in finland. *Renewable Energy*, 62, 319-330. Recuperado en www.scopus.com

Navarro, Castillo & López (2013). Validación del mucílago de café para la producción de etanol y abono orgánico. *Revista El Higo*, Vol. 3, núm. 1 (2013): 10-13. Disponible en: <http://revistas.uni.edu.ni/index.php/Higo/article/view/73>

Nixon, J. D., Dey, P. K., Davies, P. A., Sagi, S., & Berry, R. F. (2014). Supply chain optimisation of pyrolysis plant deployment using goal programming. *Energy*, 68, 262-271. Recuperado en www.scopus.com

Osmani, A., & Zhang, J. (2014). Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment. *Applied Energy*, 114, 572-587. Recuperado en www.scopus.com

Osmani, A., & Zhang, J. (2013). Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties. *Energy*, 59, 157-172. Recuperado en www.scopus.com

Pandey A, Soccol CR, Nigam P, marca D, Mohan R, Roussos S (2000) el potencial biotecnológico de la pulpa de café y cáscara de café para bioprocesos. *BiochemEng J* 6: 153-162. doi: 10. 1016 / S1369-703X (00) 00084-X.

Parker, N., Tittmann, P., Hart, Q., Nelson, R., Skog, K., Schmidt, A., . . . Jenkins, B. (2010). Development of a biorefinery optimized biofuel supply curve for the western united states. *Biomass and Bioenergy*, 34(11), 1597-1607. Recuperado en www.scopus.com

Parawda (2004). *Métodos y modelos de investigación de operaciones*. México: Editorial Limusa, p. 20.

Restrepo, J. (2010). Caracterización física y química de los frutos del café. Recuperado el 17 de 04 de 2012, de <http://www.cedeco.or.cr/documentos/Caracterizacion%20del%20cafe.pdf>

Rocha, M. V. P., de Matos, L. J. B. L., Lima, L. P., P. M. D. S., Lucena, I., Fernandes, F. A., & Goncalves, L. R., (2014). Ultrasound-assisted production of biodiesel and etanol from spent coffee grunds. *Bioresource Technology*, 167, 343 – 348. doi: 10.1016/j.biortech.2014.06.032

Rodríguez, N. (2007). Balance energético en la producción de etanol a partir de la pulpa y el mucílago de café y poder calorífico de los subproductos del proceso del cultivo de café. *Chinchiná, Colombia: Cenicafé*.

Rodríguez, 2009. Producción de etanol a partir de los subproductos del café. Centro Nacional de Investigaciones del café. Recuperado en http://www.olade.org/wp-content/uploads/2015/11/S4-B2009-Nelson_Rodriguez-Colombia.pdf

Rodríguez & Zambrano (2010). Los subproductos de café: fuente de energía renovable. *Cenicafe*. Disponible en: <http://www.cenicafe.org/es/publications/avt0393.pdf>

Rodríguez & Zambrano (2014). Producción de alcohol a partir del mucílago de café. *Revista Cenicafé* 62 (1): 56-69. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10778/496>

Salazar, A. N., Acuña, R. S., & de Salcedo, M. G. (2008). The use of coffee pulp in animal feeding. [Utilización de la pulpa de café en la alimentación animal] *Zootecnia Tropical*, 26(4). Disponible en: www.scopus.com

Sarmiento L, Rafael, Castellanos, Paola (2008). La Eficiencia Económica: una aproximación teórica. Cuadernos Latinoamericanos de Administración - Vol. IV. Recuperado de http://www.uelbosque.edu.co/sites/default/files/publicaciones/revistas/cuadernos_latinamericanos_administracion/volumenIV_numero7_2008/eficiencia_economica.pdf

Serna, Fabiola, Barrera, Luis, & Montiel, Héctor. (2011). Impacto Social y Económico en el uso de Biocombustibles. *Journal of technology management & innovation*, 6(1), 100-114. Recuperado en 02 de julio de 2015, de http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-27242011000100009&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0718-27242011000100009.

Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. (2011). Biocombustibles. Recuperado de: <https://www.sadm.gob.mx/PortalSadm/jsp/prensa.jsp?id=313>

Soto, José A (2006). Simulación – fundamentos teóricos de Simulación. Colombia.

Sukumara, S., Faulkner, W., Amundson, J., Badurdeen, F., & Seay, J. (2014). A multidisciplinary decision support tool for evaluating multiple biorefinery conversion technologies and supply chain performance. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(6), 1027-1044. Recuperado en www.scopus.com

Triana, C. F., Quintero, J.A., Agudelo, R. A., Cardona, C.A., & Higueta, J. C. (2011). Analysis of coffee cut-stems (CCS) as raw material for fuel ethanol production. *Energy*, 36(7), 4182-4190. doi: 10.1016/j.energy.2011.04.025

Twenergy. (2012). Consecuencias del efecto invernadero. Recuperado de: <http://twenergy.com/a/consecuencias-del-efecto-invernadero-609>

Xie, F., Huang, Y., & Eksioglu, S. (2014). Integrating multimodal transport into cellulosic biofuel supply chain design under feedstock seasonality with a case study based on california. *Bioresource Technology*, 152, 15-23. Recuperado en www.scopus.com

Yeh, K., Whittaker, C., Realff, M. J., & Lee, J. H. (2015). Two stage stochastic bilevel programming model of a pre-established timberlands supply chain with biorefinery investment interests. *Computers and Chemical Engineering*, 73, 141-153. Recuperado en www.scopus.com

You, F., Tao, L., Graziano, D. J., & Snyder, S. W. (2012). Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE Journal*, 58(4), 1157-1180. Recuperado en www.scopus.com

Yue, D., & You, F. (2014). Game-theoretic modeling and optimization of multi-echelon supply chain design and operation under stackelberg game and market equilibrium. *Computers and Chemical Engineering*, 71, 347-361. Recuperado en www.scopus.com

Zamboni, A., Shah, N., & Bezzo, F. (2009). Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 2. multi-objective environmental optimization. *Energy and Fuels*, 23(10), 5134-5143. Recuperado en www.scopus.com

Zamboni, A., Shah, N., & Bezzo, F. (2009). Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 1. cost minimization. *Energy and Fuels*, 23(10), 5121-5133. Recuperado en www.scopus.com

Zanjirani & Hekmatfan (2009). Facility Location: concepts, models, algorithms and case studies. Springer Science & Business Media.

Zapiain, A. Los límites del Crecimiento. Club de Roma. 2003.

Zhang, L., & Hu, G. (2013). Supply chain design and operational planning models for biomass to drop-in fuel production. Biomass and Bioenergy, 58, 238-250. Recuperado en www.scopus.com

Zhang, J., Osmani, A., Awudu, I., & Gonela, V. (2013). An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain. Applied Energy, 102, 1205-1217. Recuperado en www.scopus.com

Zhang, F., Johnson, D. M., & Johnson, M. A. (2012). Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production. Renewable Energy, 44, 380-391. Recuperado en www.scopus.com

Zhu, X., & Yao, Q. (2011). Logistics system design for biomass-to-bioenergy industry with multiple types of feedstocks. Bioresource Technology, 102(23), 10936-10945. Recuperado en www.scopus.com

Zurita-Milla, Raul & Huisman, Otto. (2011). Location allocation problema using genetic algorithm and simulated annealing: a case study based o schoolin Enschede. Recuperado en 01 de julio de 2015, de http://www.itc.nl/library/papers_2011/msc/gfm/arifin.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Artículos relacionados

N°	TÍTULO	AUTORES	AÑO
1	Two stage stochastic bilevel programming model of a pre-established timberlands supply chain with biorefinery investment interests	Yeh, Kevin Whittaker, Craig Realff, Matthew J. Lee, Jayhyung	2015
2	A network design model for biomass to energy supply chains with anaerobic digestion systems	Balaman, Şebnem Yilmaz Selim, Hasan	2014
3	Game-theoretic modeling and optimization of multi-echelon supply chain design and operation under Stackelberg game and market equilibrium	Yue, Dajun You, Fengqi	2014
4	A study of the LCA based biofuel supply chain multi-objective optimization model with multi-conversion paths in China	Zhexuan Liu Tong Qiu Bingzhen Chen	2014
5	A facility-location model for biofuel plants: Applications in the Colombian context	Duarte, Alexandra Eugenia Sarache, William Ariel Costa, Yasel J.	2014
6	Supply chain optimisation of pyrolysis plant deployment using goal programming	Nixon, Jonathan Dey, Prasanta Kumar Davies, Philip Sagi, Sudhakar Berry, Robert F.	2014
7	Integrated strategic and tactical biomass-biofuel supply chain optimization	Lin, Tao Rodríguez, Luis F. Shastri, Yogendra N. Hansen, Alan C. Ting, K. C.	2014
8	Economic and environmental optimization of a large scale sustainable dual feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain in a stochastic environment	Osmani, Atif Zhang, Jun	2014
9	A LCA based biofuel supply chain analysis framework	Zhexuan Liu Tong Qiu Bingzhen Chen	2014
10	Integrating multimodal transport into cellulosic biofuel supply chain design under feedstock seasonality with a case study based on California	Xie, Fei Huang, Yongxi Ekşioğlu, Sandra Duni	2014

Anexo 1. (Continuación)

N°	TÍTULO	AUTORES	AÑO
11	Supply chain design under uncertainty for advanced biofuel production based on bio-oil gasification	Li, Qi Hu, Guiping	2014
12	A stochastic programming approach towards optimization of biofuel supply chain	Azadeh, Ali H. Vafa Arani, Hamed Dashti, Hossein	2014
13	A multidisciplinary decision support tool for evaluating multiple biorefinery conversion technologies and supply chain performance	Sukumara, Sumesh Faulkner, William Brock Amundson, Joseph S. Badurdeen, Fazleena Fazleena Seay, Jeffrey R.	2014
14	Optimization model for a thermochemical biofuels supply network design	Hu, Guiping Li, Yihua Brown, Tristan R.	2014
15	Optimal locations for second generation Fischer Tropsch biodiesel production in Finland	Natarajan, Karthikeyan Leduc, Sylvain Pelkonen, Paavo Tomppo, Erkki O. Dotzauer, Erik	2014
16	Supply chain design and operational planning models for biomass to drop-in fuel production	Hu, Guiping Zhang, Leilei	2013
17	Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties	Osmani, Atif Zhang, Jun	2013
18	Process design and supply chain optimization of supercritical biodiesel synthesis from waste cooking oils	Kelloway, Adam Marvin, W. Alex Schmidt, Lanny D. Daoutidis, Prodromos	2013
19	Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives	EI-Halwagi, Ali M. Rosas, Camilo Ponce-Ortega, José María Jiménez-Gutiérrez, Arturo Mannan, Mahboobul Sam EI-Halwagi, Mahmoud M.	2013
20	Integrated Planning of Supply Chain Networks and Multimodal Transportation Infrastructure Expansion: Model Development and Application to the Biofuel Industry	Hajibabai, Leila Ouyang, Yanfeng	2013

Anexo 1. (Continuación)

N°	TÍTULO	AUTORES	AÑO
21	Supply chain designs and management for biocrude production via wastewater treatment	Ekşioğlu, Sandra Duni Palak, Gökçe Mondala, Andro H. Greenwood, Allen G.	2013
22	Biorefinery location and technology selection through supply chain optimization	Marvin, W. Alex Schmidt, Lanny D. Daoutidis, Prodromos	2013
23	An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain	Osmani, Atif Zhang, Jun Awudu, Iddrisu Gonela, Vinay	2013
24	Biofuel supply chain design under competitive agricultural land use and feedstock market equilibrium	Bai, Yun Ouyang, Yanfeng Pang, Jongshi	2012
25	Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production	Zhang, Fengli Johnson, Dana Michael Johnson, Mark A.	2012
26	Optimal Locations for Methanol and CHP Production in Eastern Finland	Natarajan, Karthikeyan Leduc, Sylvain Pelkonen, Paavo Tomppo, Erkki O. Dotzauer, Erik	2012
27	Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis	You, Fengqi Tao, Ling Graziano, Diane J. Snyder, Seth W.	2012
28	Logistics system design for biomass-to-bioenergy industry with multiple types of feedstocks	Zhu, Xiaoyan Yao, Qingzhu	2011
29	Optimization of biodiesel supply chains based on small farmers: A case study in Brazil	Leão, Raphael Riemke de Campos Cesar Hamacher, Sílvio Oliveira, Fabrício G.	2011
30	Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty	Kim, Jinkyung Realff, Matthew J. Lee, Jayhyung	2011

31	Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries	Giarola, Sara Zamboni, Andrea Bezzo, Fabrizio	2011
----	---	---	------

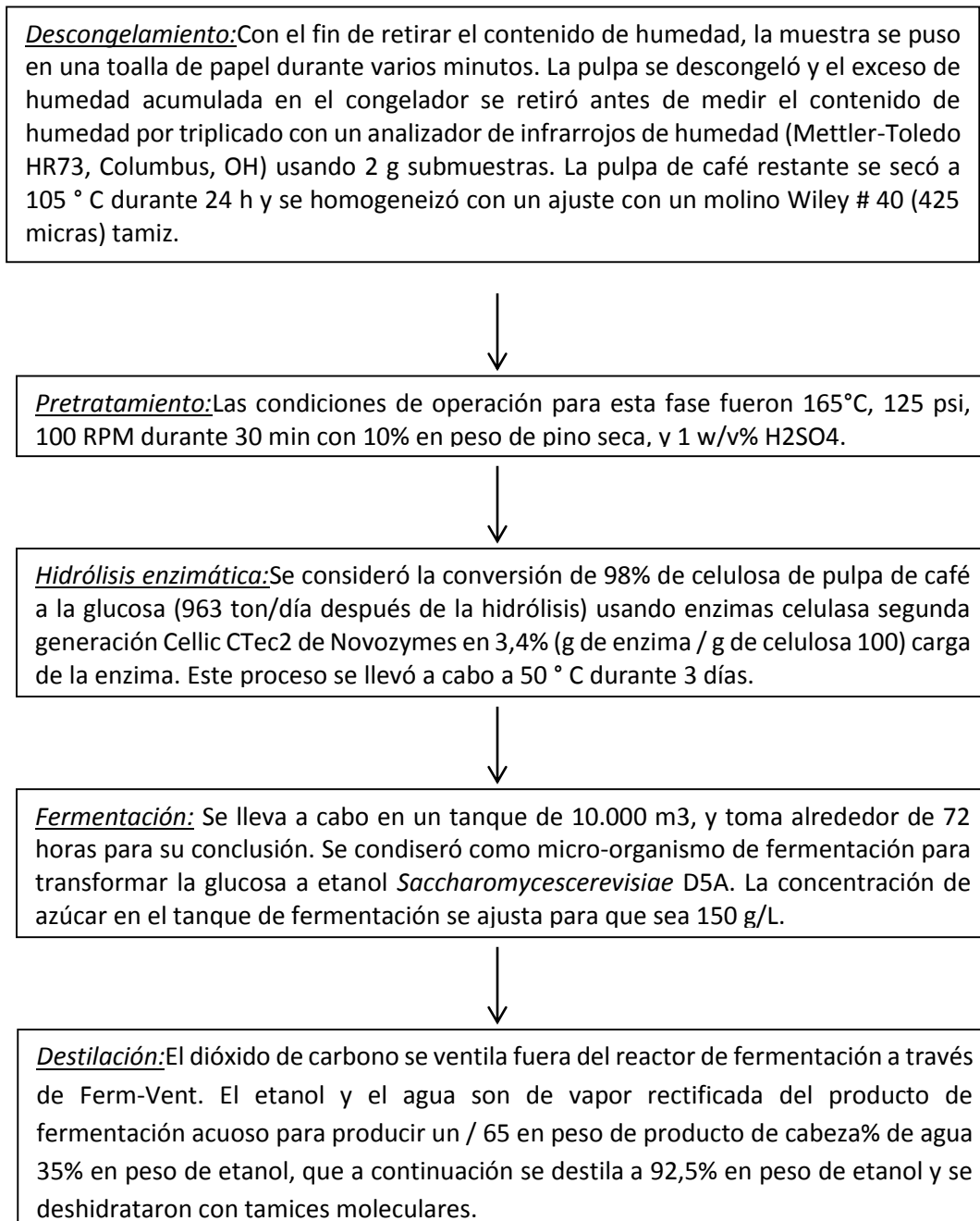
Anexo 1. (Continuación)

N°	TÍTULO	AUTORES	AÑO
32	A mathematical model to design a lignocellulosic biofuel supply chain system with a case study based on a region in Central Texas	An, Heungjo Wilhelm, Wilbert E. Searcy, Stephen W.	2011
33	Optimization-based approaches for bioethanol supply chains	Akgul, Ozlem Zamboni, Andrea Bezzo, Fabrizio Shah, Nilay Papageorgiou, Lazaros G.	2011
34	Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty	Dal Mas, Matteo Giarola, Sara Zamboni, Andrea Bezzo, Fabrizio	2011
35	Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model	Kim, Jinkyung Realf, Matthew J. Lee, Jayhyung Whittaker, Craig Furtner, Ludwig	2011
36	Biofuel refinery location and supply chain planning under traffic congestion	Bai, Yun Hwang, Taesung Kang, Seungmo Ouyang, Yanfeng	2011
37	Development of a biorefinery optimized biofuel supply curve for the Western United States	Parker, Nathan C.; Tittmann, Peter W.; Hart, Quinn J.; Nelson, Richard G.; Skog, Kenneth E.; Schmidt, Anneliese M.; Gray, Edward K.; Jenkins, Bryan M.	2010
38	Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain	Ekşioğlu, Sandra Duni Acharya, Ambarish M. Leightley, Liam E. Arora, Sumesh	2009
39	Optimizing biodiesel production in India	Leduc, Sylvain Natarajan, Karthikeyan Dotzauer, Erik McCallum, Ian Obersteiner, Michael H.	2009

40	Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 2. multi-objective environmental optimization	Zamboni, Andrea Shah, Nilay Bezzo, Fabrizio	2009
41	Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 1. cost minimization	Zamboni, Andrea Bezzo, Fabrizio Shah, Nilay	2009

Anexo 2. Descripción de procesos de producción de etanol a partir de subproductos y residuos de café

Descripción del proceso de producción de etanol a partir de la pulpa de café



Descripción del proceso de destilación para la obtención de etanol a partir de mucílago

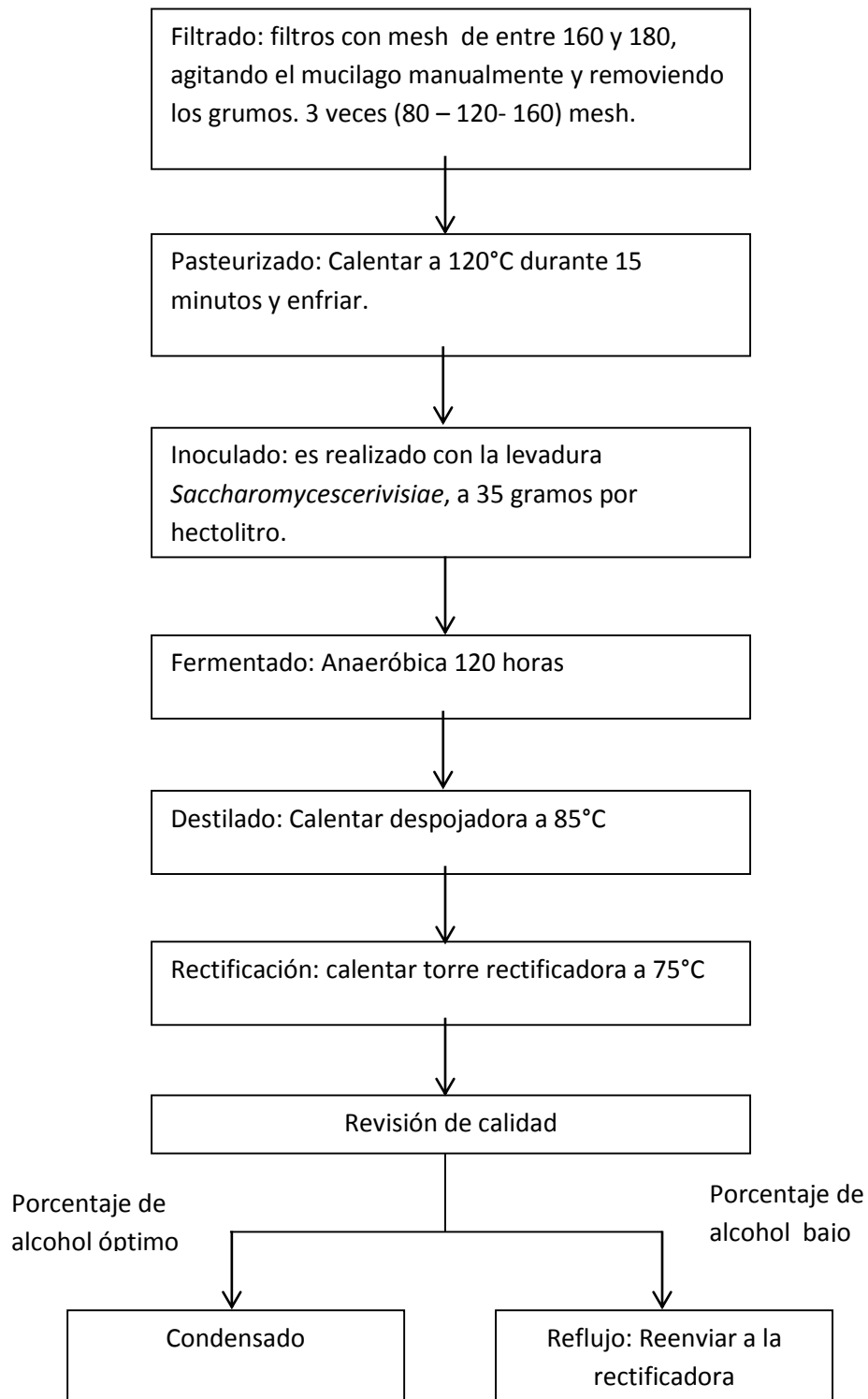


Diagrama de flujo del proceso de producción experimental de etanol

