

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial

Departamento de Ingeniería Industrial



**Tesis presentada en opción al Título de Master en  
Ingeniería Industrial**

Optimización de decisiones logísticas en Cadenas de  
Suministro de biomasa cañera para cogeneración de  
energía en Cuba

**Autor: Ing. Frank Cecilio Piedra Jimenez**

**Tutor: Dr.C. Roberto Cespón Castro**

Santa Clara, Cuba

2017

"Año 59 de la Revolución"



Hago constar que la presente tesis en opción al título de Master en Ingeniería Industrial fue realizada en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, autorizando a que sea utilizada por la Institución, para los fines que estime conveniente, de forma parcial o total y no podrá ser presentada en eventos, ni publicados sus resultados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que la presente tesis ha sido realizada según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Tutor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## DEDICATORIA

---

---

*A mi madre y a mi padre*

## **AGRADECIMIENTO**

---

---

Primero, a mi tutor Dr.C. Roberto Cespón Castro por su asesoramiento y apoyo incondicional

A mis compañeros de trabajo y profesores de la maestría pertenecientes al  
Departamento de Ingeniería Industrial de la UCLV.

Al Dr.C. Michael Feitó Cespón y Dr.C. René Abreu Ledón por su colaboración.

A los profesores del CEETA, en especial al Dr.C. Ángel Rubio-González y Dr.C. Manuel A.  
Rubio Rodríguez

La presente tesis de maestría constituye la primera de dos etapas de investigación definidas para dar solución a la situación problemática descrita. Es por ello, que en esta investigación se presenta un modelo matemático para optimizar decisiones estratégicas y tácticas en cadenas de suministro (CS) de biomasa cañera para cogeneración de energía eléctrica en Cuba. El modelo matemático propuesto integra objetivos económicos, soporte varias decisiones tácticas y estratégicas como localización, asignación, capacidad y tecnología de instalaciones, así como diseño del flujo material y asignación de transporte.

Las características del problema permiten modelarlo utilizando programación lineal entera mixta (MILP). La factibilidad del modelo propuesto fue probada mediante su aplicación parcial en un caso estudio donde se examina la CS de biomasa cañera para cogeneración en la región de Villa Clara. El resultado de la aplicación parcial del modelo permitió obtener la asignación de centrales tributarios a bioeléctricas, así como la asignación de medios de transporte entre nodos y el flujo óptimo entre instalaciones obteniéndose como resultado óptimo un costo total equivalente a 1.815 MMUSD/año. La propuesta, como modelo determinista, no considera la variabilidad relacionada con ciertos parámetros que pueden ser un obstáculo importante. Sin embargo, un análisis de la sensibilidad de los factores que influyen debe dar una idea de los cambios inducidos en la CS, el análisis de sensibilidad en este trabajo investiga la influencia de la incertidumbre en la producción de biomasa. Como resultado solo en el escenario B varía la asignación realizada respecto al escenario base. Además, se pudo comprobar que solo en el escenario B existe demanda insatisfecha de biomasa para generar electricidad fuera de zafra y el costo de transporte es en todos los escenarios el que mayor impacto tiene en los costos totales de la CS.

The present master's thesis constitutes the first of two stages of investigation defined to give solution to the problematic situation described. For this reason, this research presents a mathematical model to optimize strategic and tactical decisions in supply chains of sugarcane biomass for cogeneration of electricity in Cuba, taking as a case study the Sugar Mill Company of Villa Clara. The proposed mathematical model integrates economic objectives, supports several tactical and strategic decisions such as location, allocation, capacity and facilities technology, as well as material flow design and transport allocation.

The characteristics of the problem allow modeling using Mixed Integer Linear Programming (MILP). The feasibility of the proposed model was tested through its partial application in a case study where the CS of biomass cane for cogeneration in the Villa Clara region is examined. The result of the partial application of the model allowed obtaining the assignment of tributary power plants to bioelectric plants, as well as the allocation of means of transport between nodes and the optimum flow between facilities, obtaining as an optimal result a total cost equivalent to 1,815 MMUSD / year. The proposal, as a deterministic model, does not consider the variability related to certain parameters that can be a major obstacle. However, an analysis of the sensitivity of the influencing factors should give an idea of the changes induced in the CS, the sensitivity analysis in this work investigates the influence of uncertainty in the production of biomass. As a result, only in scenario B does the assignment made vary with respect to the base scenario. In addition, it was found that only in scenario B there is an unsatisfied demand for biomass to generate electricity outside of harvest and the cost of transport is in all scenarios that has the greatest impact on the total costs of the

## INDICE

<b>Introducció</b>	1
<b>Capítulo 1.</b> Diseño y Modelado de cadenas de suministro de biomasa con fines energeticos	7
1.1. Métodos de conversión de biomasa	7
1.1.1. La generación de electricidad y calor a partir de biomasa	9
1.2. Contexto general sobre el diseño de cadenas de suministro	10
1.3. El diseño de cadenas de suministro de biomasa	13
1.3.1. Tendencias en el modelado de cadenas de suministro de biomasa	13
1.3.2. Características y estructura de las cadenas de suministro de biomasa	15
1.3.3. Niveles de decisión en CS de biomasa	19
1.3.4. Modelado de optimización de cadenas de suministro de biomasa	20
1.4. La generación de electricidad a partir de biomasa: el caso de Cuba	24
1.5. Conclusiones parciales	27
<b>Capítulo 2.</b> Modelo matematico para optimizar decisiones estrategicas y tacticas en cs de biomasa cañera para cogeneración	28
2.1. Descripción del problema	28
2.2. Formulación del modelo matemático	30
2.2.1. Restricciones del modelo	31
2.2.2. Función objetivo	35
2.3. Caso de estudio	36
2.4. Análisis de resultados	46
2.5. Conclusiones parciales	46
<b>Coclusiones Generales</b>	50
<b>Recomendaciones</b>	51
<b>Referencias</b>	52
Anexo 1. Conjuntos, parámetros y variables de decisión del modelo matemático	
Anexo 2. Código GAMS del modelo	
Anexo 3. Resumen de los resultados del modelo	

Cada vez se investiga más el potencial de las fuentes de energías alternativas y renovables para reducir la dependencia de la sociedad de los combustibles fósiles y mitigar el cambio climático (Ghaderi, Pishvae and Moini, 2016). Desde principios de los años setenta, cuando el mundo tuvo su primera crisis de escasez de energía y reconoció una inminente crisis ambiental, el interés por desarrollar nuevas fuentes de energía ha aumentado significativamente (Ba, Prins and Prodhon, 2016). Tanto la industria como las comunidades académicas han buscado la sustitución de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles. La disponibilidad de diversos tipos de recursos de biomasa y la madurez de las tecnologías de conversión la han convertido en una fuente atractiva de energía. Muchas investigaciones documentan el papel actual y potencial de la biomasa en el suministro de energía global.

A pesar del rápido crecimiento del mercado de bioenergía a escala mundial, el desarrollo de este sector en Cuba ha sido lento comparado con otros países. Actualmente la generación de electricidad en Cuba es sumamente dependiente de los combustibles fósiles. La figura 1a muestra la estructura actual y la 1b la estructura futura de la matriz de generación de electricidad en Cuba, donde se aprecia que solo un 4.3 % de la energía se genera a partir de fuentes renovables y más de un 94% a partir de crudo lo que pone de manifiesto una alta vulnerabilidad ante el pronóstico de agotamiento del petróleo.

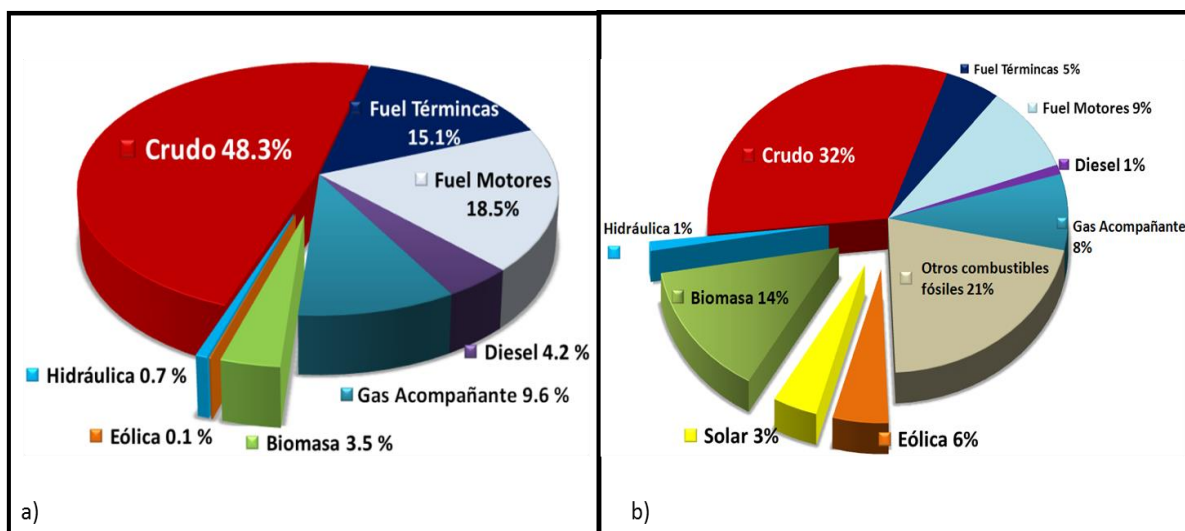


Figura 1. Matriz de generación de electricidad en Cuba. (a) matriz actual. (b) matriz futura. Fuente: (ONEI, 2015)



La biomasa es la fuente con mayores perspectivas a mediano y largo plazo, siendo Cuba un país agrícola con una agroindustria azucarera que genera millones de toneladas de residuos y subproductos de altas potencialidades energéticas. En este sentido la biomasa cañera juega un papel preponderante, pues representa la mayor cantidad de biomasa en relación a otros cultivos.

Desde hace décadas y en particular en la actualidad, tanto en Cuba, como en muchos otros países productores de azúcar a base de caña, la utilización de la biomasa cañera constituye una fuente renovable de energía muy importante para la generación de electricidad y la promoción de un desarrollo sostenible (Rubio González and Roque Díaz, 2006). En particular, en Cuba recientemente se ha aprobado por parte del grupo de biomasa cañera de la Comisión Gubernamental encargada del Desarrollo de las Fuentes Renovables de Energía que es presidido por la dirección Energética del grupo empresarial AZCUBA, un programa para el incremento de la generación con biomasa cañera, que tuvo como horizonte temporal el año 2030 y actualmente se valora para el 2024. La figura 1b muestra la proyección estratégica de la generación de electricidad en Cuba, para el 2030, se considera que las fuentes renovables de energía alcanzarán el 24 % del total y la biomasa representará el 14 % del total, por lo que ella representará el 58 % de la electricidad obtenida con fuentes renovables.

Este proceso de generación de electricidad con biomasa se centrará, casi totalmente, en la industria azucarera, serán solo excepción algunas pequeñas instalaciones de generación con biomasa, mediante gasificación, para el abasto de poblados aislados. Las inversiones en la industria azucarera para asegurar el crecimiento de la generación de electricidad con biomasa cañera llevarán la potencia instalada de 476 MW a 755 MW. AZCUBA ha planteado una estrategia de desarrollo de 25 centrales azucareros que incrementaran sustancialmente los parámetros de su ciclo termodinámico y su potencial de molienda, convirtiéndolos en lo que se ha dado en llamar bioeléctricas, estas plantas utilizarán biomasa cañera (bagazo y residuos agrícolas de caña de azúcar RAC) propia de su funcionamiento y biomasa cañera almacenada procedente de otros ingenios.

La implementación de tales medidas dentro del proceso de molienda de la caña de azúcar proporcionará suficiente biomasa cañera, ya que la demanda interna de energía térmica de la planta se reducirá drásticamente, lo que implica menos biomasa cañera necesaria para la generación de vapor. Sin embargo, explorar el potencial del bagazo y RAC requiere la disponibilidad de una

cantidad suficiente, además almacenar grandes cantidades de bagazo para uso futuro no es beneficioso para la industria azucarera en términos financieros.

El bagazo tiene una baja densidad aparente (Alonso Pippo, Garzone and Cornacchia, 2007; W. Alonso-Pippo *et al.*, 2009), por lo que requiere un gran volumen de almacenamiento, que es muy costoso. Además, la acumulación de bagazo y otros residuos de caña de azúcar representa una amenaza ambiental para los ingenios azucareros y sus alrededores, ya que el bagazo es auto combustible y puede arder espontáneamente si se acumula durante períodos más largos. Por otro lado, el rendimiento RAC por tonelada de caña de azúcar molida se ha estudiado en Cuba, para caña cosechada con máquinas y caña cosechada manualmente (ICIDCA, 2000). En ambos casos, RAC es alrededor del 35% del peso de la caña molida. Alrededor del 50% de esta cantidad se pierde en el campo y durante el transporte, dejando un 17-23% para ser entregado al molino y aplastado con tallos de caña (Alonso-Pippo *et al.*, 2008).

La cadena de suministro (CS) de biomasa cañera para la cogeneración de energía en Cuba, consiste en una compleja red logística compuesta por las fuentes de suministro de biomasa e ingenios azucareros distribuidas por toda la geografía cubana. Esta cadena concibe la asignación de diferentes tareas estratégicas a la red de centrales existente. Primero las *bioeléctricas* que es un ingenio tradicional integrado fundamentalmente por la sala de calderas para la generación de vapor y la planta eléctrica para la generación de electricidad, estas plantas utilizan biomasa cañera propia de su funcionamiento y biomasa cañera de otros ingenios. Segundo, los *tributarios* que son ingenios tradicionales que aportarán biomasa cañera excedente a los proyectos de bioeléctricas, mediante la venta de su biomasa sobrante. En estos estudios se le ha definido diferentes funciones estratégicas (capacidad, tecnología, así como la organización del flujo material) a toda la amplia red de centrales localizados en todo el país, teniendo en cuenta aspectos puramente técnicos y proyecciones de cosecha y rendimiento cañero. Sin embargo, actividades importantes en CS de este tipo, como preprocesamiento, almacenamiento y transporte de biomasa no fueron tenidos en cuenta.

Alineado a lo anterior, la revisión del estado del arte que sustentan el desarrollo de la presente tesis de maestría, revela que el problema de diseño de las CS de biomasa ha sido enfocado desde muy diferentes aristas, predominando el uso de la Investigación de Operaciones a través de la aplicación de modelos de optimización de diversa naturaleza, lo que demuestra las peculiaridades de cada CS que se desea diseñar y de los objetivos que se persiguen con el diseño. En los últimos años, los

modelos de la CS de biomasa se han convertido en herramientas efectivas para explorar las interacciones complejas entre la producción de cultivos, la cosecha, el almacenamiento, el transporte, el preprocesamiento y la distribución final. Por ejemplo, en los Estados Unidos, se han desarrollado dos herramientas de modelado para respaldar muchos de estos desafíos. El modelo de IBSAL (*Integrated Bio-mass Supply Analysis and Logistics*) simula los movimientos de la biomasa desde la recolección hasta la entrega al reactor de conversión para comparar los costos y el uso de energía de varios escenarios de la cadena de suministro. Infraestructura de biocombustibles, logística y transporte (BILT), es un modelo de optimización que analiza las opciones de ubicación de las instalaciones, las rutas de transporte y los costos de procesamiento de campo a consumidor para minimizar el costo total.

El mejoramiento de las cadenas de productivas es un asunto que reviste interés para el gobierno cubano y el aparato empresarial. La política económica actual de Cuba, planteada en los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución,<sup>1</sup> ofrece un marco importante para el desarrollo de la presente investigación. El lineamiento 136 plantea la necesidad de impulsar la gestión integrada de toda la cadena productiva en la actividad agroindustrial y en el lineamiento 246 se plantea que se debe fomentar la cogeneración y trigeneración en todas las actividades con posibilidades, en particular, se elevará la generación de electricidad por la agroindustria azucarera a partir del aprovechamiento del bagazo y residuos agrícolas cañeros y forestales.

Todo lo descrito anteriormente crea obstáculos únicos que son diferentes de las CS tradicionales. Por lo tanto, mejorar la CS de biomasa es un elemento crítico para demostrar que la generación de energía a partir de la biomasa cañera en Cuba es técnica y económicamente viable. Los aspectos anteriormente abordados constituyen la **situación problemática** a la que se enfrenta la presente investigación y se resumen en: i) en Cuba se proyecta diversificar la matriz energética potenciando el uso de energías renovables, en este sentido el bagazo y RAZ representan por un amplio margen la mayor fuente de energía renovable en Cuba. Varios estudios han demostrado el potencial de la industria cubana de la caña de azúcar como proveedor de electricidad. Sin embargo, ningún investigador ha estudiado la optimización de la CS de biomasa cañera para calcular la oportunidad del sector empresarial. ii) el diseño y optimización sistemática de toda la CS de biomasa cañera

---

<sup>1</sup> PCC. (2011). *Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución*: Partido Comunista de Cuba.

para cogeneración requiere el empleo de herramientas avanzadas que demuestren la viabilidad del proyecto iii) para enfocar la solución a esta problemática es perceptible la preferencia por el empleo de las herramientas de la Investigación de Operaciones, sin embargo, los modelos encontrados en la literatura abordan solo aspectos parciales del problema presentado en el objeto de estudio.

Para dar solución a la situación problemática expuesta anteriormente, se han previstos dos etapas de investigación. Una primera etapa correspondiente a la tesis de maestría donde: i) se diseñará el modelo matemático que soporte el diseño de la CS de biomasa cañera para cogeneración; ii) realizar una aplicación parcial del modelo propuesto que permita evaluar la factibilidad de la capacidad de suministro de biomasa a las bioeléctricas de la variante de diseño aprobada por AZCUBA PARA Villa Clara. Una segunda etapa que será sustento de una investigación doctoral donde se diseñen un conjunto de herramientas de apoyo a la decisión para diseñar y evaluar la CS sostenible de biomasa cañera para cogeneración, utilizando técnicas avanzadas de modelación matemático.

Derivado de la situación problemática se define como **problema científico** de la presente tesis de maestría:

*La necesidad de encontrar variantes de asignación de centrales tributarios a bioeléctricas tomando como base el criterio de optimización de costo total de manera que soporte decisiones tácticas de organización del transporte y los flujos materiales presentes en el diseño de la CS de biomasa cañera para cogeneración en Cuba.*

Para resolver el problema científico planteado se traza la siguiente **hipótesis** de la investigación: El desarrollo de un modelo matemático para el diseño de la CS de biomasa cañera para cogeneración, que contemple el uso de múltiples tipos de biomasa y su aplicación parcial tomando como criterio de optimización el costo de transporte; permite realizar la asignación (tributario a bioeléctrica o) en un contexto de CS, que soporte decisiones tácticas de organización del transporte y flujo material en el contexto cubano.

La hipótesis de la investigación quedará demostrada si: i) se logra obtener un modelo matemático para el diseño de la CS de biomasa cañera para cogeneración, que considere decisiones estratégicas y tácticas, ii) se aplica parcialmente el modelo al caso de estudio CS de biomasa cañera para cogeneración en la en la región de Villa Clara, considerando: solo el empleo del bagazo, aunque en la proporción adecuada respecto al RAC y tienen en cuenta costo de transportación de bagazo

de tributarios a bioeléctricas, costo de operación y mantenimiento de las bioeléctricas y costo por incumplimiento de la demanda de biomasa en el periodo fuera de zafra. Con ello a nivel de la tesis de maestría se llega parcialmente a la toma de decisiones logísticas vinculadas con la asignación de tributarios a bioeléctricas, transporte de bagazo y organización del flujo material, de manera que se minimice el costo de transporte

Para darle solución al problema encontrado se propuso como **objetivo general** de la investigación: *proponer un modelo matemático para la evaluación y selección de alternativas de diseño de CS de biomasa cañera para cogeneración, considerando como criterio de optimización costo de total.*

Para lograrlo se trazan los siguientes **objetivos específicos**:

1. Identificar los aspectos relevantes que deben ser incorporados en un modelo matemático para el diseño CS de biomasa con fines energéticos.
2. Construir un modelo matemático para optimizar decisiones estratégicas y tácticas en CS de biomasa cañera para cogeneración.
3. Demostrar la utilidad del modelo a través de la aplicación parcial del mismo para evaluar decisiones tácticas (asignación de tributarios a bioeléctricas, organización del transporte y los flujos materiales) en la en la provincia de Villa Clara.

Para su presentación, la tesis ha sido estructurada en dos capítulos. En el primer capítulo se resumen los principales hallazgos en la construcción del marco teórico-referencial de la investigación. En el segundo inicialmente se presenta un modelo matemático para la evaluación y selección de alternativas de diseño de CS de biomasa cañera para cogeneración en Cuba y luego como solución al problema científico planteado se realiza una aplicación parcial del modelo propuesto que permite realizar la asignación (tributario a bioeléctrica o) en un contexto de CS. Además, se incluyen un grupo de conclusiones y recomendaciones que resaltan los principales resultados obtenidos en la investigación, así como aquellos aspectos que el autor considera deben ser extendidos como parte de la continuidad científica de la investigación. Finalmente, se expone un grupo de anexos de necesaria inclusión para fundamentar, destacar y facilitar la comprensión de los aspectos de mayor complejidad tratados en el cuerpo del documento

---

## DISEÑO Y MODELADO DE CADENAS DE SUMINISTRO DE BIOMASA CON FINES ENERGETICOS

---

Este capítulo tiene como objetivo identificar los desafíos claves de investigación y oportunidades en el modelado y la optimización de las CS de biomasa para bioenergía. El estudio del estado del arte y la práctica se abordó teniendo en cuenta 4 aspectos fundamentalmente: los métodos de conversión de biomasa con énfasis en la cogeneración; el contexto general sobre los problemas de diseño de CS; el diseño de las CS de biomasa para bioenergía y finalmente se analiza la generación de electricidad a partir de biomasa cañera en Cuba. La figura 1-1 presenta el hilo conductor que se ha empleado para la construcción del marco teórico-referencial, a través del cual se definen las bases conceptuales para abordar la solución del problema de científico planteado.

### 1.1. Métodos de conversión de biomasa

La biomasa es la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales (Saidur *et al.*, 2011). En comparación con los combustibles fósiles, como el gas natural y carbón, que tardan millones de años en formarse, la biomasa es fácil de cultivar, recolectar, utilizar y reemplazar rápidamente sin agotar los recursos naturales.

La biomasa puede convertirse en combustible mediante numerosos procesos. La elección real de un proceso dependerá del tipo y cantidad de materia prima de biomasa disponible, del portador de energía deseado (uso final), de las normas ambientales, de las condiciones económicas y de otros factores.

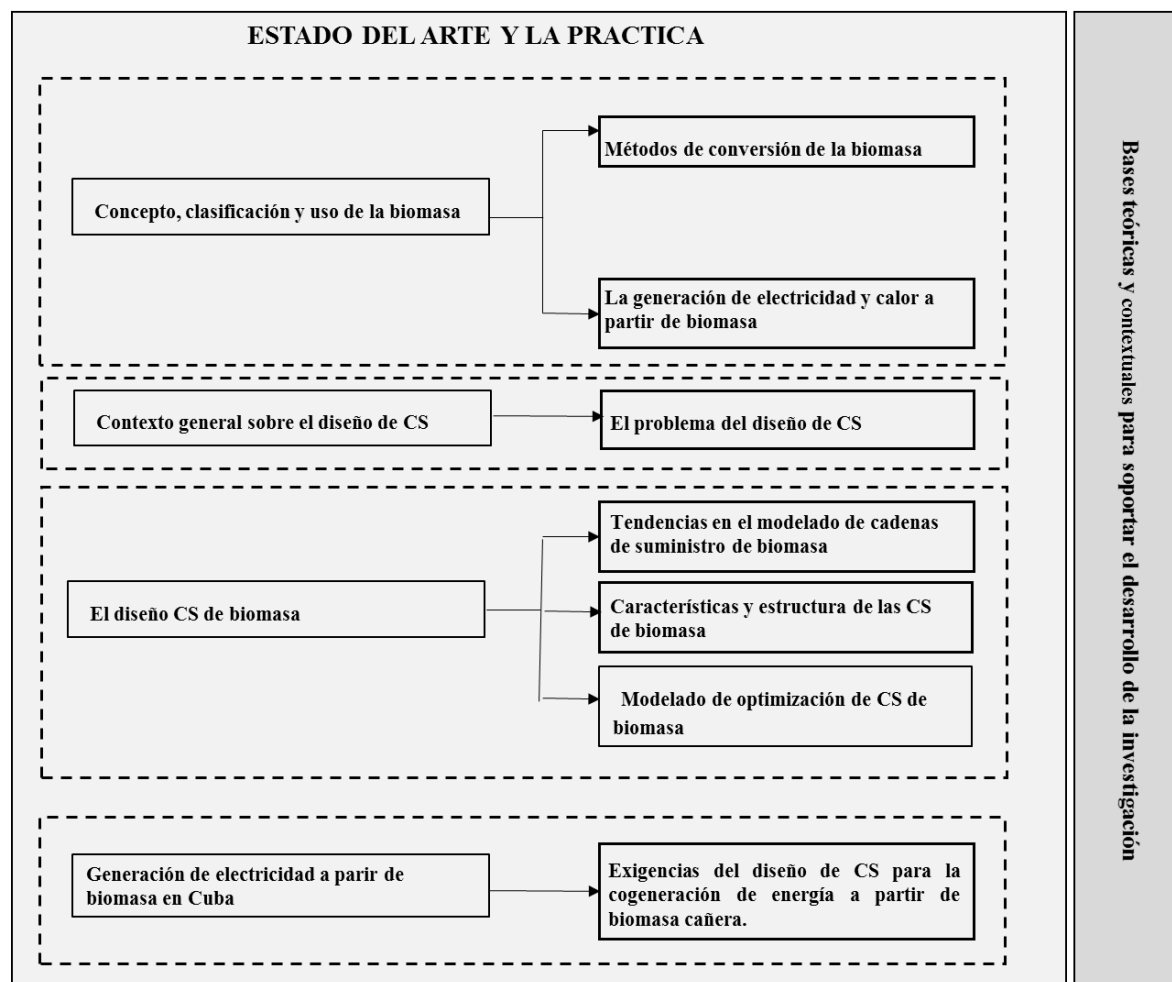


Figura 1-1. Esquema del estudio del marco teórico

Existen varios métodos disponibles para convertir la biomasa en una forma utilizable de energía. El primero entre ellos es la conversión térmica, donde la combustión, gasificación y pirólisis se utilizan para recuperar la energía de la biomasa. La siguiente es la conversión bioquímica en la que los microorganismos durante la fermentación, la digestión anaeróbica y la esterificación liberan energía de la biomasa. La conversión bioquímica se prefiere generalmente para la biomasa con alto contenido de agua. La última es la conversión química donde varias reacciones químicas extraen energía de la biomasa. Otra tecnología está representada por procesos de extracción mecánica, capaces de producir energía en formas de biodiesel. Sin embargo, actualmente el costo del biodiesel comparado con el combustible fósil hace que esta opción de conversión sea fuertemente no competitiva, aunque una atención creciente de las políticas gubernamentales sobre el logro de mejores estándares de calidad del aire puede cambiar rápidamente esta situación.

### 1.1.1. La generación de electricidad y calor a partir de biomasa

El proceso de producción de energía depende de la tecnología de conversión utilizada en la planta de energía (Rentizelas, Tolis and Tatsiopoulos, 2009). La combustión de la biomasa para generar energía es muy usada para alimentar instalaciones de calefacción urbana, plantas de energía y plantas de cogeneración (Shabani, Akhtari and Sowlati, 2013). Los sistemas de vapor son una parte de casi todos los grandes procesos industriales de hoy. Este vapor, a su vez, se utiliza para calentar procesos, para concentrar y destilar líquidos, o se utiliza directamente como materia prima.

En un sistema de calefacción urbana, una planta central genera energía térmica y mediante una red de tuberías distribuye la energía producida en forma de agua caliente o vapor a un grupo de clientes en una comunidad (Gilmour and Warren, 2007). Los intercambiadores de calor instalados en cada edificio extraen el calor del agua y cuando el calor se ha distribuido dentro de la atmósfera interior, una red de tuberías separada devuelve el agua a la planta central para recalentar (Shabani, Akhtari and Sowlati, 2013). En la literatura se cuestiona la eficiencia y rentabilidad de estos sistemas, sin embargo la utilización de la biomasa para la generación de energía térmica tiene beneficios ambientales, sociales y económicos en algunos casos (Nagel, 2000; Chinese and Meneghetti, 2005; Börjesson and Ahlgren, 2010; Difs *et al.*, 2010), como fue el caso en Suecia, un país pionero en la explotación de la biomasa forestal en las plantas de energía (Löfstedt, 1996).

Por otro lado, la biomasa se puede utilizar en plantas de energía para la generación de electricidad. Puede ser quemado a una velocidad constante en una caldera para calentar el agua y producir vapor. A continuación, el vapor se lleva a través del horno usando tubos para elevar su temperatura y la presión aún más. Finalmente, el vapor pasa a través de las múltiples hojas de una turbina, haciendo girar el eje y el eje se activa un generador de electricidad que produce una corriente alterna a utilizar de forma local o para el suministro de la red nacional (Vac and Popita, 2015).

La cogeneración es otra forma de utilizar la biomasa con fines energéticos. La cogeneración es la generación simultánea de energía eléctrica y calor útil a partir de un único proceso de consumo energético primario. Esta tecnología engloba todos los conceptos y tecnologías en las cuales el calor y la potencia eléctrica son conjuntamente generados por una sola unidad y utilizados por el mismo consumidor. Los altos niveles de eficiencia de esta tecnología se deben al empleo de la energía residual como un subproducto de la generación de potencia. La cogeneración es mucho más eficiente que la producción de electricidad y calor por separado, aportando en más de 30% a



la eficiencia del sistema conjunto y reduciendo el consumo de combustible en más de 50% (Difs *et al.*, 2010).

Existen varios sistemas de cogeneración de energía, siendo el sistema de cogeneración basado en el ciclo Rankine, el de una tecnología madura comercial y técnicamente (Dantas *et al.* 2013).

El desarrollo de proyectos de cogeneración con el empleo de la biomasa, en la actualidad, es un fenómeno generalizado en una gran cantidad de países de Europa, Asia y América y emplean las más diversas biomásas. La cogeneración de energía es de un 35% a un 40% más eficiente que los sistemas de generación de energía tradicionales (Gochenour, 2001).

La generación de energía a partir de biomasa es una de las aplicaciones más extendidas de este sector. La manipulación, el transporte, el almacenamiento y las operaciones de pre-procesamiento, tales como el secado para mejorar la calidad de la biomasa, suelen ser necesarios antes de utilizar la biomasa para la producción de energía. Uno de los principales retos en el uso de biocombustibles y bioenergía son los altos costos logísticos generados por la dispersión geográfica, la falta de consolidación de la cadena, la estacionalidad y el manejo de inventarios. De igual modo, la baja densidad de energía de la biomasa y el alto contenido de humedad supone nuevos retos en las tecnologías a desarrollar (Ekşioğlu *et al.*, 2009). En los apartados siguientes se realiza un análisis de la CS de biomasa (BSC).

## **1.2. Contexto general sobre el diseño de cadenas de suministro**

En la literatura especializada es posible encontrar una gran cantidad de aportes relacionados con las decisiones de diseño de cadenas de suministro, muchos de los cuales ofrecen una variedad de algoritmos y métodos de solución con aplicabilidad al estudio de casos reales. El problema de diseño de cadenas de suministro (*SCND*, por sus siglas en inglés) hace referencia a la determinación de la estructura de la red e involucra aspectos tanto estratégicos como tácticos y relaciona varias áreas importantes de la logística (localización, capacidad, flujos y transporte) (Farahani *et al.*, 2014).

El *SCND* tiene sus antecedentes en la ciencia dedicada al problema de localización de instalaciones (*FLP*, por su sigla en inglés), intensa ha sido la producción literaria respecto al tema, desde que a inicios de los años 60 comenzaran las contribuciones al estado del arte. El *FLP* es un tema de alta difusión en la literatura especializada y ha estado ligado a la modelación matemática. A partir de los años 90 y en la actualidad la teoría de *FLP* se ha consolidado como campo de estudio y se han

formulado problemas que consideran aspectos holísticos del diseño de la cadena de suministro tanto de tipo estático como dinámico (M.T. Melo, Nickel and Saldanha-da-Gama, 2009). De igual manera, se puede afirmar que en el presente, el *SCND* se encuentra íntimamente ligado a los *FLP* y al movimiento de flujos de material a través de los diferentes niveles o eslabones que la conforman (Boloori Arabani and Farahani, 2012).

Diferentes autores propusieron completas revisiones de literatura sobre el FLP y han propuesto diversas taxonomías para clasificar los problemas (Owen and Daskin, 1998; Drezner and Hamacher, 2001; ReVelle and Eiselt, 2005; Gan and Smith, 2010)). De igual modo, otras revisiones fueron realizadas por (Farahani, SteadieSeifi and Asgari, 2010) y (Chen, Olhager and Tang, 2014). Al respecto destacan las investigaciones de (M T Melo, Nickel and Saldanha-da-Gama, 2009) que realiza una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con localización de instalaciones en el contexto de la CS.

La administración de la CS (*SCM*, por su siglas en inglés) es el proceso encargado de planear, controlar y operar de manera eficiente los diferentes eslabones, de forma que asegura todos los movimientos del flujo de material a lo largo de la red (Council of supply chain Management, 2007). Por tanto, una configuración y localización adecuada de cada una de las instalaciones al igual que un manejo de inventarios, compras, configuraciones productivas, distribución y enrutamiento se encuentran dentro de las actividades claves para lograr una adecuada gestión (Machuca, 1995). Desde esta perspectiva un FLP se puede considerar como la ubicación y distribución espacial de fábricas, puntos de venta, distribuidores y almacenes, etc. que intervienen dentro del funcionamiento de una cadena de abastecimiento. Lo anterior hace necesario calcular distancias, tiempos y costos que hagan efectiva y eficiente el flujo de materia entre los diferentes puntos de la cadena (M T Melo, Nickel and Saldanha-da-Gama, 2009).

El problema de *SCND*, está considerado como un tema importante dentro de la *SCM* y la logística, que tiene una influencia indispensable en el rendimiento total de la CS. El *SCND* es uno de los problemas de decisión estratégicos más amplios que necesita ser optimizado para un funcionamiento eficiente a largo plazo de toda la cadena de suministro (Eskandarpour *et al.*, 2015). Durante el proceso de *SCND* se determina un conjunto de parámetros de configuración, incluyendo el número, ubicación, capacidad, y el tipo de las diferentes instalaciones de la red (Wang, Lai and Shi, 2011) que son decisiones de carácter estratégico. Sin embargo varios autores como (Farahani *et al.*, 2014) plantean que este problema implica tomar decisiones en los tres

niveles: estratégico, táctico y operativo, siendo la decisión más importante la localización de instalaciones porque es el punto de partida para la creación de los modelos de diseño.

Al respecto (Farahani *et al.*, 2014) definen cinco paradigmas para SCND destacándose entre ellos el diseño de la cadena de suministro sostenible (SSCND). Numerosos autores han propuesto modelos de optimización los cuales han enfrentado el problema desde muy diferentes aristas, (Terouhid, Ries and Fard, 2012) y (Chen, Olhager and Tang, 2014) proponen un marco de trabajo para a clasificación de las características de sostenibilidad, ellos estudian la factores que afectan a las decisiones de localización, pero no analizan los modelos y métodos cuantitativos existentes. Desde la revisión realizada solo los autores (Eskandarpour *et al.*, 2015) realizan un estudio exhaustivo relacionado con SSCND desde una perspectiva de investigación de operaciones, identificando los objetivos ambientales y sociales que han sido considerados, así como los métodos y enfoques de solución más empleados.

La cantidad de publicaciones y trabajos relacionados con modelos cuantitativos para el SCND demuestra la actualidad del tema (Brandenburg *et al.*, 2014; Govindan, Soleimani and Kannan, 2015). Los esfuerzos de integrar la dimensión medioambiental a la económica es todavía un tema vigente y novedoso donde predomina el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Se observaron funciones objetivo que describen el impacto ambiental como consecuencia de sustituir materiales vírgenes por materiales reciclados (Chaabane, Ramudhin and Paquet, 2012; Pishvaei and Razmi, 2012; Pishvaei, Torabi and Razmi, 2012). En ellas se describen los impactos a partir de los flujos de materiales producidos, reciclados o desperdiciados de un tipo u otro, pero no cómo incide en el medioambiente el número de instalaciones que se dedican a estas actividades y su localización.

Desde la presente revisión, se identificaron varios aspectos de interés: i) el uso de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es la técnica más utilizado para integrar el impacto ambiental en los modelos matemáticos de SSCND, siendo el Eco-Indicator 99 y Impact 2002+ los métodos más populares; ii) en cuanto a modelado predominan los modelos lineales multiobjetivos mediante la modelación entera mixta, lo cual es natural por los pilares de la sostenibilidad y la consideración de la incertidumbre en diferentes parámetros que es un aspecto que en los modelos actuales no falta; iii) en general el problema SCND ha sido resuelto tanto por métodos exactos como aproximados, siendo un aspecto muy dinámico y de gran interés para los investigadores por la complejidad del problema; iv) la aplicación de los modelos de SSCND abarca una gran variedad

de áreas y sectores específicos, destacándose los problemas de SSCND de biomasa para bioenergía y el reciclaje.

La cantidad de publicaciones y trabajos relacionados con modelos cuantitativos para el diseño de la CS, demuestra la actualidad y las posibilidades para abarcar el tema desde diferentes aristas. En este sentido, el problema de SCND de biomasa para bioenergía constituye un tema vigente y novedoso de especial interés para la presente investigación, es por ello que en el epígrafe siguiente se realiza un análisis exhaustivo del SCND de biomasa para bioenergía.

### **1.3. El diseño de cadenas de suministro de biomasa**

Para abordar el tema sobre los problemas de diseño de cadenas de suministro de biomasa (*BSC*, por su sigla en inglés), se analiza primero las tendencias y el contexto en las investigaciones sobre modelos de optimización de las BSC, posteriormente se definen las decisiones relativas a las BSC y finalmente se examina el problema del diseño de cadenas de suministro de biomasa con énfasis en la bioenergía, con el fin de determinar las tendencias, aportes y posibles áreas de investigación.

#### **1.3.1. Tendencias en el modelado de cadenas de suministro de biomasa**

Considerando la situación problemática descrita en la introducción de la presente investigación se realizó una búsqueda sistemática de la literatura para el caso particular del diseño de BSC. La estrategia de búsqueda aplicada incluyó los siguientes aspectos:

- Bases de datos: Considerando la temática particular de la investigación, se seleccionó la base de datos SCOPUS como fuente de consulta, por ser la mayor base de dato de literatura científica revisada por expertos en los campos de la ciencia, la tecnología, medicina, ciencias sociales y artes y humanidades.
- Ecuación de búsqueda: Considerando el objetivo de la búsqueda y utilizando diferentes combinaciones posibles, la expresión de búsqueda con mejores resultados fue: (Supply Chains) AND (biomass OR bioenergy) AND (optimization OR mathematical programming).
- Criterios de selección: La búsqueda y selección de artículos en cada caso se filtró teniendo en cuenta los campos Title-abstract-keywords. Dentro de los criterios de selección se descartaron artículos duplicados o que estén por fuera del diseño de BSC. Se descartaron, además, los que tengan que ver con georeferenciación (GIS), por considerarse poco comparables con el objeto de investigación.

Los resultados con relación a la línea tiempo indican que el número de publicaciones ha ido incrementando de manera exponencial en los últimos años (ver Figura 1-2). Los resultados permitieron establecer que las publicaciones aumentaron exponencialmente a partir de los años 2008-2009. Teniendo en cuenta estos aspectos, se refinó la búsqueda en la base de datos SCOPUS, limitando la búsqueda en el periodo 2010-2016. Un total de 210 publicaciones fueron identificadas, cuyos resultados se grafican en la figura 1-3.

En la parte A, se muestran las principales revistas que han publicado sobre el tema destacándose: Applied Energy, Renewable Energy, Computer Aided Chemical Engineering, Energy y Bioresource Technology. En la parte B se muestran las instituciones líderes en el tema, la Universidad de Northwestern en Estados Unidos, la Universidad de Padova en Italia y la Universidad de Columbia Británica en Canadá. Por su parte la parte C muestra los autores que más publican en el tema, aspecto importante para identificar los artículos más relevantes. Finalmente, la parte D muestra los países guías en investigaciones relacionadas con las BSC, nuevamente Estados Unidos, Italia, Canadá y Reino Unido se destacan, todos estos países tienen centros de investigación de reconocimiento mundial, líderes en investigaciones relacionadas con la biomasa y bioenergía.

Considerando lo anterior, se puede concluir que la biomasa es una de las fuentes de energía renovables más prometedora, su uso como fuente de energía ha sido además reforzada en los últimos años. El número de trabajos de investigación que utilizan métodos de optimización para resolver los problemas de las BSC han aumentado dramáticamente en los últimos años. Nuevas tendencias de investigación de biomasa para bioenergía sugieren integrar en los modelos el análisis de la BSC desde el punto de vista de múltiples niveles, productos y periodos. A continuación, se analizan las principales tendencias de las contribuciones en esta área y las perspectivas de investigación.

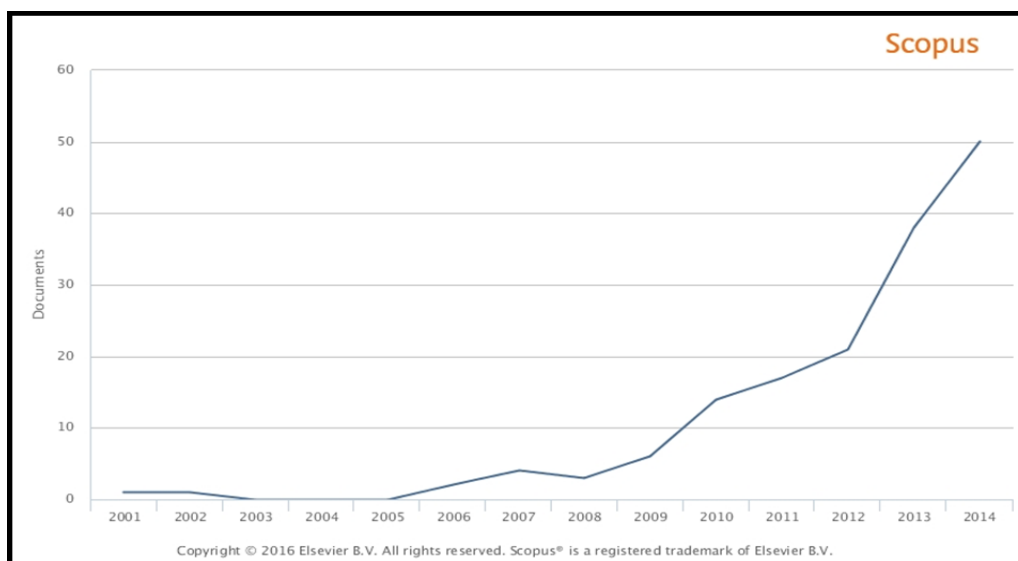


Figura 1-2. Evolución del estado del arte de las publicaciones sobre optimización de BSC

### 1.3.2. Características y estructura de las cadenas de suministro de biomasa

La biomasa, desde el punto de vista energético, se considera como el conjunto de la materia orgánica, de origen vegetal o animal, que es susceptible de ser utilizada con fines energéticos, se utiliza para la producción de biocombustibles que sustituyan a los fósiles y para la producción de energía eléctrica y eventualmente calor (con equipos de cogeneración) o bioenergía que se refiere a la energía producida por los biocombustibles (Wolfsmayr and Rauch, 2014). Por tanto, la biomasa presenta actualmente un potencial amplio de investigación, por ser una alternativa para mitigar el cambio climático y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, pues sus productos tienen impactos ambientales potencialmente más bajos que los del petróleo.

La estructura general de una BSC, véase figura 1-4, se caracteriza por los eslabones de abastecimiento (Upstream), producción (Midstream) y distribución (Downstream) (Rentizelas, Tolis and Tatsiopoulos, 2009; An, Wilhelm and Searcy, 2011; Wee *et al.*, 2012; Haleem *et al.*, 2015). En este sentido, el eslabón de abastecimiento está compuesto por cinco componentes: producción de biomasa, cosecha, recolección, pre tratamiento y almacenamiento. En el segundo eslabón se incluye el proceso de conversión y finalmente un tercer eslabón de distribución. Todas estas operaciones se producen en los sitios de producción de biomasa o en instalaciones conectadas a través de la infraestructura de transporte y transbordo. En este contexto, generalmente el proceso de conversión es considerado como una caja negra teniendo como entrada la biomasa pre tratada

y como salida la bioenergía. A continuación, se describen los aspectos más importantes de cada una de las actividades relacionada con las BSC

### **Cosecha y recolección de biomasa**

En este componente de las BSC, las principales decisiones a tratar son la asignación de tierras, la programación de la cosecha y la planificación de recogida de biomasa a partir del análisis de los contenidos del suelo / humedad de la biomasa, condiciones climáticas, la disponibilidad de tierras y la demanda de bioenergía (Mafakheri and Nasiri, 2014).

Varios documentos apuntan a la distribución geográfica dispersa de los recursos de biomasa, en particular los bosques, a lo largo del territorio como un factor limitante que influye en el costo de las operaciones de cosecha (Möller, 2004; Caputo *et al.*, 2005; Gronalt and Rauch, 2007). Fragmentar las áreas de suministro en pequeñas zonas ha sido una solución en países con topografía desafiantes como Dinamarca y Austria (Madlener and Bachhiesl, 2007; Möller and Nielsen, 2007) Una característica adicional de la biomasa es su plazo de cosecha limitada inducida por la estacionalidad de la mayoría de los tipos de biomasa (Caputo *et al.*, 2005; Madlener and Bachhiesl, 2007). La cosecha anual única, causa una subutilización significativa de maquinaria y equipo de capital intensivo a lo largo del ciclo anual, lo que aumenta los costos de operación (Hamelinck, Suurs and Faaij, 2005; Dunnett, Adjiman and Shah, 2007; Uslu, Faaij and Bergman, 2008). Además, la cosecha anual requiere en suma más mano de obra en comparación con la cosecha perenne (Thornley, Rogers and Huang, 2008) y un período de cosecha más corto implica grandes inventarios, haciendo que aparezcan los costos de almacenamiento y pérdidas de materia seca (Dunnett, Adjiman and Shah, 2007; Uslu, Faaij and Bergman, 2008).

### **Almacenamiento entre los eslabones de la cadena**

La principal razón para el almacenamiento en toda la BSC es que coincida de manera adecuada la oferta y la demanda de biomasa de las plantas de bioenergía. Un corto periodo de recolección de la mayoría de los tipos de biomasa y la frecuente dispersión geográfica sobre el territorio inducen naturalmente a la necesidad de almacenamiento con el fin de asegurar el suministro continuo de materia prima a las plantas de bioenergía o biorefinerías (Sims and Venturi, 2004; Caputo *et al.*, 2005; Hess, Wright and Kenney, 2007; Uslu, Faaij and Bergman, 2008; Rauch and Gronalt, 2011). Generalmente debido a la corta duración de las temporadas de cosecha, un alto número de almacenes son empleados como “buffer” de capacidad (Uslu, Faaij and Bergman, 2008).

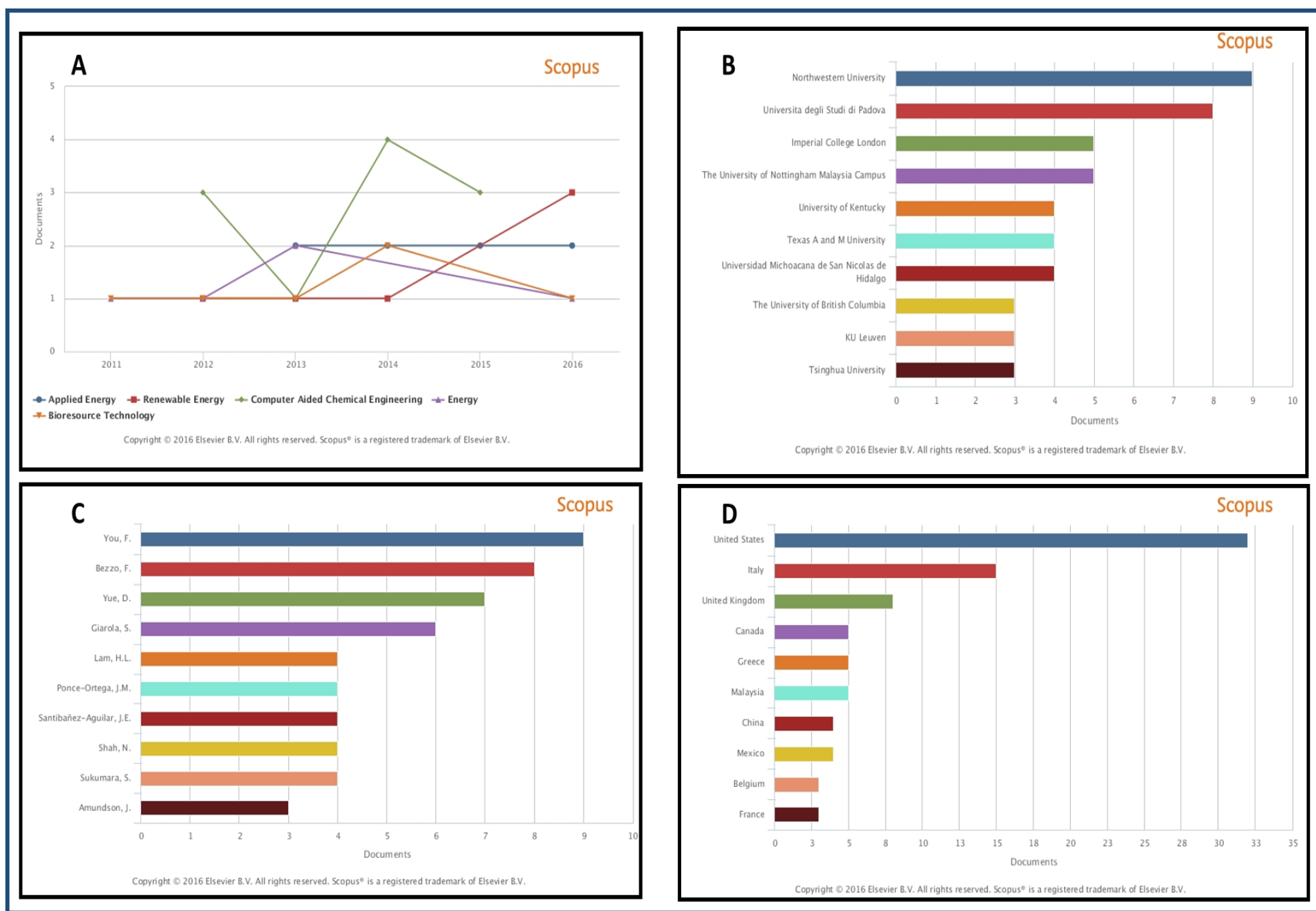


Figura 1-3. Análisis bibliométrico del estado del arte de las publicaciones sobre optimización de BSC



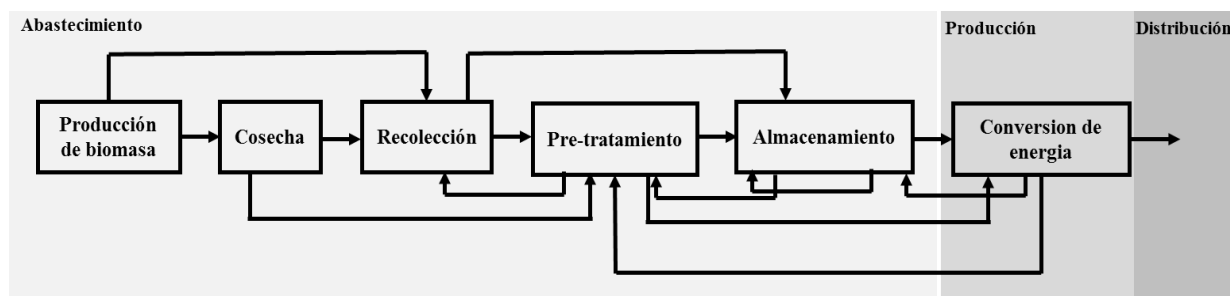


Figura 1-4. Estructura general de las cadenas de suministro de biomasa. Fuente: (De Meyer *et al.*, 2014)

Los almacenes pueden ser utilizados para suministrar varias plantas si estas no tienen suficiente capacidad de almacenaje (Gronalt and Rauch, 2007) o puede localizarse adyacente a las plantas de conversión con función simultánea de almacenaje y pre-tratamiento (Gasol *et al.*, 2009). Otros estudios proponen localizar los almacenes en la vecindad de la zonas de cosecha (Haq and Easterly, 2006; Ayoub *et al.*, 2007).

El tipo de almacén varía desde almacenes al aire libre a almacenes a cielo cubierto. El tipo de almacén depende fundamentalmente del clima y del estado de procesamiento de la biomasa. Al respecto varios autores (Haq and Easterly, 2006; Ayoub *et al.*, 2007) realizan diferentes estudios donde evalúan diferentes alternativas en base a las condiciones de sus países.

## Transporte

La fase de transporte en la BSC está asociada con diversos modelos desarrollados con el fin de analizar la viabilidad de las rutas alternativas, decidir sobre los medios de transporte (tipos, capacidad y horarios), minimizar los costos de la cadena de suministro y el tiempo de viaje, y minimizar los impactos ambientales de las actividades de la SC.

El transporte es un componente clave dentro del costo total de las actividades de la BSC. Una de las principales variables económicas en el transporte es el tiempo de viaje (Möller and Nielsen, 2007; Perpiñá *et al.*, 2009; Rentizelas, Tolis and Tatsiopoulou, 2009), el cual depende de la distancia y la velocidad.

La distancia está muy correlacionada con las rutas de viaje (Perpiñá *et al.*, 2009), las rutas pueden minimizarse mediante su optimización. En el caso de la velocidad, esta es muy dependiente de las características e infraestructura de las vías (Natarajan *et al.*, 2012), factor de complejidad de las vías (Thornley, Rogers and Huang, 2008) y del modo de transporte (Kumar, Sokhansanj and Flynn, 2006).

La masa (Hamelinck, Suurs and Faaij, 2005) y el volumen (Thornley, Rogers and Huang, 2008; Leduc *et al.*, 2010) de la biomasa, así como la capacidad de los medios de transporte son otras de las variables claves en el transporte.

### **Pre-tratamiento de la biomasa**

El pre-tratamiento es un proceso mecánico o químico (o una combinación de ellos) que convierte la biomasa en portadores de energía más densas no sólo para aumentar su tasa de conversión de energía, sino también para facilitar la manipulación, almacenamiento y transporte, y para reducir los costes asociados (Kumar and Sokhansanj, 2007; Larson *et al.*, 2010). Los cinco tipos de pre-tratamiento básicos utilizados son: ensilado, secado, politización, torrefacción y pirólisis. Se debe mencionar que no todos los materiales de biomasa necesitan someterse a un pre-tratamiento. Por ejemplo, el mantenimiento de una cierta cantidad de contenido de humedad en los registros se considera un parámetro de calidad (desde un punto de vista de fuerza), por lo que es un buen candidato para la peletización (Lehtikangas, 2001). La inclusión y la elección de los procesos de pre-tratamiento no sólo influyen en el perfil de cálculo del costo de las actividades de almacenamiento y transporte, sino también afecta a la estructura de las BSC (Mafakheri and Nasiri, 2014).

En resumen, las BSC para bioenergía difieren de las cadenas de suministro tradicionales en varios aspectos, entre ellos se encuentran, el alto componente de estacionalidad que tiene la disponibilidad de biomasa; baja densidad de la energía; las variaciones en la demanda debido a la alta incertidumbre en la producción de energía y la variabilidad de los materiales de biomasa, lo que tiene implicaciones para el transporte y almacenamiento (De Meyer *et al.*, 2014). Además las BSC envuelven actividades específicas que requieren varios recursos: i) las actividades de cosecha están limitadas a un periodo específico donde el rendimiento no es perfecto; ii) se requiere el almacenamiento en la práctica para sincronizar el calendario de producción de biomasa con el plan de producción de las plantas de conversión; iii) el pre-procesamiento es útil para mejorar la conservación (secado) y gastos de envío (empacado, peletización) y para reducir los costos de transporte mediante el aumento de la densidad; iv) igual que en la logística industrial, varios modos de transporte se pueden utilizar, la flota de vehículos es a menudo limitado y el número de viajes por período está limitado por la gama de vehículos y las regulaciones del tiempo de conducción (Ba, Prins and Prodhon, 2015).

Todos los aspectos anteriores obliga a los diseñadores de tales cadenas a utilizar herramientas de modelado para hacer frente a esta complejidad, pues las BSC tienen que ser robustas y flexibles para poder adaptarse a los cambios relacionados con el clima, el uso y el carácter perecedero de las condiciones de biomasa y las condiciones de mercado (Iakovou *et al.*, 2010). La investigación de operaciones es un enfoque adecuado para describir mediante modelos cuantitativos las BSC, evaluar su desempeño y optimizar criterios tales como su costo total, el consumo de energía y sus emisiones de gases de efecto invernadero (Ba, Prins and Prodhon, 2015). De hecho, el número de investigaciones reportados que usan métodos y modelos de optimización en el campo de la bioenergía está creciendo (Iakovou *et al.*, 2010; Baños *et al.*, 2011). En el apartado siguiente se realiza un análisis de los modelos para el diseño de BSC desde una óptica de investigación de operaciones.

### **1.3.3. Niveles de decisión en CS de biomasa**

Una CS consiste en una jerarquía natural de procesos de toma de decisiones, que incluyen: decisiones estratégicas (a largo plazo), tácticas (a medio plazo) y operativas (a corto plazo) basadas en su nivel de importancia (Mula *et al.*, 2010). Este mismo planteamiento se aplica a las BSC, las decisiones estratégicas se centran en el diseño eficiente de la CS con el objetivo de alcanzar los objetivos generales de la organización y aumentar su ventaja competitiva como: la configuración de la CS, asignación de recursos, selección de tecnología de producción, contratos de oferta y demanda, número de la ubicación y capacidad de los sitios y los problemas de sostenibilidad (Sharma *et al.*, 2013). Las decisiones tácticas proporcionan rentabilidad a una organización al actuar dentro de las limitaciones desarrolladas durante la planificación y control de la producción, planificación de inventarios, gestión de flotas (asegura disponibilidad, mantenimiento y reemplazo de equipos de transporte) y gestión logística (asegura un flujo eficiente de material, información y otros recursos para cumplir con los requisitos del usuario final) (Iakovou *et al.*, 2010). Las decisiones operativas sirven para satisfacer la demanda de la mejor manera posible e incluye decisiones detalladas sobre la producción, el inventario y la gestión del transporte (Gold and Seuring, 2011). La figura 1-5 presenta las decisiones cruciales en el desarrollo de un sistema eficiente de BSC.

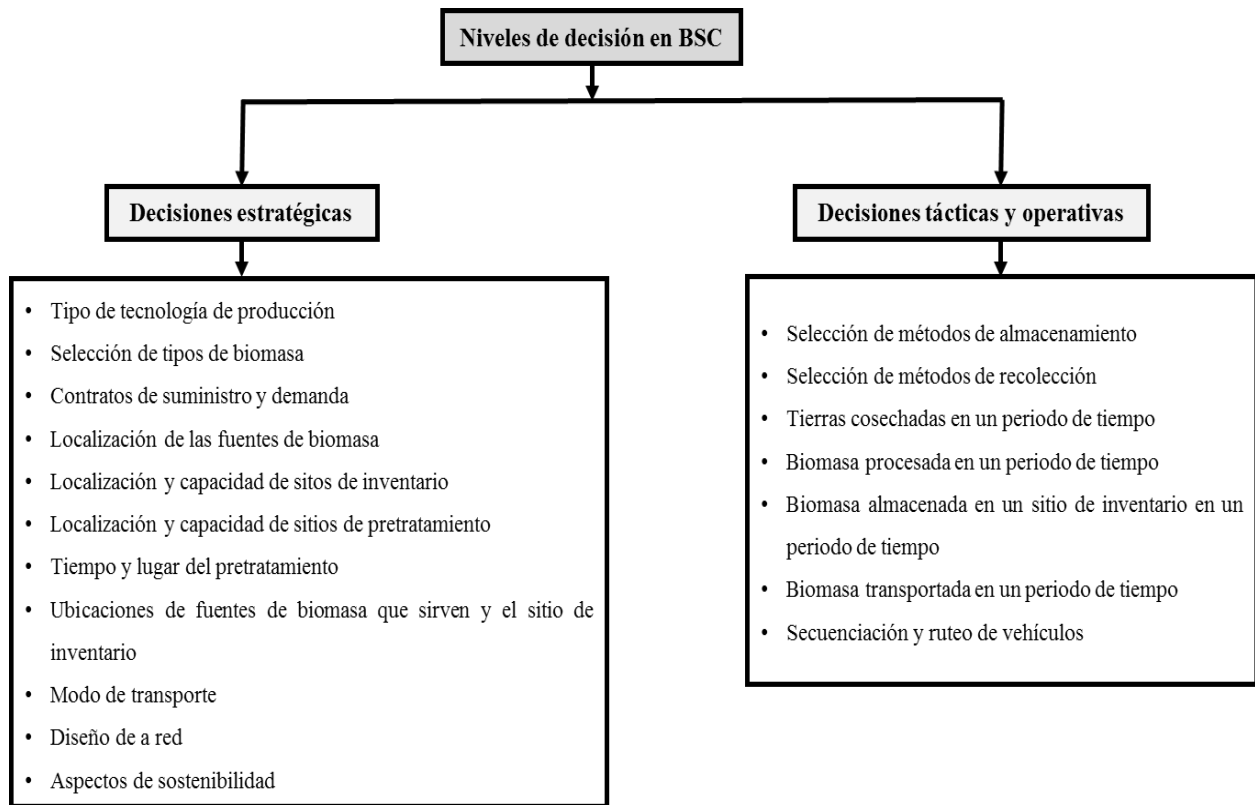


Figura 1-5. Niveles de decisión en BSC. Fuente: elaboración propia a partir de (Ekşioğlu *et al.*, 2009; Iakovou *et al.*, 2010; Awudu and Zhang, 2012)

### 1.3.4. Modelado de optimización de cadenas de suministro de biomasa

La SCM juega un papel crítico en la gestión de los procesos de producción de bioenergía. La gestión de cadenas de suministro de biomasa ha sido definida como la gestión integrada de la producción de bioenergía desde la cosecha de los biomateriales hasta las instalaciones de conversión de energía (Gold and Seuring, 2011)

Varias revisiones fueron identificadas en la literatura que tratan de diferentes formas las BSC, todas fueron analizadas con vistas a comprobar la pertinencia de la presente revisión. Se puede clasificar las revisiones en dos categorías: los que tratan puramente la gestión de las BSC y un segundo grupo que analiza las BSC desde un contexto de investigación de operaciones donde el diseño de la cadena es un tema clave. En la revisión realizada, solo seis artículos analizan los modelos cuantitativos basados en técnicas de programación matemática y simulación, para las BSC.

(Mafakheri and Nasiri, 2014) ofrece una revisión exhaustiva y clasificación de la literatura existente en cuanto al modelado de las operaciones de la BSC vinculándolo con cuestiones

estratégicas y problemas con el diseño, la planificación y la gestión de las BSC. (Sharma *et al.*, 2013) presentan una revisión detallada de los modelos de programación matemática desarrollados para BSC e identifica los principales retos y posibilidades de trabajo futuro. Su artículo es más bien una taxonomía de modelos, basado en la estructura de la cadena, las limitaciones que se tienen en cuenta para determinar decisiones, y los criterios de optimización. No cubre los enfoques tales como la simulación, optimización estocástica, y los métodos de cálculo utilizados para resolver los modelos. Además, su revisión es hasta el 2011, no incluye los numerosos desarrollos recientes. (Shabani, Akhtari and Sowlati, 2013) analizan los estudios que han utilizado modelos matemáticos para la optimización determinista y estocástica de las SC de biomasa forestal, para producir electricidad, calor o biocombustibles. Destacan el hecho de que los estudios futuros deben tener en cuenta los objetivos ambientales y sociales, así como los aspectos económicos. El artículo cita las publicaciones que se ocupan de las incertidumbres en la demanda, los rendimientos de las tecnologías de conversión de biomasa, suministro y precios. Una evaluación general es presentada por (Yue, You and Snyder, 2014) quienes describen los principales desafíos y oportunidades en el modelado y la optimización de las BSC para bioenergía y biocombustibles. También se discuten temas de modelización de la sostenibilidad y el tratamiento de la incertidumbre en la optimización de las BSC. Termina identificando los desafíos, como la integración con la logística, la competencia con otras producciones agrícolas, y el comercio internacional de la biomasa y los biocombustibles.

(De Meyer *et al.*, 2014) proporcionan una descripción general de las BSC para la bioenergía, en cuanto a las decisiones relacionadas con su diseño y gestión desde una óptica de programación matemática. El documento ofrece una visión general de los métodos y modelos que se centran en las decisiones relativas al diseño y la optimización de los eslabones de aprovisionamiento y producción de las BSC para la bioenergía. (Ba, Prins and Prodhon, 2015) redactó la revisión más reciente e interesante para la presente investigación, en este artículo se examina las recientes publicaciones sobre modelos de BSC, desde una perspectiva de investigación de operaciones. Presenta una tipología de decisiones en tres niveles (estratégico, táctico y operativo) para las BSC, y una revisión de los modelos basados ya sea en la simulación o la optimización matemática.

Numerosos autores han propuesto modelos de optimización, los cuales han enfrentado el problema desde muy diferentes aristas: monobjetivos, multiobjetivos, estáticos, dinámicos, multiperíodos, deterministas, estocásticos. En la tabla 1-1 se muestra un conjunto de trabajos que demuestra la

variedad de problemas enfrentados para diseñar las BSC. Los métodos para solucionar estos problemas también son diversos, utilizando programación lineal y no lineal, metaheurísticas y programación difusa. Los 20 artículos con mayor relevancia según SCOPUS fueron seleccionados y categorizados de acuerdo con las características: i) pilar de la sostenibilidad modelado mediante la función objetivo; ii) enfoque de modelado; iii) tratamiento de incertidumbre; iv) variables incluidas en el modelo y v) actividades consideradas en la cadena de suministro, la descripción en detalle se muestra en la tabla 1-1.

El estudio de estado de arte, caracterizado en las dimensiones descritas anteriormente, es resumido en la Figura 1-6. Como puede observarse, solamente el 28% de los artículos consideran métodos de solución con criterios diferentes al económico. El 23.8% de los autores, consideraron el estudio de aspectos ambientales dentro de la función objetivo y el 19% incorporan otro tipo de factores. Pocos estudios han aplicado modelos multiobjetivo para la optimización de la cadena de suministro de la biomasa debido a la complejidad de manejar simultáneamente varios objetivos (Mirkouei *et al.*, 2017).

La modelación de la BSC muestra que el 57% se formulan como problemas determinísticos y el 43% restante como problemas estocásticos, siendo la modelación basada en escenario y la incertidumbre en la demanda y suministro, los enfoques más populares. De igual manera el 68% de las contribuciones utilizan MILP, observando en varias investigaciones que inicialmente utilizan la MINLP, pero luego linealizan el modelo pues existen “solver” más eficientes para solucionar problemas de tipo MILP. Las variables binarias determinan la ubicación, cantidad, tecnología y el tamaño de las instalaciones y las variables continuas que definen la biomasa y los flujos de material entre las regiones.

En cuanto a las salidas de los modelos, la mayoría de las contribuciones de la literatura se concentran en decisiones de localización, capacidad y selección de tecnología desde el punto de vista estratégico. Mientras en el nivel táctico las decisiones se concentran en el flujo material e inventario. Referido a los enfoques de solución prevalece el uso de métodos exactos, dejando la utilización de técnicas aproximadas (metaheurísticas, algoritmos híbridos) para otras decisiones como el scheduling y planeación de la producción (Castillo-villar, 2014). Las heurísticas son usadas para resolver problemas operativos que necesitan una respuesta rápida en minutos o segundos, mientras que los problemas de tipo MILP son mejores para problemas de planeación

estratégica y táctica que pueden ser resueltos en periodos de tiempos más extensos, en algunos casos horas.

Respecto al tipo de biomasa, se observa una tendencia hacia la producción de bioenergía a partir de residuos agroindustriales. Igualmente, se evidencia que el análisis de sensibilidad se ha llevado a cabo, principalmente, de acuerdo a la variabilidad de los parámetros y variables de decisión en diferentes periodos de tiempo; manifestándose una tendencia creciente a la incorporación de la incertidumbre en los modelos en los últimos dos años, siendo la programación estocástica, programación robusta y programación difusa los enfoques más extendidos.

La revisión permitió observar también, que los métodos de optimización se combinan habitualmente con el sistema de información geográfica (GIS). Por un lado, los GIS se utiliza para procesar y visualizar los datos de entrada y los resultados. Por otra parte, las funciones de los GIS permiten el cálculo de las distancias de transporte, para determinar los caminos más cortos entre las instalaciones, definir las ubicaciones potenciales para la construcción de instalaciones, etc. Luego, esta información geográfica se puede aplicar para parametrizar el modelo de optimización. La sostenibilidad de las SC aun es un tema con amplio potencial para abordar en el modelado de las BSC.



Figura 1-6. Caracterización de los artículos de acuerdo a las dimensiones de estudio seleccionadas

#### **1.4. La generación de electricidad a partir de biomasa: el caso de Cuba**

La biomasa es hoy el principal recurso energético renovable, el que más se aprovecha en Cuba. Su utilización sostenible para la generación eléctrica puede contribuir a desarrollar un sistema energético distribuido con participación significativa de las fuentes renovables e impactos positivos en el entorno y la economía local (Abreu Elizundia *et al.*, 2016). La biomasa constituye algo más del 99 % de la energía renovable total en Cuba, y continuará dominando en el futuro, debido a las grandes cantidades de residuos de industrias como la del azúcar, la madera, el café, el arroz y otras fuentes como las leñas, el biogás y las plantaciones de oleaginosas no comestibles (ONEI, 2015)

. Dentro de las biomásas, la caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Si se toma en cuenta sólo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacena alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que se puede producir, por lo que el bagazo constituye uno de los materiales lignocelulósicos más prometedores entre los recursos no maderables, por su accesibilidad, cuantía y calidad (Pérez-Bermúdez, 2005).

La Oficina Nacional de Estadísticas refleja en el Anuario Estadístico que las principales fuentes de biomasa para la producción de energía se encuentran concentradas en el bagazo de la caña (incluyendo la paja de caña); representando estas alrededor de 1 140.2 TEP (98,7 % del total). (ONEI, 2015). La cantidad actual de bagazo generado como subproducto de la cosecha de caña de azúcar es de aproximadamente 4,6 millones de toneladas y la cantidad de basura de caña de azúcar alrededor de 1,7 millones de toneladas. En conjunto, estos tendrían un poder calorífico equivalente a 1,2 millones de toneladas de combustible (Guzmán and Valdés, 2000) Una de las formas de aprovechar con mayor eficiencia el combustible es la cogeneración de energía ya que permite, a partir de una misma cantidad de energía primaria, obtener dos resultados industrialmente aprovechables: energía eléctrica (o mecánica) y calor. Este proceso no es desconocido en Cuba pues desde hace siglos se viene utilizando, destacando el bagazo, producido por la industria azucarera a pesar de la ineficiencia con que por lo general se utiliza, ha cubierto necesidades energéticas del país.

El bagazo y los residuos de la cosecha de la caña de azúcar pueden usarse alternativamente como combustible para generar electricidad o como materia prima para producir biocombustibles de segunda generación. Existen varias tecnologías de conversión de la biomasa cañera, por ejemplo,



sistemas de cogeneración, termoquímicos y procesos bioquímicos (Lee *et al.*, 2008; Walfrido Alonso-Pippo *et al.*, 2009; Leibbrandt, Knoetze and Görgens, 2011).

En la actualidad existe un elevado número de tecnologías en procesos de evaluación a nivel de proyectos pilotos, que podrían valorarse como alternativas en los procesos inversionistas de cogeneración en la industria sucro-energética en el futuro, entre ellas se tiene: ciclos combinados con el empleo de la gasificación de la biomasa (diferentes variantes) ciclo Rankine orgánico y sistemas Stirling (Khatiwada *et al.*, 2012; Dantas, Legey and Mazzone, 2013). Sin embargo, realmente madura y comercial solo se dispone de la tecnología del ciclo Rankine con sus dos variantes tradicionales, de: turbina de contrapresión y turbina de extracción-condensación. En todos los proyectos estudiados se encontró el empleo de una de estas dos variantes sin excepción (Rubio González and Roque Díaz, 2006)

Los proyectos de cogeneración en la industria azucarera en Cuba suman dos ventajas. Primera, el hecho de que, al ser instalaciones diseminadas en diferentes puntos de la geografía, permiten la creación de un sistema eléctrico con generación distribuida, lo que es muy ventajoso por disminuir las pérdidas en la distribución de la energía y dar más fiabilidad al sistema en caso de desastres naturales. Segunda cada nuevo proyecto hace una significativa contribución a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero.

En Cuba se han realizado proyectos para implementar el uso de tecnologías más eficientes para la cogeneración de energía. En el 2004 financiado con fondos de las Naciones Unidas se ejecutó un proyecto de implementación de tecnologías de cogeneración en el central Héctor Molina. Recientemente un estudio elaborado por el Centro de Estudios Energéticos y de Tecnologías Ambientales (CEETA) realizó una valoración para el máximo aprovechamiento del potencial energético de la biomasa cañera, con vista a la producción de electricidad (Rubio González and Rubio Rodríguez, 2016). El estudio realizado por el CEETA proyecta y justifica técnicamente la construcción de 25 centrales de cogeneración en el país con potencia de 20, 50 y 60 MW hasta el 2030, con el cual se prevé lograr, en el 2030, un 24 % de la generación eléctrica mediante fuentes renovables de energía.

Tabla 1-1. Resumen de las contribuciones más relevantes en el diseño de BSC

Artículo	Modelado				Función objetivo			Incertidumbre				VD Estratégica					VD Táctica				Solución			
	SMIP	FMIP	MILP	MINLP	Económico	Ambiental	Social	Energía	Demanda	Suministro	Parámetro	Localización	Capacidad	Número	Asignación	Selección de Tecnología	Modo de transporte	Cantidad de transporte	Inventario	Programación	Ruteo	Flujo de materiales	Exacto	Aproximado
(Ekşioğlu <i>et al.</i> , 2009)			*		*	*						*	*						*			*	*	
(You and Wang, 2011)			*		*							*	*		*	*	*						*	
(Mohseni, Pishvae and Sahebi, 2016)			*		*							*	*									*	*	
(You <i>et al.</i> , 2012)			*		*	*	*					*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
(Zhu <i>et al.</i> , 2011)			*		*							*			*		*			*		*	*	
(Hajibabai and Ouyang, 2013)				*	*							*					*			*		*		*
(Shabani and Sowlati, 2013)				*	*							*			*				*			*	*	
(Gomes, e Alvelos and Carvalho, 2012)			*		*										*			*		*		*	*	
(Rauch and Gronalt, 2011)			*		*										*		*	*		*		*	*	
(Zhang <i>et al.</i> , 2013)			*		*	*	*					*	*		*							*	*	
(Meyer, Cattrysse and Orshoven, 2015) 2015			*		*			*				*	*		*	*	*		*			*	*	
(Zhang and Hu, 2013)			*		*							*	*						*			*	*	
(Shabani <i>et al.</i> , 2014)	*				*					*									*			*	*	
(Kim, Realff and Lee, 2011)			*		*				*	*	*	*	*			*						*	*	
(Santibañez-Aguilar <i>et al.</i> , 2014)			*		*	*															*	*	*	
(Azadeh, Vafa Arani and Dashti, 2014)	*				*				*		*		*			*		*	*			*	*	
(Pantaleo <i>et al.</i> , 2014)			*		*								*		*	*						*	*	
(Giarola, Zamboni and Bezzo, 2011)					*																		*	
(Bairamzadeh, Pishvae and Saidi-Mehrabad, 2016)		*			*	*	*					*	*		*	*						*	*	
(Yılmaz Balaman and Selim, 2015)		*			*					*			*	*								*	*	

**MILP:** Programación Lineal Entera Mixta   
 **MINLP:** Programación No Lineal Entera Mixta   
 **SILP:** Programación Estocástica Lineal Entera Mixta   
 **FMILP:** Programación Difusa Lineal Entera Mixta

Otros estudios se han realizado respecto a la cogeneración de electricidad en Cuba a partir de biomasa cañera (Pérez Gil, Contreras Moya and Rosa Domínguez, 2013) evalúa y compara los impactos ambientales del ciclo de vida de las diferentes tecnologías de cogeneración que actualmente se utilizan en la industria azucarera cubana, demostrando que la combinación del generador de vapor alemán Modificado EKE 80 con el turbogenerador ruso 2500 era la alternativa que implicó una reducción del impacto total en comparación con el resto de alternativas. (Abreu Elizundia *et al.*, 2016) simula y evalúa cinco alternativas de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar demostrando que los mayores excedentes de bagazo y electricidad se obtienen con el esquema de gasificación de biomasa y los peores resultados en estos parámetros se obtienen en la alternativa que opera a menores parámetros de presión y temperatura.

La SC de productos de la caña de azúcar ha sido estudiada por varios autores resultando de interés para la investigación, los aportes (Knudsen González, 2005) y (Marrero Delgado, 2001). (Knudsen González, 2005) propone un modelo conceptual con su procedimiento general para el diseño y la gestión en los niveles táctico y operativo de las SC de los residuos agroindustriales de la caña de azúcar. (Marrero Delgado, 2001) diseña un procedimiento general y sus procedimientos específicos, para el análisis de un sistema logístico en todos sus eslabones, a partir de un modelo decisional predefinido con un enfoque de toma de decisiones multicriterio y lo aplica en la cadena logística de corte, alza y transporte de la caña de azúcar. Como resultado desarrolla un modelo decisional multicriterio que permite gestionar la cadena de corte, alza y transporte de la caña de azúcar y propone un indicador para medir la efectividad del funcionamiento de la cadena logística

De forma general se identifica el empleo de herramientas de la investigación de operaciones es una de las metodologías más robustas descritas en la literatura científica para soportar la toma de decisiones de la envergadura que requiere esta solución. Las características esenciales de la modelación matemática de la BCS para la cogeneración de energía a partir de biomasa cañera son discutidas en profundidad en los capítulos siguientes.

Varios estudios (Börjesson and Ahlgren, 2010; Difs *et al.*, 2010; Wetterlund *et al.*, 2013) utilizan la programación matemática para comparar el costo de generación de energía, ya sea a partir de biocombustibles desde la biomasa o la posibilidad de cogeneración. Sin embargo, el análisis realizado en el presente epígrafe demuestra que los modelos propuestos en la literatura consultada, abordan elementos importantes para el propósito de esta investigación, sin embargo, ninguno por sí solo puede ser aplicado al caso de estudio del diseño de la SC para la cogeneración de energía a partir de biomasa cañera. Por tanto, el modelo para el diseño de la

CS para la cogeneración de energía a partir de biomasa cañera en Cuba requiere: i) la presencia de objetivos económicos y energéticos; ii) la toma de decisiones integradas de localización, capacidad, tecnología, asignación, flujos materiales, selección y organización del transporte; iii) la inclusión de múltiples productos y iv) la comprensión de la incertidumbre en la generación de biomasa.

### **1.5. Conclusiones parciales**

- 1.** En cuanto a la estructura de las BSC todavía algunos autores consideran nodos dedicados al almacenamiento y pre-procesamiento previo entre las zonas de recolección y las plantas de conversión. Sin embargo, cuando estos nodos se tratan, lo más común es representarlo en depósitos adyacentes al área de cosecha con pre-tratamientos simples como el empacado, o adyacentes a las plantas de conversión mediante silos de almacenamiento centralizado y pre-tratamiento más sofisticados.
- 2.** La optimización matemática ha sido ampliamente aplicada para hacer frente al problema de diseño de BSC. En este sentido la revisión realizada refleja que los modelos matemáticos que tratan el problema de SCND en BSC en su mayoría integran simultáneamente decisiones estratégicas y tácticas, las decisiones operativas han sido menos tratada en la literatura y generalmente se utilizan modelos matemáticos independientes. Todavía hay un número muy limitado de modelos que consideran los aspectos ambientales, sociales y económicos a través de un enfoque integrado.
- 3.** La tendencia en los modelos matemáticos que tratan el problema de SCND en BSC es el uso de métodos determinísticos, el MILP como enfoque de modelado, así como considerar un solo periodo tiempo, pocos modelos abordan un horizonte de múltiples períodos. Se evidencia, por tanto, que el estudio del diseño de las BSC, podría generar un mayor aporte al estado del arte si estos aspectos se consideran: múltiples niveles de la cadena, productos y periodos y son abordados de manera dinámica o estocástica, así como, si hacen uso de procedimientos generales que integren soluciones exactas o heurísticas, métodos multicriterio y simulación.
- 4.** Los modelos de optimización encontrados en la literatura consultada no permiten el diseño BSC que integre criterios económicos y técnicos, soporte decisiones estratégicas y tácticas y contemple el uso de múltiples tipos de biomasa; siendo estos los elementos y condiciones presentes en el diseño de la CS de biomasa cañera para cogeneración en Cuba. Por todo lo antes expuesto, se considera que el problema científico planteado en la investigación es actual y de una elevada pertinencia económico-social.

---

## MODELO MATEMATICO PARA OPTIMIZAR DECISIONES ESTRATEGICAS Y TACTICAS EN CS DE BIOMASA CAÑERA PARA COGENERACIÓN

---

Partiendo de los análisis relacionados con las características y estructura de las BSC, la modelación matemática del problema del diseño de BSC y sus desafíos en el caso de Cuba, expuestas en el capítulo 1, en el presente capítulo se propone un modelo de optimización para el diseño de CS para cogeneración a partir de biomasa cañera. El capítulo se divide en tres partes, inicialmente se realiza una descripción del problema donde se describen los enfoques asumidos y las peculiaridades del diseño de la CS de biomasa cañera para cogeneración en Cuba y luego se desarrolla la formulación matemática del modelo de optimización que implica en primera medida la definición de premisas del modelo, luego la definición de la función objetivo, restricciones de la cadena de suministro y los parámetros y condición de no negatividad. Finalmente, en el tercer apartado se aplica parcialmente el modelo propuesto tomando como objeto la Empresa Azucarera de Villa Clara.

### 2.1. Descripción del problema

La CS de biomasa cañera para cogeneración en Cuba concibe la asignación de tareas estratégicas diferentes, a la red de centrales existentes. Primero las *bioeléctricas* que es un ingenio tradicional integrado fundamentalmente por la sala de calderas para la generación de vapor y la planta eléctrica para la generación de electricidad, estas plantas utilizan biomasa cañera propia de su funcionamiento y biomasa cañera de otros ingenios. Segundo, los *tributarios* que son ingenios tradicionales que aportarán biomasa cañera excedente a los proyectos de bioeléctricas, mediante la venta de su biomasa sobrante.

Las CS de biomasa con fines energéticos crean obstáculos únicos que son diferentes de las otras CS tradicionales. Esto es especialmente cierto para un país como Cuba, por ejemplo, donde la disponibilidad de biomasa cañera está altamente distribuida y el suministro en cada punto es muy pequeño. En este contexto, el concepto de depósito regional de pre-procesamiento de biomasa, reconocido en la literatura como *RBPD* ha generado mucho interés. Los RBPD se designan teóricamente como depósitos de recolección y almacenamiento para la biomasa de granjas en una

región particular (Eranki *et al.*, 2013; Cambero *et al.*, 2015). También pueden realizar operaciones mecánicas y/o químicas en la biomasa para mejorar la eficiencia del almacenamiento y el transporte.

Teniendo en cuenta lo anterior, el problema a modelar responde a una estructura de diseño distribuida–centralizada. La CS de biomasa cañera para la cogeneración de energía en Cuba, consiste en una compleja red logística compuesta por las fuentes de suministro de biomasa representado mediante los campos de caña, centros de beneficios, ingenios *tributarios* y *bioeléctricas* diseminadas por toda la geografía cubana. Una serie de alternativas de diseño de la CS de biomasa cañera para la cogeneración de energía fueron identificadas y se consultaron las propuestas de la investigación de (Knudsen González, 2005).

Algunas interrogantes importantes para la toma de decisiones se deducen. ¿Cuáles de las instalaciones potenciales operarán como bioeléctrica o como tributario? ¿Qué alternativa de almacenamiento y pretratamiento seleccionar? ¿Cuáles son las tecnologías a situar en las diferentes instalaciones? ¿Qué medios de transporte utilizar en cada etapa de la cadena? ¿Cuántos mega watts entrega al SEN determinada configuración?

### **2.1.1. Planteamiento del problema**

Para responder a las interrogantes enunciadas al final de la anterior sección, se aborda el problema de optimización como un problema de planificación de ubicación de instalaciones capacitadas en múltiples etapas (Melkote and Daskin, 2001) en el que en cada instalación las características del producto de biomasa pueden cambiar debido a las operaciones de manejo. Esto se traduce en un modelo de programación lineal entero mixto (MILP) determinista, estático, multietapa y multiproducto que describe el flujo de materiales y las etapas de decisión presentadas en las figuras 2-1 y 2-2.

El modelo propuesto para CS de biomasa cañera para la cogeneración en Cuba, está organizado en una estructura de arco y nodo (figura 2-1). Un conjunto de nodos,  $n \in N$ , lo cuales puede ser las fuentes de suministro, nodos tributario o nodos bioeléctrica. Los nodos están conectados por arcos cuyo flujo de biomasa se representa mediante la variable,  $F_{bnnim}^{N-N^*}$ , además se crea el conjunto,  $i \in I$ , para representar los centrales tributario/bioeléctricas, un conjunto  $j \in J$  para representar cada uno de los RBPD () adjuntos a los centrales y los conjuntos,  $m \in M$  y  $g \in G$  para tener en cuenta los diferentes medios de transporte y tecnología de las instalaciones, respectivamente.

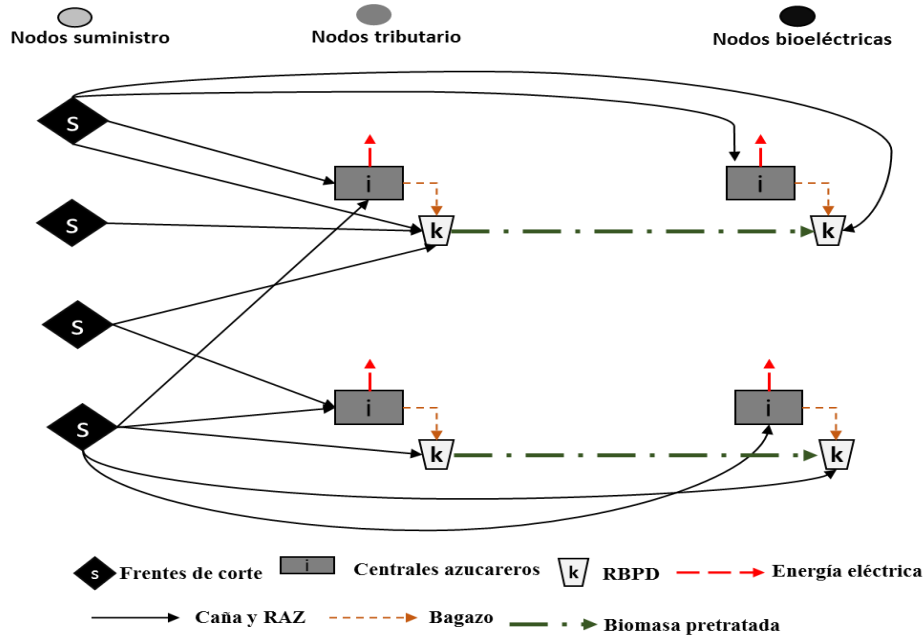


Figura 2-1 Visión genérica de la CS de biomasa cañera para cogeneración de energía

Diferentes tipos de biomasa (caña y RAZ),  $b \in B^{MP}$ , cosechadas en diferentes nodos de suministro,  $n \in N^S$ , arriban como materia prima a los nodos tributarios y nodos bioeléctricas, utilizando el medio de transporte  $m \in M$ . En los centrales, tanto tributarios como bioeléctricas,  $i \in I$ , se genera energía durante la zafra utilizando una tecnología,  $g \in G$ , además se genera un excedente de producto intermedio (bagazo),  $b \in B^{PI}$ , que se almacena en las instalaciones de preprocesamiento,  $j \in J$ , adjuntas a los centrales. El producto intermedio,  $b \in B^{PI}$  es un material voluminoso con baja densidad y alto contenido de humedad el cual puede pre-tratarse utilizando una tecnología,  $g \in G$ . Cada almacén localizado en nodo tributario,  $n \in N^T$ , suministra su biomasa pretratada  $b \in B^{PF}$ , al almacén adyacente a los centrales que se localizan en nodos bioeléctrica  $n \in N^B$ , utilizando el medio de transporte  $m \in M$ . Las bioeléctricas, luego de culminado el periodo de zafra continua generando electricidad con la biomasa sobrante procedente de los nodo tributario,  $n \in N^T$ , y de su misma operación durante la zafra.

Lo anterior fundamenta la formulación del problema, que se expresa como:

Sean:

Los nodos  $n \in N^S \cup N^T \cup N^B$  tipos de instalaciones diferentes necesarias para la cogeneración de energía a partir de biomasa cañera, conocidas los medios de transporte  $m \in M$  y sus capacidades y la tecnología  $g \in G$  de las instalaciones.

Determinar, la organización del flujo de los materiales diferentes  $F_{bnm}^{N-N^*}$ , la tecnología, y asignación de las instalaciones y tipo de medios de transporte necesarios que:

**Min f1 (costo):** minimizar costo logístico de la cadena de suministro, incluyendo costo de inversión total y los costos operativos anuales.

Como todo modelo constituye una representación aproximada de la realidad, pero capaz de explicar el funcionamiento de la misma, siempre deben ser considerados un conjunto de supuestos, que para el caso analizado son los siguientes:

- El modelo contempla varios tipos de biomasa (caña, bagazo y RAZ en estado natural o pretratado)
- La localización de los almacenes, plantas tributarias y plantas bioeléctricas es conocida.
- Las cantidades de las plantas tributarias y plantas bioeléctricas son finitas y conocidas.
- La cantidad y capacidad de los medios de transporte potenciales son conocidas.
- Las capacidades de almacenamiento en las instalaciones de preprocesamiento, tanto de producto intermedio como de producto final, son conocidas
- Los flujos solo son permitidos entre nodos tributario y nodos bioeléctricas.
- Los costos fijos y variables de transportación, almacenes, plantas tributarias y plantas bioeléctricas son conocidos y determinísticos.
- Las instalaciones solo abren con una tecnología.

## 2.2. Formulación del modelo matemático

La descripción del modelo contiene una serie de elementos que se dividen en: conjuntos, variables de decisión, parámetros, funciones objetivo y restricciones. La lista completa de índices, conjuntos, parámetros y variables de decisión se muestran en el anexo 1, mientras que la formulación de la función objetivo y las restricciones del modelo se explican a continuación.



### 2.2.1. Restricciones del modelo

Las restricciones asociadas a cada uno de los componentes de la CS son de dos tipos: restricciones de balance de masa y restricciones de operación, las cuales se muestran en las siguientes secciones. Mientras que las restricciones relacionadas con la operación de transporte entre los componentes de la CS se discuten por separado.

#### 2.2.1.1. Restricciones asociadas a las fuentes de suministro de biomasa

El total de biomasa cosechado en la fuente de suministro  $n \in N^S$  debe ser menor que la biomasa disponible en ese nodo, lo cual es modelado en la expresión (1). La expresión (2) garantiza que toda la biomasa cosechada sea enviada directamente a un nodo tributario o a un nodo bioeléctrica.

$$QH_{bn} \leq DISP_{bn} \quad \forall b \in B^{MP}, n \in N^S \quad (1)$$

$$QH_{bn} = \sum_{n'=1}^{N^T \cup N^B} \sum_{m=1}^M F_{bnn'm}^{N-N'} \quad \forall b \in B^{MP}, n \in N^S \quad (2)$$

#### 2.2.1.2. Restricciones asociadas a los RBPD

El siguiente grupo de restricciones se introducen en el modelo para representar la biomasa pretratada en los RBPD. Durante el pretratamiento, la biomasa puede ir a través de procesos de reducción de tamaño, densificación y secado. La ecuación (3) determina que la cantidad de biomasa (RAZ o bagazo) que entra a la instalación es igual a la cantidad de biomasa (RAZ) enviada desde todos los nodos suministradores más la cantidad de biomasa (bagazo sobrante) procedente de la planta. En la restricción (4) se introducen el coeficiente  $\gamma_{bb}^g$  para representar la transformación de la biomasa producto del pretratamiento. Obsérvese que esta ecuación tiene en cuenta todas las materias primas de biomasa que pueden convertirse en producto final a través una tecnología determinada. La restricción (5) establece que la cantidad de biomasa a pretratada en cada RBPD no debe exceder la capacidad (en términos de producto final). Las expresiones (6) y (7) están asociadas a la cantidad de biomasa a almacenar en términos de biomasa pretratada en los RBPD tributarios y de bioeléctricas, respectivamente.

$$Q_{bjn}^{IN} = \sum_{n'=1}^{N^S} \sum_{m=1}^M F_{bnn'm}^{N-N'} + \sum_{i=1}^I Q_{bin}^{out} \quad \forall b \in B^{PI}, n \in N^T \cup N^B \quad (3)$$

$$Q_{b\hat{g}jn}^{out} = \sum_{b=1}^{B^{PI}} \gamma_{bb}^g \times Q_{bjn}^{in} \quad \forall b \in B^{PF}, g \in G, j \in J, n \in N^T \cup N^B \quad (4)$$

$$Q_{bjng}^{out} \leq CAPP_{bjng} \times H \times Y_{jng} \quad \forall b \in B^{PF}, j \in J, g \in G, n \in N^T \cup N^B \quad (5)$$

$$\sum_{g=1}^G Q_{bjng} \times (1 - \delta_g) = \sum_{n=1}^{N^B} \sum_{m=1}^M F_{bnm}^{T-B} \quad \forall b \in B^{PF}, j \in J, n \in N^B \quad (6)$$

$$Q_{bin}^{IN} = \sum_{g=1}^G Q_{bjng} \times (1 - \delta_g) + \sum_{n=1}^{N^T} \sum_{m=1}^M F_{bnm}^{T-B} \quad \forall b \in B^{PF}, j \in J, n \in N^T \quad (7)$$

### 2.2.1.3. Restricciones asociadas a los centrales tributarios y bioeléctricas

El total de biomasa (caña de azúcar) a moler por caca central procedente de los nodos suministradores se determina mediante la expresión (8). Por su parte, la cantidad de biomasa (bagazo) sobrante de los centrales se determina mediante la ecuación (9), obsérvese que para el cálculo del bagazo obtenido se tiene en cuenta el contenido de humedad y el porcentaje de fibra en caña, además del consumo de bagazo por la caldera. La expresión (10) modela la producción de vapor de acuerdo a la cantidad de bagazo consumido mediante la introducción del término  $RC_g$  que representa la relación entre la entalpia de vapor producido, la eficiencia de la caldera y el poder calórico inferior del bagazo. La entrega al SEN de energía por cada central tributarios/bioeléctricas se modela mediante la expresión (11), la cual está en base a la generación bruta de electricidad en zafra de cada central y de la demanda de energía del proceso. Por su parte las expresiones (12) (13) son restricciones de capacidad de vapor y generación de electricidad respectivamente.

$$Q_{bin}^{IN} = \sum_{n=1}^{N^S} \sum_{m=1}^M F_{bnm}^{N-N^*} \quad \forall b \in B^{MP}, i \in I, n \in N^T \cup N^B \quad (8)$$

$$Q_{bin}^{OUT} = \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^{B^{MP}} \left[ Q_{bin}^{IN} \times H \times \frac{Fibra_b}{1 - MC_b} - Q_{bin}^{boiler} \right] \quad \forall b \in B^{PI}, i \in I, n \in N^T \cup N^B \quad (9)$$

$$VAP_{ing} = \sum_{b=1}^{B^{PI}} Q_{bin}^{boiler} \times RC_g \quad \forall i \in I, g \in G, n \in N^T \cup N^B \quad (10)$$

$$EE_{in}^{zafra} = EG_{in}^{zafra} - \sum_{g=1}^G \sum_{b=1}^{B^{MP}} Q_{bin}^{IN} \times CFE_g - D_{ie} \quad \forall i \in I, n \in N^T \cup N^B \quad (11)$$

$$VAP_{ing} \leq VAPMax_g \times H \times Y_{ing} \quad \forall i \in I, g \in G, n \in N^T \cup N^B \quad (12)$$

$$EG_{in}^{zafra} \leq PI_{in} \times H \times Y_{ing} \quad \forall i \in I, n \in N^T \cup N^B \quad (13)$$

La generación de electricidad de la bioeléctricas fuera de zafra se realizará con biomasa pretratada (bagazo o paja) sobrante del periodo de zafra o una mezcla de ellas, por tanto, su modelación debe tener en cuenta estos aspectos que difieren de la generación durante zafra. La expresión (14) establece la relación de flujo de biomasa pretratada procedente de los centrales tributarios y del excedente de la operación misma de cada bioeléctrica, la cual le da un sentido de **pull** a la CS. El resto de las expresiones (15) a (18) son similares a las restricciones durante el periodo de zafra solo que como no se produce azúcar las demandas de vapor y energía a proceso son nulas.

$$Q_{bin}^{IN-off} \leq \sum_{g=1}^G Q_{bing}^{boiler-off} \times H \quad \forall b \in B^{PF}, i \in I, n \in N^B \quad (14)$$

$$VAP_{ing}^{off} = \sum_{b=1}^{B^{PF}} Q_{bin}^{boiler-off} \times RC_g \quad \forall i \in I, g \in G, n \in N^B \quad (15)$$

$$VAP_{ing}^{off} \leq VAPMax_g \times H \quad \forall i \in I, g \in G, n \in N^B \quad (16)$$

$$EE_{in}^{zafra-off} = EG_{in}^{zafra-off} - D_{ie} \quad \forall i \in I, n \in N^B \quad (17)$$

$$EG_{in}^{zafra-off} \leq PI_{in} \times H \quad \forall i \in I, n \in N^B \quad (18)$$

### 2.2.1.3. Restricciones relacionadas con la actividad de transporte

Para realizar la asignación entre nodos se crea la variable binaria  $A_{nn'}$  que toma valor 1 si se asigna el nodo  $n \in N$  al nodo  $n' \in N$ . La restricción (19) garantiza que a un tributario solo sea asignado a una bioeléctrica. La expresión (20) es una restricción de estructura de la red que garantiza que no halla envío entre dos nodos que no estén relacionadas. La restricción (21) es una restricción lógica de flujo de transporte que asegura de que no hay enlaces entre ubicaciones sin envíos reales durante todos los periodos.

$$\sum_{n'}^{N^B} A_{nn'} \leq 1 \quad \forall n \in N^T \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^B F_{bnn'm}^{N-N'} \leq BM * A_{nn'} \quad \forall n \in N, n' \in N \quad (20)$$

$$A_{nn'} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^B F_{bnn'm}^{N-N'} \quad \forall n \in N, n' \in N \quad (21)$$

El siguiente conjunto de restricciones permiten calcular de forma agregada el número de viajes por tipo de medio de transporte. La expresión (22) determina el número de viajes en base a la capacidad volumétrica de transportación de cada tipo de medio de transporte, mientras que la expresión (23) es una limitante en base la capacidad estática de transportación. Un hecho digno de mención es que,  $N_{nn'm}^{viajes}$ , debe ser un número entero positivo,  $N_{nn'm}^{viajes} \in \mathbb{Z}^+$ . Por lo tanto, los números decimales deben redondearse al número entero mayor más cercano. Las funciones *Ceil*  $\lceil \cdot \rceil$  se utilizan como la expresión matemática para este proceso de redondeo. Las ecuaciones (22) y (23) pueden usarse indistintamente en base al factor limitante. En general, los materiales de alta densidad alcanzarán el límite de peso antes de llenar toda la capacidad de volumen disponible (limitación de peso). Por el contrario, el material de baja densidad ocupará por completo el espacio antes de exceder el límite de peso (limitación de volumen). Por lo tanto, es importante identificar qué parámetro es el factor limitante del problema, para modelarlo con las ecuaciones correctas.

$$N_{nn'm}^{viajes} \geq \left\lceil \frac{\sum_{m=1}^M F_{bnn'm}^{N-N'} \times [(1 - MC_b) \times BWB_b]^{-1}}{VCMT_m} \right\rceil \quad \forall m \in M, n \in N, n' \in N \quad (22)$$

$$N_{nn'm}^{viajes} \geq \left\lceil \frac{\sum_{m=1}^M F_{bnn'm}^{N-N'} \times (1 - MC_b)^{-1}}{WCMT_m} \right\rceil \quad \forall m \in M, n \in N, n' \in N \quad (23)$$

De forma análoga, mediante la expresión (24) permite determinar la cantidad de medio de transporte a asignar en un flujo específico entre nodos. La restricción (25) muestra que el número de medio de transporte requerido para transportar biomasa entre nodos debe ser igual a la cantidad de medios de transporte disponibles,  $Max_m$  mas,  $N_m^{medioT}$ , que es una variable entera que se introduce para determinar la cantidad de nuevos medios de transporte necesarios, lo cual permite determinar la inversión en medios de transporte.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^B F_{bnn'm}^{N-N^*} \leq \sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^B [N_{nn'm}^{viajes} \times N_{nn'm}^{medioT}] \quad \forall n \in N, n^* \in N \quad (24)$$

$$\sum_{n^*=1}^{N^*} \sum_{n=1}^N N_{nn'm}^{medioT} = Max_m + N_m^{medioT} \quad \forall m \in M \quad (25)$$

### 2.2.2. Función objetivo

En el análisis se fija una capacidad máxima de las instalaciones. No se asume ningún ahorro de costos para tamaños de instalaciones más grandes a través de economías de escala, porque las operaciones están limitadas por capacidades de equipo finitas, que son comercialmente disponible. La expresión (26) determinan el costo de inversión en los RPBD, donde,  $\alpha$  es el costo capital de inversión de determinada tecnología. Este componente de costo incluye el costo total del equipamiento de capital fijo, otros directos (por ejemplo, mejoras en el patio, terrenos, edificios, etc.) y costos indirectos (por ejemplo, ingeniería y supervisión, construcción gastos, honorarios del contratista, contingencia, etc.) para determinar la total inversión de capital. El costo de operación de cada RBPD se calcula mediante la expresión (27), el costo de operación es función de la biomasa procesada en cada RBPD. Este costo incluye costo de propiedad y costo de reparación y mantenimiento (R&M) así como el costo de combustible y mano de obra.

$$J_j^C = \sum_{n=1}^{N^T \cup N^B} \sum_{g=1}^G \alpha_{jg} \times Y_{jng} \quad (26)$$

$$J_j^O = \sum_{n=1}^{N^T \cup N^B} \sum_{b=1}^{B^{PF}} \beta_{jg} \times Q_{bjn}^{out} \quad (27)$$

Las expresiones (29) determina el costo de inversión en los centrales el cual está en base a la potencia instalada. Mediante la ecuación (30) determinan el costo operativo en los centrales, donde,  $\alpha$  y  $\beta$  son los coeficientes de costo fijo y variable, respectivamente. El costo fijo se determina como un por ciento del costo de inversión, mientras que el costo variable depende de la cantidad de energía eléctrica generada. Para ello se introduce el termino,  $r_o$ , que es la fracción del costo operativo de la inversión total. En el caso de los centrales tributarios no se agregaría el último término de la expresión (30),  $GSEN_{in}^{off}$ , pues no operan fuera de zafra.

$$J_i^C = \sum_{n=1}^{N^T \cup N^B} \sum_{g=1}^G (CI_{ig} \times PI_{ing} \times Y_{ing}) \quad (29)$$

$$J_i^O = r_O \times \left[ \sum_{n=1}^{N^T \cup N^B} \sum_{g=1}^G (\alpha_{ig} \times PI_{ing}) \right] + \beta_{jg} \times (EG_{in}^{zafra} + EG_{in}^{zafra-off}) \quad (30)$$

En la expresión (31) los cuales están en base a una tarifa ,  $\alpha_{nn}$ , que tiene en cuenta la distancia de recorrido entre un nodo y otra. Esta expresión se encuentra básicamente en función de los flujos de biomasa transportados entre nodos.

$$J^{Transporte} = \sum_{n=1}^{N^T} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^B (\alpha_{nn} \times F_{bnnm}^{T-B}) \quad (31)$$

La ecuación (32) resume la función objetivo que describe los costos de inversión y los costos de operación del sistema en un período determinado, caracterizados por el conflicto existente entre la necesidad de operar tributarios, bioeléctricas e instalaciones de pretratamiento y almacenamiento, así como de los requerimientos de transportación entre los diferentes eslabones de la cadena. Este tipo de objetivos, ya sea en función del costo o de los ingresos, son explicados en la mayoría de los modelos para el diseño de la cadena de suministros consultados en el primer capítulo. Por tanto, en costo total:

$$Min(z) = \sum_{i=1}^I J_i^C + \sum_{j=1}^J J_j^C + \sum_{i=1}^I J_i^O + \sum_{j=1}^J J_j^O + J^{Transporte} \quad (32)$$

### 2.3. Caso de estudio

En correspondencia con la estrategia para validar la hipótesis de investigación propuesta en la introducción de la presente tesis, en este apartado se aplica parcialmente el modelo propuesto en la sección anterior tomando como objeto la Empresa Azucarera de Villa Clara (EAVC). El caso de estudio se basa en el esquema representado en la figura 2-2. Como se puede apreciar en esta figura, el núcleo del proceso de optimización consiste en el proceso de distribución de biomasa cañera (bagazo) de los centrales tributarios a las bioeléctricas.

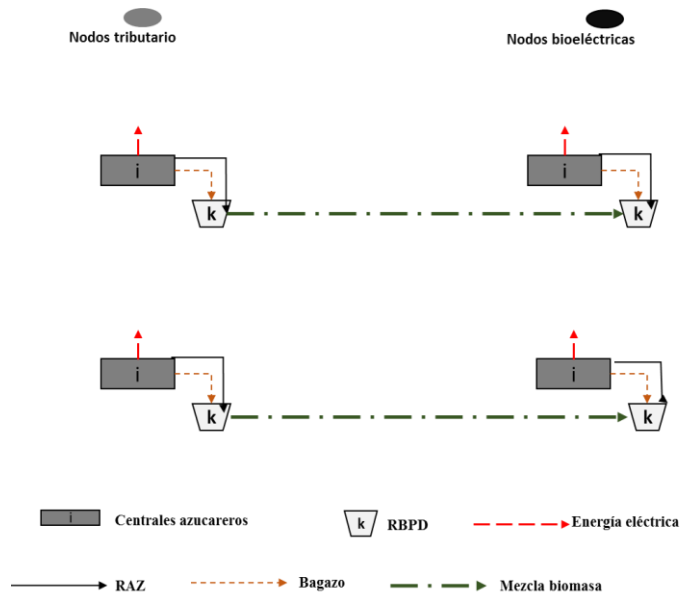


Figura 2-2. Representación generalizada de la CS en el caso de estudio

La provincia de Villa Clara cuenta con una Empresa Azucarera que incluye la tenencia de 10 centrales azucareros como se muestra en la figura 2-4, que van desde normas potenciales de molida de 2 500 a 4 600 t/día, y una potencia total instalada de 58 MWe. Su base energética solo permite una entrega de electricidad al sistema eléctrico nacional (SEN) de 18 782 MWh/zafra. El área cañera total cultivable en la provincia es de 117 688 ha lo que da una potencialidad de generación eléctrica muy superior, por disponibilidad de biomasa cañera, a la lograda en los últimos años.

Esta es, precisamente, la situación de la provincia de Villa Clara, la que tiene el mayor número de centrales del país (10) y en ella se proyectan tres bioeléctricas, una en el central Héctor Rodríguez, otra en el central George Washington y la última en el Quintín Banderas, todas de 20 MW.

Antes de comenzar con el proceso de solución del modelo y el análisis de los resultados obtenidos, conviene detallar los aspectos contenidos en la aplicación parcial que constituye el cumplimiento del tercer objetivo específico y con lo cual quedan satisfechos lo previsto en la Tesis de Maestría. Para ello se establecen sus diferencias con el modelo general tratado en el epígrafe 2.2. Estas son:

- La solución parcial del modelo contempla solo un tipo de biomasa: el bagazo.
- La localización de las plantas tributarias y plantas bioeléctricas es conocida, pero no se consideran los almacenes.
- Las cantidades de las plantas tributarias y plantas bioeléctricas son finitas y conocidas.
- La cantidad y capacidad de los medios de transporte y los costos de transportación son conocidos.

- No se consideran instalaciones de preprocesamiento.
- Los flujos solo son permitidos entre nodos tributarios y nodos bioeléctricas.
- Los costos fijos y variables de plantas tributarias y plantas bioeléctricas no son considerados.
- Las instalaciones solo abren con una tecnología.

Partiendo de las diferencias anteriores la solución parcial que se obtiene, posee como función objetivo: Minimizar los costos de totales que incluye: costo de transportación de bagazo de tributarios a bioeléctricas y costo por incumplimiento de la demanda de biomasa en el periodo fuera de zafra. Este último se determina a partir de la estimación de lo que se gastaría en combustible fósil, si no fuera posible garantizar bagazo para utilizar fuera de zafra. A diferencia del modelo presentado en el epígrafe 2.2, se incluye una nueva partida de costo relacionado con el incumplimiento de la demanda de biomasa en el periodo fuera de zafra. El modelo para el transporte de biomasa cañera para la cogeneración de energía (figura 2-2) considera un conjunto de nodos ( $n \in N$ ) en los cuales se ubican centrales tributarios ( $i \in I$ ) y bioeléctricas  $j \in J$ . Cada tributario suministra bagazo a la bioeléctrica utilizando el medio de transporte  $m \in M$ .

Por tanto, se obtiene un modelo de asignación que asigna siete centrales tributarios a tres bioeléctricas, de forma tal que el costo total de transportación y de incumplimiento de la demanda sea mínimo. Es necesario especificar que la asignación obtenida considerando solo estos costos puede cambiar cuando se analice el resto de las biomاسas, nodos y costos contemplados en el modelo del epígrafe 2.2, no obstante, constituye un acercamiento al resultado deseado en la tesis doctoral.

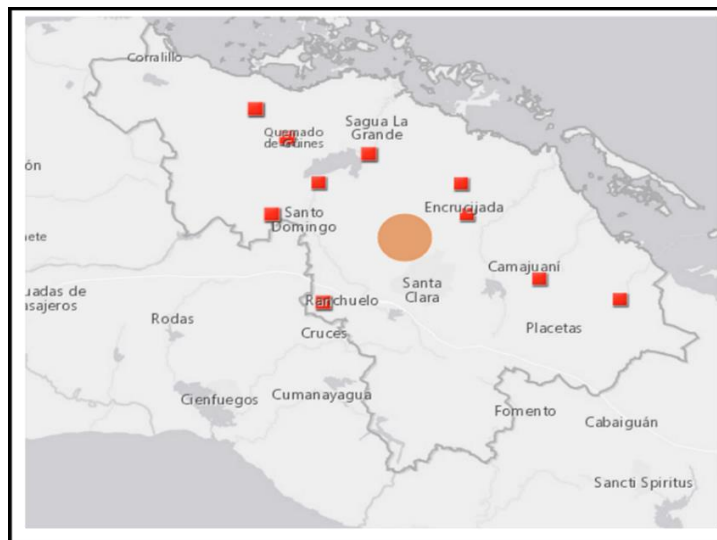


Figura 2-3. Localización de los centrales azucareros en la provincia de Villa Clara



Tabla 2-1. Índices de subíndice utilizados en el modelo

CONJUNTOS	DESCRIPCION
$t \in T$	Conjunto de tecnología de bioeléctrica
$m \in M$	Conjunto de medios de transporte
$n \in I$	Subconjunto de centrales tributarios
$n \in J$	Subconjunto de bioeléctricas

De acuerdo con la estructura CS mostrada en la Figura 2-3, el problema se ha formulado utilizando un MILP. Las variables de decisión y los parámetros de entrada del modelo propuesto se enumeran en las Tabla 2-1 y 2-2, respectivamente. Basándose en estos, los componentes restantes del modelo de optimización se describen a continuación.

La función objetivo que se muestra en la expresión (B.1), describe los costos de operación del sistema en un período determinado, caracterizados por el conflicto de disminuir costos de transporte de transportación entre los diferentes eslabones de la cadena y cumplir con los requerimientos de demanda de biomasa de las bioeléctricas. Este tipo de objetivos, ya sea en función del costo o de los ingresos, son explicados en la mayoría de los modelos para el diseño de la cadena de suministros consultados en el primer capítulo.

$$Min(z) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I CUT_{ij} * \sum_{m=1}^M F_{ijm} + \sum_{j=1}^J Y_j^t * SD_j^- * Ce\_SEN * CCF * C \quad (B.1)$$

Los costos de transportación por tonelada-kilómetro recorrido de cada medio de transporte se muestran en el primer factor de la expresión (B.1) los cuales están en base a una tarifa ( $CUT_{ij}$ ) que tiene en cuenta la distancia de recorrido entre una instalación y otra. Esta expresión se encuentra básicamente en función de los flujos de biomasa entre tributarios y bioeléctricas transportados, se expresa en unidades monetarias como resultado de la multiplicación del costo de transporte ( $CUT_{ij}$ ) por la cantidad de bagazo a consumir fuera de zafra ( $F_{ijm}$ ). Finalmente, el último factor de la función objetivo penaliza la función objetivo en cuanto a la demanda de bagazo insatisfecha fuera de zafra, la cual se relaciona con la cantidad de MWh que se deja de generar y su costo equivalente por generarlo con combustible fósil.

Tabla 2-2. Parámetros de entrada y variables de decisión

SÍMBOLO	DESCRIPCION	UNIDAD
<b>Parámetros</b>		
$CUD_j$	Costo por insatisfacción de la demanda de bioeléctrica $j$	MMUSD
$PE$	Precio de venta de electricidad	USD/ MWh
$PI_i$	Potencia instalada del central tributario $i$	MW
$PI_j^t$	Potencia instalada de bioeléctrica $j$	MW
$IG_i$	Índice de generación del central tributario $i$	kWh/tcaña
$IG_j^t$	Índice de generación de bioeléctrica $j$ con tecnología $t$	kWh/tcaña
$ICI_i$	Índice de consumo interno del central tributario $i$	kWh/tcaña
$ICI_j^t$	Índice de consumo interno de bioeléctrica $j$ con tecnología $t$	kWh/tcaña
$C$	Constante de bagazo tributario	MWh/tcaña
$CUT_m$	Costo variable de transportación desde el central tributario $i$ y la bioeléctrica $j$	\$/t
$CMOL_i$	Caña molida por el central tributario $i$	t_caña/zafra
$CMOL_j$	Caña molida por bioeléctrica $j$	t_caña /zafra
$QB_i$	Cantidad de bagazo sobrante en central tributario $i$	t_bagazo/zafra
$D_j$	Demanda de bagazo fuera de zafra de bioeléctrica $j$	t/h
$GB_j^t$	Generación bruta de bioeléctrica $j$ con tecnología $t$	MWh/zafra
$GB_i$	Generación bruta el central tributario $i$	MWh/zafra
$E\_SEN_j^t$	Entrega de energía al SEN de bioeléctrica $j$ con tecnología $t$	MWh/año
$E\_SEN_i$	Entrega de energía al SEN del central tributario $i$	MWh/zafra
$Ce\_SEN$	Consumo Especifico del SEN	tcomb/GWh
$CCF$	Costo combustible fósil	USD/ tcomb
<b>Variables</b>		
$F_{ijm}$	Flujo de bagazo entre tributario $i$ y bioeléctrica $j$	t/año
$SD_j^-$	Demanda insatisfecha de bagazo de bioeléctrica $j$	t/año
$HD_j^+$	Suministro de bagazo por encima de demanda de bioeléctrica $j$	t/año
$Y_j^t$	Variable binaria, 1 si se opera bioeléctrica $j$ 0 lo contrario	[0,1]
$X_i$	Variable binaria, 1 si se opera central tributario $i$ , 0 lo contrario	[0,1]
$TR_{ijm}^t$	Variable entera, cantidad de medios de transporte $m$ a utilizar entre el central tributario $i$ y bioeléctrica $j$ , 0 lo contrario	[0,1]
$A_{ijm}^t$	Variable binaria, 1 si se establece vínculo entre central tributario $i$ y bioeléctrica $j$ con el medio de transporte $m$ 0 lo contrario	[0,1]

Las restricciones del modelo se presentan a partir de las ecuaciones (B.2) hasta la ecuación (B.9). Las expresiones (B.2 y B.3) son para realizar la asignación a partir del uso de la variable binaria auxiliar  $A_{ij}^t$ . La expresión (B.2) asegura que cada bioeléctrica tenga al menos un tributario asignado. De acuerdo con la expresión (B.3) cada tributario solo puede ser asignado a una bioeléctrica.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M A_{ijm} \geq 1 \quad \forall j \in J \quad (\text{B.2})$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M A_{ijm} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (\text{B.3})$$

La expresión (B.4) es una restricción de estructura de la red que garantiza que no halla envío entre dos locaciones que no estén relacionadas, se utiliza el método clásico de la *Big-M* para resolver el problema de la no linealidad. El parámetro  $M$  se ajusta generalmente utilizando un valor enorme. La restricción (B.5) es una restricción lógica de flujo de transporte que asegura que no hay enlaces entre ubicaciones sin envíos reales durante todos los períodos.

$$F_{ijm} \leq BM * A_{ijm} \quad \forall j \in J, i \in I, m \in M \quad (\text{B.4})$$

$$A_{ijm} \leq F_{ijm} \quad \forall j \in J, i \in I, m \in M \quad (\text{B.5})$$

El siguiente conjunto de restricciones son limitaciones de la capacidad de transporte. La expresión (B.6) limita la capacidad volumétrica de transportación de cada tipo de medio de transporte entre nodos. La restricción (B.7) muestra que el número de medio de transporte ( $N_m^t$ ) requerido para transportar biomasa entre nodos no puede exceder la cantidad de medios de transporte disponibles.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \frac{F_{ijm}}{(1 - MC_b)BDW_b} \leq VCMT_m * N_m \quad \forall m \in M \quad (\text{B.6})$$

$$N_m \leq Max_m \quad \forall m \in M \quad (\text{B.7})$$

Las siguientes expresiones son las clásicas de los problemas de transporte. La expresión (B.8) asegura que el flujo de bagazo no debe exceder generación del mismo en los centrales tributarios. La restricción (B.9) establece una relación entre la producción de bagazo y la demanda proyectada. Obsérvese, que se han creado dos variables de holgura para representar la factibilidad del modelo en cuanto a la relación oferta–demanda.  $SD_j^-$  toma valor cuando la demanda no ha sido satisfecha, aspecto a tener en cuenta como factor de penalización en la función objetivo y  $HD_j^+$  toma valor cuando la generación de electricidad supera la demanda proyectada.

$$\sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M F_{ijm} \leq QB_i \quad \forall i \in I \quad (\text{B.8})$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{m=1}^M F_{ijm}^t + QB_j + SD_j^- \leq D_j \quad \forall j \in J \quad (\text{B.9})$$

Al final del modelo es necesario establecer los límites de las variables: todas las variables que representan flujos son continuas y mayores o iguales que 0, las variables que constituyen las holguras son continuas, mayores que 0 y las binarias son enteras, mayor o igual a 0 y menor o igual que 1.

Las características principales y parámetros operacionales de las bioeléctricas adoptados en las bases del proyecto se muestran en la tabla 2-3. Algunos de los parámetros presentado en la tabla 2-2 se calculan a partir de otros parámetros sin intervención de variables de decisión. A continuación, se enuncian las expresiones que se utilizan para su determinación.

Tabla 2-3 Características principales de las bioeléctricas de referencia

Características	Unidad medida	CEST			CEST		
		20 Mw	67 bar	520°C	20 Mw	87 bar	530°C
Norma potencial	t_caña/d	4600			4600		
Aprovechamiento norma potencial	%	80			80		
Tiempo calendario de zafra	días	130-150			130-150		
Tiempo fuera zafra para diseño	días	80-100			80-100		
Índice de generación ( $IG_j^t$ )	kWh/t_caña	141			151		
Índice de consumo interno ( $ICI_j^t$ )	kWh/t_caña	35			35		
Relación vapor/bagazo ( $RVB$ )	t_vapor/t_bagazo	2.20			2.20		
Demanda vapor a proceso ( $DVP$ )	t_vapor/t_caña	0.45			0.45		

Fuente: Documento proyecto evaluación de alternativas para el desarrollo energético sostenible de la EAVC, CEST: Turbina de Extracción Condensación.

El primer parámetro a calcular es el bagazo sobrante de los centrales tributarios, de acuerdo con (Tapia\_Carpio and Simone De Souza, 2017), el cálculo de bagazo sobrante se realiza mediante la expresión (B.10) . Para la determinación de la relación caña bagazo la cantidad, se asume la propuesta de (Pippo and Luengo, 2013) el cual establece  $Bagazo_{50\% humedad} = 270kg / t\_caña$ . De forma similar se determinan la generación bruta y la entrega de energía al SEN mediante las expresiones (B.11- B.14), para las bioeléctricas y tributarios, respectivamente.

$$QB_i = \frac{0.270 * CMOL_t * DVP}{RVB} \quad \forall i \in I \quad (\text{B.10})$$

$$GB_j^t = IG_j^t * CMOL_j \quad \forall j \in J \quad (\text{B.11})$$

$$GB_i = IG_i * CMOL_t \quad \forall i \in I \quad (\text{B.12})$$

$$E\_SEN_j^t = IG_j^t * CMOL_j - ICI_j^t * CMOL_j \quad \forall j \in J \quad (\text{B.13})$$

$$E - SEN_i = IG_i * CMOL_t - ICI_i * CMOL_t \quad \forall i \in I \quad (\text{B.14})$$

El medio de transporte establecido es mediante camiones, diferentes tipos de camiones pueden ser utilizados su disponibilidad y capacidad se presenta en la tabla 2-4. Las distancias de transporte fueron obtenidas de documentos de la empresa, lo que implica que las distancias reales de transporte se consideran. Estas distancias consideran las direcciones de circulación y las restricciones de viabilidad. La tabla 2-3 muestra las distancias medias entre centrales y los valores de las tarifas de costo de transporte entre centrales, estas tarifas dependen del medio de transporte y de la distancia a recorrer, por tanto, lo que se tiene en cuenta en la función objetivo en el parámetro costo/distancia.

Tabla 2-4. Características de los camiones disponibles.

Medio de transporte	Cantidad	Capacidad estática (t)
Kamaz	56	18
Kamaz remot	28	27
Camión chino	10	30
Super Kmaz	4	42
Zinotruck	45	55
Zil	198	11

Fuente: Empresa Tranzmec Villa Clara

El modelo se resuelve con un Intel Core CPU i5 de 2,50 giga Hertz con 8 gigabytes de RAM en una plataforma de 64 bits. Los modelos generados para los escenarios considerados contienen entre 108 y 232 restricciones, gobernando entre 90 y 250 variables de decisión e incluyendo entre 18 y 50 variables binarias. Los tiempos de solución oscilan entre 0,5 y 1 minutos dependiendo del escenario, considerando una tolerancia de la solución entera óptima establecida en uno por ciento. Según (Combined Heat and Power Partnership, 2017) los costos de operación y mantenimiento variable y fijo para ambas formas de operación de las bioeléctricas son de 4 USD/MWh y 2%, respectivamente. Los parámetros de los tributarios utilizados se muestran en la tabla 2-4. El resto

## Capítulo 2. Comprobación de la hipótesis de investigación

de los parámetros asociados a las bioeléctricas son tomados de las bases del proyecto evaluación de alternativas para el desarrollo energético sostenible de la EAVC. En el caso de las bioeléctricas la caña molida de los centrales Quintín Bandera, Héctor Rodríguez y George Washington son 586500, 591290 y 586500 toneladas de caña, respectivamente.

Tabla 2-3. Matriz de distancia y tarifa de transporte entre centrales azucareros

Matriz de distancia entre centrales azucareros en Villa Clara (km)										
	Abel Santamaría	Panchito G Toro	Efraín Alfonso	Heriberto Duquesne	Hector Rodríguez	Perucho Figueredo	Carlos Baliño	José María	Washington	Quintín Banderas
Abel Santamaría		57	56	52	33	11	63	27	55	68
Panchito G Toro	57		72	109	25	54	40	84	37	20
Efraín Alfonso	56	72		83	55	64	49	60	40	75
Heriberto Duquesne	52	109	83		85	63	111	25	103	120
Hector Rodríguez	33	25	55	85		62	54	60	46	36
Perucho Figueredo	11	54	64	63	62		62	37	53	63
Carlos Baliño	63	40	49	111	54	62		87	15	43
José María	27	84	60	25	60	37	87		78	40
Washington	55	37	40	103	46	53	15	78		40
Quintín Banderas	68	20	75	120	36	63	43	95	40	
Matriz de tarifa de transportación entre centrales azucareros en Villa Clara (\$/t)										
	Abel Santamaría	Panchito G Toro	Efraín Alfonso	Heriberto Duquesne	Hector Rodríguez	Perucho Figueredo	Carlos Baliño	José María	Washington	Quintín Banderas
Abel Santamaría		11.5	11.33	10.66	7.47	14.99	12.51	30.32	11.17	13.34
Panchito G Toro	11.5		14.02	20.24	28.4	10.99	8.64	16.03	8.14	23.62
Efraín Alfonso	11.33	14.02		10.87	11.17	12.67	10.16	12	8.64	14.53
Heriberto Duquesne	10.66	20.24	10.87		16.21	12.51	20.58	28.4	19.23	22.08
Hector Rodríguez	7.47	28.4	11.17	16.21		12.34	10.99	12	9.65	7.97
Perucho Figueredo	14.99	10.99	12.67	12.51	12.34		12.34	8.14	10.83	12.51
Carlos Baliño	12.51	8.64	10.16	20.58	10.99	12.34		16.54	18.83	9.15
José María	30.32	16.03	12	28.4	12	8.14	16.54		15.02	8.64
Washington	11.17	8.14	8.64	19.23	9.65	10.83	18.83	15.02		8.64
Quintín Banderas	13.34	23.62	14.53	22.08	7.97	12.51	9.15	17.89	8.64	

Fuente: Empresa Tranzmetro Villa Clara

Tabla 2-4. Parámetros de entrada al modelo referido a los centrales tributarios

Índice	UEB Azucarera	$ICI_i$	$IG_i$	$PI_i$	$CMOL_i$
		kWh/tcaña	kWh/tcaña	MW	t_caña/zafra
i1	Abel Santamaría	31	36	4.5	355200
i2	Panchito Gómez	27.4	36	6.5	451200
i3	Carlos Baliño	29.5	30	3	163200
i4	Efraín Alfonso	26.3	31.3	6	510409
i5	Heriberto Duquesne	24.8	25	4.5	376894
i6	Perucho Figueredo	33.2	36	6	477768
i7	José María	31.5	34	6	487419

Fuente: Documento proyecto evaluación de alternativas para el desarrollo energético sostenible de la EAVC. (ver significado de los términos en la tabla 2-2)

## 2.4. Análisis de resultados

Después de ejecutar el modelo propuesto implementado en una plataforma Excel\_GAMS, como se puede apreciar en anexo 2, se obtienen los siguientes resultados para el caso de estudio. Una ilustración gráfica, figura 2-4, permite determinar el flujo de materiales a través de la red y la alternativa asignación que menos costo presenta. Los principales resultados se resumen en la tabla 2-5. La asignación establecida como resultado del modelo tiene un costo total equivalente a 1.815 MMUSD/año y una entrega neta de energía al SEN igual a 379 GWh/Año, no existe costo de oportunidad o penalización por dejar de generar bio-electricidad y consumir combustible fósil. Otro de los resultados del modelo es la asignación de medios de transporte por cada una de las vías de conexión establecidas entre un tributario y una bioeléctrica. Los enlaces de distribución de bagazo que más tráfico generan están relacionados con la bioeléctrica George Washington con el tributario Efraín Alfonso y bioeléctrica Héctor Rodríguez con los tributarios Perucho Figueredo y José María pues son los que más bagazo generan a partir de su caña a moler estimada.

Tabla 2-5. Escenarios analizados para el parámetro caña molida

Escenarios	Costo total	Costo Transportación	Costo UD	Generación Bruta	Entrega neta SEN
	MMUSD/año	MMUSD/año	MMUSD/año	GWh/año	GWh/año
Escenario base (A)	1.815	1.815	0	473	329
Escenario B (-30%)	1.089	1.089	0	284	228
Escenario C (-60%)	0.646	0.559	0.088	142	102

Una de las barreras en el desarrollo de una industria de bioenergía es la incertidumbre en la disponibilidad de biomasa. El modelo propuesto, como modelo determinista, no puede considerar esta incertidumbre. Una forma adecuada de abordar esta limitación es realizar un análisis de sensibilidad. Para investigar el efecto de la producción incierta de bagazo para cogeneración en la configuración de la cadena de suministro, en la tabla 2-7 así como en la figura 2-4 se muestran algunos de los resultados de los tres escenarios considerados. Estos son: el escenario base (resultado del modelo reflejado en el anexo 2) y otros dos escenarios proyectados considerando una variación de un 30 y 60 por ciento por debajo la proyección de caña a moler realizada por AZCUBA, coincidente con el escenario base.

Los resultados muestran que en para los escenarios base y A la asignación es la misma, mientras que para el escenario B cuya generación de bagazo es por debajo del 60% de lo proyectado la asignación de centrales tributarios a bioeléctricas varía. En cuanto a la entrega neta de energía al

SEN se observa que en los escenarios A y B este indicador disminuye lo cual resulta lógico debido a la disminución de la caña molida. De forma global el costo de transportación representa el total de los costos considerados excepto en el escenario C donde representa un 87% de los costos totales y el costo por demanda insatisfecha es de alrededor de un 14%. Del mismo modo la organización de la actividad de transporte es altamente sensible a cambios en el flujo material entre instalaciones pues esto genera más tráfico entre instalaciones lo cual repercute en la asignación de medios de transporte (ver figura 2-4). Un resumen de todos los resultados conjuntos de los escenarios aparece en el anexo 3.

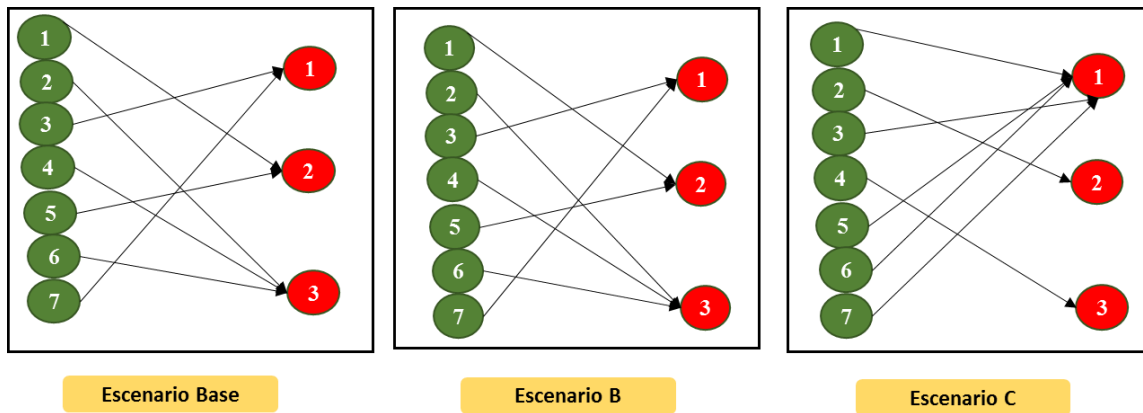


Figura 2-4. Representación de la asignación de centrales tributarios a bioeléctricas en la provincia de Villa Clara. (ver significado de los términos anexo 3)

Basándose en los resultados presentados se pueden concluir que el comportamiento gradual de los ingresos económicos y del combustible fósil ahorrado, en todos los escenarios analizados proporciona evidencias para asegurar que el futuro del mercado de la bioenergía a partir de biomasa cañera parece ser prometedor.

## 2.5. Conclusiones parciales

1. En correspondencia con la hipótesis de investigación planteada se propuso un modelo de optimización para el diseño de CS para cogeneración a partir de biomasa cañera que responde a las características del caso de Cuba. El modelo matemático contempla el uso de múltiples tipos de biomasa; permita realizar la la asignación (tributario a bioeléctrica o) en un contexto de CS, soporte decisiones estratégicas (tecnología de instalaciones de conversión y pretratamiento) y tácticas (organización del transporte y los flujos materiales).
2. De acuerdo a la estrategia de comprobación de la hipótesis planteada, se realizó una aplicación parcial del modelo propuesto que tuvo como función objetivo: Minimizar los costos que incluye:



costo de transportación de bagazo de tributarios a bioeléctricas, y costo por incumplimiento de la demanda de biomasa en el periodo fuera de zafra. El resultado de la aplicación parcial del modelo permitió obtener la asignación de centrales tributarios a bioeléctricas, así como la asignación de medios de transporte entre nodos y el flujo optimo entre instalaciones obteniéndose como resultado óptimo un costo total equivalente a 1.815 MMUSD/año.

**3.** En el análisis de sensibilidad realizado solo en el escenario C varía la asignación realizada respecto al escenario base. Además, se pudo comprobar que solo en el escenario C existe demanda insatisfecha de biomasa para generar electricidad fuera de zafra y el costo de transporte es en todos los escenarios el que mayor impacto tiene en los costos totales de la CS.

## COCLUSIONES GENERALES

---

1. Las BSC tienen obstáculos específicos únicos que son diferentes de las otras CS tradicionales y hacen que su modelación sea todo un desafío. En este sentido la revisión de la literatura permitió concluir que el estudio del diseño de las BSC, generalmente suelen considerar la optimización de funciones objetivo de tipo económico y, en menor medida, vinculan aspectos de tipo social y ambiental. Igualmente, el tratamiento de la incertidumbre y el uso de enfoques que integren soluciones exactas o heurísticas, son los aspectos con mayor potencial para modelar BSC más representativas de la realidad.
2. El modelo matemático propuesto para el diseño de CS para cogeneración a partir de biomasa cañera permite solucionar el problema planteado en la presente investigación por lo que constituye su principal aporte científico. Los desafíos de diseño en el caso de Cuba propiciaron que el modelo propuesto integra objetivos económicos, soporte varias decisiones tácticas y estratégicas como localización, asignación, capacidad y tecnología de instalaciones, así como diseño del flujo material y asignación de transporte. Además, se integra al diseño el de conceptos **RBPD** de mucho interés por la comunidad científica.
3. Se consiguió probar la utilidad práctica del modelo propuesto, mediante su aplicación parcial en un caso de estudio, tomando como objeto la Empresa Azucarera de Villa Clara. La confección de herramientas integradas de GAMS y EXCEL, facilitó la solución a través de los métodos presentados, lo que garantiza, además, su posible utilización para el diseño de otras cadenas que cumplan con los supuestos del modelo. Lo anterior permite confirmar la veracidad de la hipótesis general de la investigación planteada.
4. El modelo propuesto, como modelo determinista, no puede considerar la incertidumbre, una forma adecuada de abordar esta limitación es realizar un análisis de sensibilidad. En el caso de estudio se realiza este análisis tomando como referencia la incertidumbre en la disponibilidad de biomasa lo que permitió evidenciar su impacto en los resultados del modelo.

Basado en los resultados de la investigación y en la revisión de la literatura realizada, a continuación, se enuncian un conjunto de futuras investigaciones que permiten dar continuidad a la presente investigación como sustento de una investigación doctoral

1. En cuanto al enfoque de modelado un número limitado de publicaciones tienen en cuenta simultáneamente los aspectos económico, ambiental y social. El desarrollo de modelos que tengan en cuenta estas tres aristas tienen un amplio potencial de investigación
2. El desarrollo de metodologías de solución es un reto para este tipo de problemas que diseñan CS de biomasa por la complejidad computacional de estos problemas. El desarrollo de algoritmos de solución exactos como los métodos de descomposición y métodos híbridos son las direcciones de investigación más atractivas.
3. Otro aspecto importante para continuar la investigación, lo constituye la necesidad de analizar la incertidumbre, la escasa proporción de modelos no deterministas es una indicación de falta de voluntad debido a las complicaciones computacionales en sus aplicaciones. Los investigadores aplican enfoques estocásticos para manejar las incertidumbres, sin embargo, la lógica difusa y la optimización robusta, son enfoques útiles que pueden utilizarse para hacer frente a la incertidumbre de los datos.
4. Finalmente, para el caso de Cuba, al igual que en otros países con gran desarrollo del sector, la creación de una herramienta con soporte informático de apoyo a la decisión para diseñar y evaluar la cadena de suministro sostenible de biomasa para la cogeneración de energía utilizando técnicas avanzadas de modelado matemático.

- Abreu Elizundia, H. *et al.* (2016) 'Evaluación de esquemas de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar', *Centro Azúcar*. Universidad Central 'Marta Abreu' de Las Villas, 43(1), pp. 87–98.
- Alonso-Pippo, W. *et al.* (2008) 'Sugarcane energy use: The Cuban case', *Energy Policy*. Elsevier, 36(6), pp. 2163–2181. doi: 10.1016/j.enpol.2008.02.025.
- Alonso-Pippo, W. *et al.* (2009) 'Cogeneration and bio-oil production starting from sugarcane biomass residues: barriers, challenges and opportunities', *Open Fuels & Energy Science Journal*. Bentham Science Publishers B. V., P. O. Box 1673 Hilversum 1200 BR Netherlands, 2, pp. 34–39.
- Alonso-Pippo, W. *et al.* (2009) 'Energy recovery from sugarcane biomass residues: Challenges and opportunities of bio-oil production in the light of second generation biofuels', *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(6), p. 63102. doi: 10.1063/1.3259170.
- Alonso Pippo, W., Garzone, P. and Cornacchia, G. (2007) 'Agro-industry sugarcane residues disposal: The trends of their conversion into energy carriers in Cuba', *Waste Management*. Pergamon, 27(7), pp. 869–885. doi: 10.1016/j.wasman.2006.05.001.
- An, H., Wilhelm, W. E. and Searcy, S. W. (2011) 'Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review', *Biomass and Bioenergy*, 35(9), pp. 3763–3774. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.06.021.
- Awudu, I. and Zhang, J. (2012) 'Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), pp. 1359–1368. doi: 10.1016/j.rser.2011.10.016.
- Ayoub, N. *et al.* (2007) 'Two levels decision system for efficient planning and implementation of bioenergy production', *Energy Conversion and Management*, 48(3), pp. 709–723. doi: 10.1016/j.enconman.2006.09.012.
- Azadeh, A., Vafa Arani, H. and Dashti, H. (2014) 'A stochastic programming approach towards optimization of biofuel supply chain', *Energy*, 76, pp. 513–525. doi: 10.1016/j.energy.2014.08.048.
- Ba, B. H., Prins, C. and Prodhon, C. (2015) 'Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains : An Operations Research perspective', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, pp. 1–13. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.045.
- Ba, B. H., Prins, C. and Prodhon, C. (2016) 'Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective', *Renewable Energy*. ICD-LOSI, Université de Technologie de Troyes (UTT), CS 42060, Troyes, France, 87, pp. 977–989. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.045.
- Bairamzadeh, S., Pishvae, M. S. and Saidi-Mehrabad, M. (2016) 'Multiobjective Robust Possibilistic

Programming Approach to Sustainable Bioethanol Supply Chain Design under Multiple Uncertainties’, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(1), pp. 237–256. doi: 10.1021/acs.iecr.5b02875.

Baños, R. *et al.* (2011) ‘Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), pp. 1753–1766. doi: 10.1016/j.rser.2010.12.008.

Boloori Arabani, A. and Farahani, R. Z. (2012) ‘Facility location dynamics: An overview of classifications and applications’, *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), pp. 408–420. doi: 10.1016/j.cie.2011.09.018.

Börjesson, M. and Ahlgren, E. O. (2010) ‘Biomass gasification in cost-optimized district heating systems—A regional modelling analysis’, *Energy Policy*, 38(1), pp. 168–180. doi: 10.1016/j.enpol.2009.09.001.

Brandenburg, M. *et al.* (2014) ‘Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions’, *European Journal of Operational Research*, 233(2), pp. 299–312. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>.

Camero, C. *et al.* (2015) ‘Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain’, *International Journal of Energy Research*. Wiley Online Library, 39(4), pp. 439–452. doi: 10.1002/er.3233.

Caputo, A. C. *et al.* (2005) ‘Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables’, *Biomass and Bioenergy*, 28(1), pp. 35–51. doi: 10.1016/j.biombioe.2004.04.009.

Castillo-villar, K. K. (2014) ‘Metaheuristic Algorithms Applied to Bioenergy Supply Chain Problems: Theory, Review, Challenges, and Future’, *Energies*, (2), pp. 7640–7672. doi: 10.3390/en7117640.

Chaabane, A., Ramudhin, A. and Paquet, M. (2012) ‘Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme’, *International Journal of Production Economics*, 135(1), pp. 37–49. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.025>.

Chen, L., Olhager, J. and Tang, O. (2014) ‘Manufacturing facility location and sustainability: A literature review and research agenda’, *International Journal of Production Economics*, 149, pp. 154–163. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.05.013.

Chinese, D. and Meneghetti, A. (2005) ‘Optimisation models for decision support in the development of biomass-based industrial district-heating networks in Italy’, *Applied Energy*, 82(3), pp. 228–254. doi: 10.1016/j.apenergy.2004.10.010.

Combined Heat and Power Partnership (2017) ‘Catalog of CHP Technologies’, p. 150.

Council of supply chain Management (2007) *Council of supply chain management*. Available at: <http://cscmp.org/default.asp>.

Dantas, G. A., Legey, L. F. L. and Mazzone, A. (2013) ‘Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, pp. 356–364. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.080.

- Difs, K. *et al.* (2010) 'Biomass gasification opportunities in a district heating system', *Biomass and Bioenergy*, 34(5), pp. 637–651. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.01.007.
- Drezner, Z. and Hamacher, H. W. (2001) *Facility location: applications and theory*. Springer Science & Business Media.
- Dunnett, A., Adjiman, C. and Shah, N. (2007) 'Biomass to Heat Supply Chains: Applications of Process Optimization', *Process Safety and Environmental Protection*, 85(5), pp. 419–429. doi: 10.1205/psep07022.
- Ekşioğlu, S. D. *et al.* (2009) 'Analyzing the design and management of biomass-to-biorefinery supply chain', *Computers & Industrial Engineering*, 57(4), pp. 1342–1352. doi: 10.1016/j.cie.2009.07.003.
- Eranki, P. L. *et al.* (2013) 'The watershed-scale optimized and rearranged landscape design (WORLD) model and local biomass processing depots for sustainable biofuel production: Integrated life cycle assessments', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Michigan State University, Lansing, MI, United States, 7(5), pp. 537–550. doi: 10.1002/bbb.1426.
- Eskandarpour, M. *et al.* (2015) 'Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review', *Omega*, 54, pp. 11–32. doi: 10.1016/j.omega.2015.01.006.
- Farahani, R. Z. *et al.* (2014) 'Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications', *Omega*, 45, pp. 92–118. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.006>.
- Farahani, R. Z., SteadieSeifi, M. and Asgari, N. (2010) 'Multiple criteria facility location problems: A survey', *Applied Mathematical Modelling*, 34(7), pp. 1689–1709. doi: 10.1016/j.apm.2009.10.005.
- Gan, J. and Smith, C. T. (2010) 'Coupling greenhouse gas credits with biofuel production cost in determining conversion plant size', *Silva Fennica*. Dept. of Ecosystem Science and Management, Texas A and M University, Texas, United States, 44(3), pp. 497–510. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77956975215&partnerID=40&md5=f3a8a7ec76ab67903525a1d6c4394b65>.
- Gasol, C. M. *et al.* (2009) 'Feasibility assessment of poplar bioenergy systems in the Southern Europe', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), pp. 801–812. doi: 10.1016/j.rser.2008.01.010.
- Ghaderi, H., Pishvae, M. S. and Moini, A. (2016) 'Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis', *Industrial Crops and Products*. Elsevier B.V., 94, pp. 972–1000. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.09.027.
- Giarola, S., Zamboni, A. and Bezzo, F. (2011) 'Spatially explicit multi-objective optimisation for design and planning of hybrid first and second generation biorefineries', *Computers and Chemical Engineering*. CAPE-Lab - Computer-Aided Process Engineering Laboratory, Dipartimento di Principi e Impianti di Ingegneria Chimica, Università di Padova, Via Marzolo 9, I-35131 Padova, Italy, 35(9), pp. 1782–1797. doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.020.

- Gilmour, B. and Warren, J. (2007) *Advancing district energy development in Canada: A process for site selection, review and community participation*. Canadian District Energy Association.
- Gochenour, C. (2001) *District energy trends, issues, and opportunities: the role of the World Bank*. World Bank Publications.
- Gold, S. and Seuring, S. (2011) 'Supply chain and logistics issues of bio-energy production', *Journal of Cleaner Production*, 19(1), pp. 32–42. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.08.009.
- Gomes, T. C., e Alvelos, F. P. and Carvalho, M. S. (2012) 'Design of Wood Biomass Supply Chains', in Murgante, B. et al. (eds) *Computational Science and Its Applications -- ICCSA 2012: 12th International Conference, Salvador de Bahia, Brazil, June 18-21, 2012, Proceedings, Part III*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 30–44. doi: 10.1007/978-3-642-31137-6\_3.
- Govindan, K., Soleimani, H. and Kannan, D. (2015) 'Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future', *European Journal of Operational Research*, 240(3), pp. 603–626. doi: 10.1016/j.ejor.2014.07.012.
- Gronalt, M. and Rauch, P. (2007) 'Designing a regional forest fuel supply network', *Biomass and Bioenergy*, 31(6), pp. 393–402. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.01.007.
- Guzmán, P. L. and Valdés, A. (2000) 'Heat and power cogeneration at a Cuban sugar mill based on bagasse and trash as fuel: the "Héctor Molina" project', *Energy for Sustainable Development*. Elsevier, 4(3), pp. 90–92.
- Hajibabai, L. and 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), pp. 247–259. doi: 10.1111/j.1467-8667.2012.00791.x.
- Haleem, A. A. *et al.* (2015) 'Case study: Optimisation of Federal Land Development Authority Jengka supply chain management using P-graph approach', *Chemical Engineering Transactions*. Chemical Engineering Department, Universiti Teknologi PETRONAS, Bandar Seri Iskandar, Tronoh, Perak, Malaysia, pp. 1375–1380. doi: 10.3303/CET1545230.
- Hamelinck, C. N., Suurs, R. A. A. and Faaij, A. P. C. (2005) 'International bioenergy transport costs and energy balance', *Biomass and Bioenergy*, 29(2), pp. 114–134. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.04.002.
- Haq, Z. and Easterly, J. L. (2006) 'Agricultural Residue Availability in the United States', in McMillan, J. D. et al. (eds) *Twenty-Seventh Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Totowa, NJ: Humana Press, pp. 3–21. doi: 10.1007/978-1-59745-268-7\_2.
- Hess, J. R., Wright, C. T. and Kenney, K. L. (2007) 'Cellulosic biomass feedstocks and logistics for ethanol production', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1(3), pp. 181–190. doi: 10.1002/bbb.26.
- Iakovou, E. *et al.* (2010) 'Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis', *Waste*

- Management*, 30(10), pp. 1860–1870. doi: 10.1016/j.wasman.2010.02.030.
- ICIDCA (2000) *The Sugarcane Derivates Industry*. 3th edn. Havana: Editorial científico-tecnica.
- Khatriwada, D. *et al.* (2012) ‘Power generation from sugarcane biomass—A complementary option to hydroelectricity in Nepal and Brazil’, *Energy*. Elsevier, 48(1), pp. 241–254.
- Kim, J., Realff, M. J. and Lee, J. H. (2011) ‘Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty’, *Computers and Chemical Engineering*. School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, 311 Ferst Drive, NW, Atlanta, GA 30332, United States, 35(9), pp. 1738–1751. doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.02.008.
- Knudsen González, J. A. (2005) *Diseño y gestión de la cadena de suministro de los residuos agroindustriales de la caña de azúcar. Aplicación a los residuos agrícolas cañeros, el bagazo y las mieles*. Universidad Central ‘Marta Abreu’ de Las Villas.
- Kumar, A. and Sokhansanj, S. (2007) ‘Switchgrass (*Panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model’, *Bioresource Technology*, 98(5), pp. 1033–1044. doi: 10.1016/j.biortech.2006.04.027.
- Kumar, A., Sokhansanj, S. and Flynn, P. C. (2006) ‘Development of a Multicriteria Assessment Model for Ranking Biomass Feedstock Collection and Transportation Systems’, in McMillan, J. D. *et al.* (eds) *Twenty-Seventh Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Totowa, NJ: Humana Press, pp. 71–87. doi: 10.1007/978-1-59745-268-7\_6.
- Larson, J. A. *et al.* (2010) ‘Cost evaluation of alternative switchgrass producing, harvesting, storing, and transporting systems and their logistics in the Southeastern USA’, *Agricultural Finance Review*. Emerald Group Publishing Limited, 70(2), pp. 184–200. doi: 10.1108/00021461011064950.
- Leduc, S. *et al.* (2010) ‘Optimal location of lignocellulosic ethanol refineries with polygeneration in Sweden’, *Energy*. International Institute for Applied System Analysis, A-2361 Laxenburg, Austria, 35(6), pp. 2709–2716. doi: 10.1016/j.energy.2009.07.018.
- Lee, J.-S. *et al.* (2008) ‘Recent developments of key technologies on cellulosic ethanol production’, *Journal of Scientific and Industrial Research*, 67(11), p. 865.
- Lehtikangas, P. (2001) ‘Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark’, *Biomass and Bioenergy*, 20(5), pp. 351–360. doi: 10.1016/S0961-9534(00)00092-1.
- Leibbrandt, N. H., Knoetze, J. H. and Görgens, J. F. (2011) ‘Comparing biological and thermochemical processing of sugarcane bagasse: An energy balance perspective’, *Biomass and Bioenergy*, 35(5), pp. 2117–2126. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.02.017.
- Löfstedt, R. E. (1996) ‘The use of biomass energy in a regional context: The case of Växjö Energi, Sweden’, *Biomass and Bioenergy*. Pergamon, 11(1), pp. 33–42. doi: 10.1016/0961-9534(96)00005-0.
- Machuca, J. A. D. (1995) *Dirección de operaciones: aspectos estratégicos en la producción y los servicios*.



- McGraw-Hill (Dirección de operaciones). Available at: <https://books.google.com/cu/books?id=wquHPwAACAAJ>.
- Madlener, R. and Bachhiesl, M. (2007) ‘Socio-economic drivers of large urban biomass cogeneration: Sustainable energy supply for Austria’s capital Vienna’, *Energy Policy*, 35(2), pp. 1075–1087. doi: 10.1016/j.enpol.2006.01.022.
- Mafakheri, F. and Nasiri, F. (2014) ‘Modeling of biomass-to-energy supply chain operations : Applications , challenges and research directions’, *Energy Policy*. Elsevier, 67, pp. 116–126. doi: 10.1016/j.enpol.2013.11.071.
- Marrero Delgado, F. (2001) *Procedimientos para la toma de dediciones logísticas con enfoque multicriterio en la cadena de corte, alza y transporte de la caña de azúcar. Aplicaciones en CAI de la provincia de Villa Clara*. Universidad Central ‘marta Abreu’ de Las Villas.
- Melkote, S. and Daskin, M. S. (2001) ‘Capacitated facility location/network design problems’, *European Journal of Operational Research*, 129(3), pp. 481–495. doi: 10.1016/S0377-2217(99)00464-6.
- Melo, M. T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2009) ‘Facility location and supply chain management – A review’, *European Journal of Operational Research*, 196(2), pp. 401–412. doi: 10.1016/j.ejor.2008.05.007.
- Melo, M. T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2009) ‘Facility location and supply chain management – A review’, *European Journal of Operational Research*, 196(2), pp. 401–412. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>.
- De Meyer, A. *et al.* (2014) ‘Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Department of Earth and Environmental Sciences, Division of Forest, Nature and Landscape, Katholieke Universiteit Leuven, Celestijnenlaan 200E, Heverlee, Leuven 3001, Vlaams-Brabant, Belgium, 31, pp. 657–670. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.036.
- Meyer, A. De, Cattrysse, D. and Orshoven, J. Van (2015) ‘A generic mathematical model to optimise strategic and tactical decisions in biomass-based supply chains ( OPTIMASS )’, *European Journal of Operational Research*. Elsevier Ltd., 245(1), pp. 247–264. doi: 10.1016/j.ejor.2015.02.045.
- Mirkouei, A. *et al.* (2017) ‘A review and future directions in techno-economic modeling and optimization of upstream forest biomass to bio-oil supply chains’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 67, pp. 15–35. doi: 10.1016/j.rser.2016.08.053.
- Mohseni, S., Pishvaei, M. S. and Sahebi, H. (2016) ‘Robust design and planning of microalgae biomass-to-biodiesel supply chain: A case study in Iran’, *Energy*, 111, pp. 736–755. doi: 10.1016/j.energy.2016.06.025.
- Möller, B. (2004) ‘Least-cost allocation strategies for wood fuel supply for distributed generation in

- Denmark', *International Journal of Sustainable Energy (print Edition)*, 23(4).
- Möller, B. and Nielsen, P. S. (2007) 'Analysing transport costs of Danish forest wood chip resources by means of continuous cost surfaces', *Biomass and Bioenergy*, 31(5), pp. 291–298. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.01.018.
- Mula, J. *et al.* (2010) 'Mathematical programming models for supply chain production and transport planning', *European Journal of Operational Research*. North-Holland, pp. 377–390. doi: 10.1016/j.ejor.2009.09.008.
- Nagel, J. (2000) 'Determination of an economic energy supply structure based on biomass using a mixed-integer linear optimization model', *Ecological Engineering*, 16, pp. 91–102. doi: 10.1016/S0925-8574(00)00057-4.
- Natarajan, K. *et al.* (2012) 'Optimal Locations for Methanol and CHP Production in Eastern Finland', *Bioenergy Research*. School of Forest Sciences, University of Eastern Finland (UEF), P.O Box 111, 80101 Joensuu, Finland, 5(2), pp. 412–423. doi: 10.1007/s12155-011-9152-4.
- ONEI (2015) *Anuario Estadístico De Cuba 2014*. Habana, Cuba. Available at: [http://www.onei.cu/aec2014/10 Minería y energía.pdf](http://www.onei.cu/aec2014/10%20Mineria%20y%20energia.pdf).
- Owen, S. H. and Daskin, M. S. (1998) 'Strategic facility location: A review', *European Journal of Operational Research*, 111(3), pp. 423–447. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00186-6.
- Pantaleo, A. M. *et al.* (2014) 'Integration of biomass into urban energy systems for heat and power. Part II: Sensitivity assessment of main techno-economic factors', *Energy Conversion and Management*. Centre for Process Systems Engineering, Chemical Engineering Department, Imperial College London, United Kingdom, 83, pp. 362–376. doi: 10.1016/j.enconman.2014.03.051.
- Pérez-Bermúdez, R. A. (2005) 'Estudio termo-económico del beneficio del gas de gasificación de biomasa en lecho fluidizado con fines energéticos', *CENTRO DE ESTUDIO DE TERMOENERGÉTICA AZUCARERA (CEETA)*, p. 137.
- Pérez Gil, M., Contreras Moya, A. M. and Rosa Domínguez, E. (2013) 'Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry', *Journal of Cleaner Production*, 41, pp. 222–231. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.08.006.
- Perpiñá, C. *et al.* (2009) 'Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimisation', *Renewable Energy*, 34(3), pp. 555–565. doi: 10.1016/j.renene.2008.05.047.
- Pippo, W. A. and Luengo, C. A. (2013) 'Sugarcane energy use : accounting of feedstock energy considering current agro-industrial trends and their feasibility', *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 4(1), p. 10. doi: 10.1186/2251-6832-4-10.
- Pishvaei, M. S. and Razmi, J. (2012) 'Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming', *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), pp. 3433–3446. doi:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apm.2011.10.007>.

Pishvaei, M. S., Torabi, S. A. and Razmi, J. (2012) 'Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty', *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), pp. 624–632. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.11.028>.

Rauch, P. and Gronalt, M. (2011) 'The effects of rising energy costs and transportation mode mix on forest fuel procurement costs', *Biomass and Bioenergy*, 35(1), pp. 690–699. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.10.015.

Rentizelas, A. A., Tolis, A. J. and Tatsiopoulou, I. P. (2009) 'Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), pp. 887–894. doi: 10.1016/j.rser.2008.01.003.

ReVelle, C. S. and Eiselt, H. A. (2005) 'Location analysis: A synthesis and survey', *European Journal of Operational Research*, 165(1), pp. 1–19. doi: 10.1016/j.ejor.2003.11.032.

Rubio González, A. and Roque Díaz, P. (2006) 'Estado del arte en la cogeneración de electricidad en la industria de la caña de azúcar. Primeros pasos hacia una industria sucroenergética', *Centro Azúcar*, 33(2), pp. 42–51.

Rubio González, A. and Rubio Rodríguez, M. A. (2016) 'Bioeléctricas: incremento de la generación eléctrica con biomasa cañera', *Renovable.cu*, p. 7. Available at: <http://www.cubaenergia.cu/index.php/es/publicaciones-es/renovable-cu/100-renovable-cu-junio-2016/file>.

Saidur, R. *et al.* (2011) 'A review on biomass as a fuel for boilers', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), pp. 2262–2289. doi: 10.1016/j.rser.2011.02.015.

Santibañez-Aguilar, J. E. *et al.* (2014) 'Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives', *Journal of Cleaner Production*, 65(0), pp. 270–294. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>.

Shabani, N. *et al.* (2014) 'Tactical supply chain planning for a forest biomass power plant under supply uncertainty', *Energy*, 78, pp. 346–355. doi: 10.1016/j.energy.2014.10.019.

Shabani, N., Akhtari, S. and Sowlati, T. (2013) 'Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, pp. 299–311. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.005.

Shabani, N. and Sowlati, T. (2013) 'A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant', *Applied Energy*, 104, pp. 353–361. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.11.013.

Sharma, B. *et al.* (2013) 'Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier, 24, pp. 608–627. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.049.

- Sims, R. E. . and Venturi, P. (2004) ‘All-year-round harvesting of short rotation coppice eucalyptus compared with the delivered costs of biomass from more conventional short season, harvesting systems’, *Biomass and Bioenergy*, 26(1), pp. 27–37. doi: 10.1016/S0961-9534(03)00081-3.
- Tapia\_Carpio, G. and Simone De Souza, F. (2017) ‘Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: Scenarios of cost reductions’, 111. doi: 10.1016/j.renene.2017.05.015.
- Terouhid, S. A., Ries, R. and Fard, M. M. (2012) ‘Towards sustainable facility location-a literature review’, *Journal of Sustainable Development*. Canadian Center of Science and Education, 5(7), p. 18.
- Thornley, P., Rogers, J. and Huang, Y. (2008) *Quantification of employment from biomass power plants*, *Renewable Energy*. doi: 10.1016/j.renene.2007.11.011.
- Uslu, A., Faaij, A. P. C. and Bergman, P. C. A. (2008) ‘Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation’, *Energy*, 33(8), pp. 1206–1223. doi: 10.1016/j.energy.2008.03.007.
- Vac, S.-C. and Popita, G.-E. (2015) ‘Biomass: Economical, social and environmental aspects in biogas plants implementation’, *Journal of Environmental Protection and Ecology*. Faculty of Horticulture, University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine of Cluj Napoca, 3-5 Manastur Street, Cluj-Napoca, Romania, 16(3), pp. 1212–1220. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946715403&partnerID=40&md5=3e9dfddef5e1f6acc2f966bae8bd0b30>.
- Wang, F., Lai, X. and Shi, N. (2011) ‘A multi-objective optimization for green supply chain network design’, *Decision Support Systems*, 51(2), pp. 262–269. doi: 10.1016/j.dss.2010.11.020.
- Wee, H.-M. *et al.* (2012) ‘Renewable energy supply chains, performance, application barriers, and strategies for further development’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), pp. 5451–5465. doi: 10.1016/j.rser.2012.06.006.
- Wetterlund, E. *et al.* (2013) ‘Optimal use of forest residues in Europe under different policies-second generation biofuels versus combined heat and power’, *Biomass Conversion and Biorefinery*. Division of Energy Systems, Department of Management and Engineering, Linköping University, 581 83 Linköping, Sweden, 3(1), pp. 3–16. doi: 10.1007/s13399-012-0054-2.
- Wolfsmayr, U. J. and Rauch, P. (2014) ‘The primary forest fuel supply chain: A literature review’, *Biomass and Bioenergy*, 60, pp. 203–221. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.10.025.
- Yılmaz Balaman, Ş. and Selim, H. (2015) ‘A decision model for cost effective design of biomass based green energy supply chains’, *Bioresource Technology*, 191, pp. 97–109. doi: 10.1016/j.biortech.2015.04.078.
- You, F. *et al.* (2012) ‘Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input-output analysis’, *AIChE Journal*. Northwestern

- University, Evanston, IL 60208, United States, 58(4), pp. 1157–1180. doi: 10.1002/aic.12637.
- You, F. and Wang, B. (2011) ‘Life cycle optimization of biomass-to-liquid supply chains with distributed-centralized processing networks’, *Industrial and Engineering Chemistry Research*. Northwestern University, 2145 Sheridan Road, Evanston, IL 60208, United States, 50(17), pp. 10102–10127. doi: 10.1021/ie200850t.
- Yue, D., You, F. and Snyder, S. W. (2014) ‘Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization : Overview , key issues and challenges’, *Computers and Chemical Engineering*. Elsevier Ltd, 66, pp. 36–56. doi: 10.1016/j.compchemeng.2013.11.016.
- Zhang, J. *et al.* (2013) ‘An integrated optimization model for switchgrass-based bioethanol supply chain’, *Applied Energy*. Department of Industrial and Manufacturing Engineering, North Dakota State University, CIE Building, Fargo, ND 58102, United States, 102, pp. 1205–1217. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.06.054.
- Zhang, L. and Hu, G. (2013) ‘Supply chain design and operational planning models for biomass to drop-in fuel production’, *Biomass and Bioenergy*, 58, pp. 238–250. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.016>.
- Zhu, X. *et al.* (2011) ‘Challenges and models in supporting logistics system design for dedicated-biomass-based bioenergy industry’, *Bioresour Technol*, 102(2), pp. 1344–1351. doi: 10.1016/j.biortech.2010.08.122.

## Anexo 1. Conjuntos, parámetros y variables de decisión del modelo matemático

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDAD
<b>Parámetros</b>		
$DISP_{bn}$	Cantidad de biomasa materia prima $b$ disponible en el nodo suministrador $n$	ton
$\gamma_{bb'}^g$	Coeficiente de transformación de biomasa $b$ a biomasa $b'$ con tecnología $g$	%
$CAPP_{bjng}$	Capacidad de procesamiento de biomasa producto final $b$ con tecnología $g$ en el RBPD $j$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton
$H$	Duración de la zafra	h
$\delta_g$	Perdida en almacenamiento utilizando tecnología $g$	%
$Fibra_b$	Fibra en biomasa materia prima $b$	%
$MC_b$	Contenido de humedad de la biomasa $b$	%
$RC_g$	Relación vapor/bagazo con tecnología $g$	T_vapor/t_bagazo
$CFE_g$	Demanda de electricidad a proceso con tecnología $g$	KWh/ton
$D_{ie}$	Demanda insumo electricidad	%
$VAPMax_g$	Capacidad de generación de vapor con tecnología $g$	ton_vapor/h
$PI_{in}$	Potencia instalada en el central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	KW
$BWB_b$	Densidad de la biomasa $b$	Kg/m <sup>3</sup>
$VCMT_m$	Capacidad volumétrica del medio de transporte $m$	m <sup>3</sup>
$WCMT_m$	Capacidad estática del medio de transporte $m$	kg
$Max_m$	Disponibilidad de medio de transporte $m$	entero
<b>Variables</b>		
$EE_{in}^{zafra}$	Energía eléctrica entregada al SEN en zafra por el central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton
$Y_{ing}$	Variable binaria, 1 si abre con tecnología $g$ el central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$ , 0 lo contrario	[0,1]
$Y_{jng}$	Variable binaria, 1 si abre con tecnología $g$ el RBPD $j$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$ , 0 lo contrario	[0,1]
$N_{nn'm}^{medioT}$	Variable entera, número de medio de transporte $m$ a asignar entre el nodo $n$ y el nodo $n'$	entero
$N_{nn'm}^{viajes}$	Variable entera, número de viajes entre el nodo $n$ y el nodo $n'$ en el medio de transporte $m$	entero
$A_{nn'}$	Variable binaria, 1 si se establece vínculo entre el nodo $n$ y el nodo $n'$ , 0 lo contrario	[0,1]
$EE_{in}^{zafra\_off}$	Energía eléctrica entregada al SEN fuera de zafra por el central $i$ perteneciente bioeléctrica $n$	KWh
$VAP_{ing}^{off}$	Vapor generado fuera de zafra con tecnología $g$ en el central $i$ perteneciente al nodo tributario bioeléctrica $n$	ton_vapor
$Q_{bin}^{IN\_off}$	Cantidad de biomasa producto final $b$ a procesar fuera de zafra en el central $i$ perteneciente al nodo bioeléctrica $n$	ton
$QH_{bn}$	Cantidad de biomasa materia prima $b$ cosechada en el nodo suministrador $n$	ton
$F_{bnn'm}^{N-N'}$	Flujo de biomasa tipo $b$ entre el nodo $n$ y el nodo $n'$ en el medio de transporte $m$	ton

$Q_{bjn}^{IN}$  Cantidad de biomasa producto intermedio  $b$  a procesar en el RBPD  $j$  perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica  $n$  ton

**Anexo 1.** Conjuntos, parámetros y variables de decisión del modelo matemático. Continuación.

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDAD
<b>Variables</b>		
$Q_{bjn}^{IN}$	Cantidad de biomasa producto intermedio $b$ a procesar en el RBPD $j$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton
$Q_{bin}^{out}$	Cantidad de biomasa producto intermedio $b$ obtenido en central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton
$Q_{b'gjn}^{out}$	Cantidad de biomasa producto final $b$ obtenido con tecnología $g$ en el RBPD $j$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton
$Q_{bin}^{IN}$	Cantidad de biomasa materia prima $b$ a procesar en el central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton
$Q_{bin}^{OUT}$	Cantidad de biomasa producto intermedio $b$	
$Q_{b'ing}^{boiler}$	Flujo de biomasa producto intermedio $b$ al generador de vapor con tecnología $g$ en el central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton/h
$VAP_{ing}$	Vapor generado con tecnología $g$ en el central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	ton_vapor
$EG_{in}^{zafra}$	Energía eléctrica bruta en zafra generada por el central $i$ perteneciente al nodo tributario o nodo bioeléctrica $n$	KWh/zafra

## Anexo 2. Código GAMS del modelo. Continuación.

```

SETS
I conjunto de centrales tributarios
/ i1 "Abel Santamaria"
  i2 "Panchito Gómez T"
  i3 "Carlos Baliño"
  i4 "Efrain Alfonso"
  i5 "Heriberto Duquesne"
  i6 "Perucho Figueredo"
  i7 "Jose Maria" /
J conjunto de centrales bioelectricas
/ j1 "Quintín Bandera"
  j2 "Hector Rodríguez"
  j3 "George Washington"/
m conjunto de medios de transporte
/m1 "Kamaz"
  m2 "Kamaz remot"
  m3 "chino"
  m4 "Super Kamaz"
  m5 "Zinotruck"
  m6 "Zil" /
t tecnologias de conversion
      /t1 "CEST 20 Mw   67 bar  520°C"
      t2 "CEST 20 Mw   87 bar  530°C" / ;

TABLE TD(i,*) Datos tecnicos de tributarios
      ICI_trib      IG_trib      PI_trib      CMOL_trib
*      (KWh por tcane)  (KWh por tcane)  (MW)      (t)
i1      31           36           4.5         355200
i2      27.4         36           6.5         451200
i3      29.5         30           3           163200
i4      26.3         31.3         6           510409
i5      24.8         25           4.5         376894
i6      33.2         36           6           477768
i7      31.5         34           6           487419;

```



## Anexo 2. Código GAMS del modelo. Continuación.

```
SCALAR DVP Demanda de vapor a proceso en t_vapor\t_cane /0.45/ ;
SCALAR C Const de bag tribut en MWh por tcane en MWh\t /0.041847/ ;
SCALAR bigM numero suficientemente grande; bigM = Smax((i),TD(i,"CMOL_trib")) ;
SCALAR bigT numero suficientemente grande; bigT = smax((m),CC(m,"Disp")) ;
VARIABLES
CT costo total
CTR COSTO TRANSPORTACION
COM COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO
UD COSTO INCUPLIMIENTO DE LA DEMANDA
X(i) variable binaria 1 si se abre tributario o no
Y(j,t) variable binaria 1 si se abre bioelectrica o no
A(i,j,m) Variable binaria indica si establece vinculo entre tributario i y bioelectrica j
F(i,j,m) Flujo transportado en medio m entre trib i y bio j durante el periodo t
TR(i,j,m) Cantidad de medios m a utilizar entre i y j en periodo t
HSD(i,j,m) FALTANTE DE BIOMASA;
POSITIVE VARIABLES
F(i,j,m)
HSD(i,j,m);
BINARY VARIABLES A(i,j,m) ;
BINARY VARIABLES X(i) ;
BINARY VARIABLES Y(j,t) ;
INTEGER VARIABLE TR(i,j,m) ;
EQUATIONS
Costo Costo Total
C1 COSTO TRANSPORTE
C2 COSTO OPERACION Y MANTENIMIENTO
C3 COSTO ICUNOLIMIENTO DE LA DEMANDA
R1 Limitacion de cantidad de tributarios
R1_1 Limitacion de cantidad de bioelectrica
R2(j) Cada bioelectrica solo puede abrir con una tecnologia
R3(i) Limite de suministro de bagazo del tributario i
R4(i) Solo una bioelectrica por tributario
R5(i,j,m) Garantiza que no halla envio entre dos locaciones que no estén relacionadas
R6(i,j,m) Garantiza que no halla envio entre dos locaciones que no estén relacionadas
```

## Anexo 2. Código GAMS del modelo. Continuación.

```
R7(j) Varios tributarios por bioelectrica
R8(m) Limita cantidad de cada tipo de medios de transporte
R9(i,j,m) Restriccion logica que relaciona medios de transporte con asignacion
R10(i,j,m) Restriccion de flujo que relaciona asignacion de medio de transporte con flujo
R11(i,j,m) garantiza que no se realice asignacion de de un tributario si antes no se ha abierto
r11_1
R12(j) demanda de biomasa fuera de zafra
R13(i,j,m)
R14(i,j,m);
Costo.. CT =e= CTR + COM + UD ;
C1.. CTR =E= (sum((i,j), CUT(i,j)*sum(m, F(i,j,m))))/1000000;
C2.. COM =E= sum((j,t), GBB(j)*4*Y(j,t))/1000000 + sum((j,t), Y(j,t)*D_bio(t, "P")*2.25*0.02);
C3.. UD =E= sum((i,j), sum(m, ((HSD(i,j,m)*C)/1000)*250*457))/1000000;
R1.. sum(i, X(i)) =l= 7;
R1_1.. sum((j,t), Y(j,t)) =l= 3;
R2(j).. sum(t, Y(j,t)) =l= 1;
R3(i).. sum((m,j), F(i,j,m)) =e= TD(i, "CMOL_trib")*0.06545455*1 ;
R4(i).. sum((j,m), A(i,j,m)) =l= 1;
R5(i,j,m).. F(i,j,m) =l= bigM*A(i,j,m) ;
R6(i,j,m).. A(i,j,m) =l= F(i,j,m) ;
R7(j).. sum((i,m), A(i,j,m)) =g= 1;
R8(m).. sum((i,j), TR(i,j,m)) =e= CC(m, "Disp");
R9(i,j,m).. TR(i,j,m) =l= bigM*A(i,j,m) ;
R10(i,j,m).. TR(i,j,m)*CC(m, "limite peso") =l= F(i,j,m);
R11(i,j,m).. A(i,j,m) - X(i) =l= 0;
r11_1(i,j,m).. A(i,j,m) - sum(t, Y(j,t)) =l= 0;
R12(j).. sum((m,i), F(i,j,m)) + sum((m,i), HSD(i,j,m)) + CMOL_bio(j)*0.06545455*1 =e= 400800;
R13(i,j,m).. HSD(i,j,m) =l= bigM*A(i,j,m);
R14(i,j,m).. A(i,j,m) =l= HSD(i,j,m) ;
MODEL OPTIBAG /ALL / ;
SOLVE OPTIBAG using MIP minimizing CT ;
DISPLAY CT.l, CTR.l, COM.l, UD.l, x.l, y.l, f.l, a.l, tr.l, HSD.l;
```

## Anexo 2. Código GAMS del modelo. Continuación.

```

*Parametros asociados a tributarios
SCALAR C Const de bag tribut en MWh por tcane en MWh\tc /0.041847/ ;
SCALAR CII costo de inversion inducido de tributario en MMUSD /10/ ;
PARAMETER GB_tri(i) generacion bruta de tributario en MWh; GB_tri(i)= (TD(i,"CMOL_trib")*TD(i,"IG_trib"))/1000 ;
PARAMETER ESEN_tri(i) entrega al SEN de tributario en MWh; ESEN_tri(i)= (TD(i,"CMOL_trib")*(TD(i,"IG_trib")-TD(i,"ICI_trib")))/1000
PARAMETER E_BAG_tri(i) generacion bruta de tributario en MWh; E_BAG_tri(i)= TD(i,"CMOL_trib")*C ;

*Parametros del SEN y combustible fosil
SCALAR Cesp consumo especifico SEN en tcomb\GWh /250/ ;
SCALAR CCF costo combustible fosil en USD\t /457/ ;

*Parametros logica de modelado
SCALAR bigM numero suficientemente grande; bigM = Smax((i),TD(i,"CMOL_trib")) ;
SCALAR bigT numero suficientemente grande; bigT = smax((m),MAXtm(m)) ;

VARIABLES
CT costo total
X(i) variable binaria 1 si se abre tributario o no
Y(j) variable binaria 1 si se abre bioelectrica o no
A(i,j) Variable binaria indica si establece vinculo entre tributario i y bioelectrica j
F(i,j,m) Flujo transportado en medio m entre trib i y bio j durante el periodo t
TR(i,j,m) Cantidad de medios m a utilizar entre i y j en periodo t ;

POSITIVE VARIABLES F(i,j,m) ;
BINARY VARIABLES A(i,j) ;
BINARY VARIABLES X(i) ;
BINARY VARIABLES Y(j) ;
INTEGER VARIABLE TR(i,j,m) ;

EQUATIONS
Costo Costo Total
R1 limite de tributario a abrir
R2 limite de bioelectrica a abrir
R3(i) limite de suministro de bagazo del tributario i
R4(i) solo una bioelectrica por tributario
R5(i,j) garantiza que no halla envío entre dos locaciones que no estén relacionadas
R6(j) Varios tributarios por bioelectrica
R7(m) limita cantidad de cada tipo de medios de transporte
R8(i,j) restriccion logica que relaciona medios de transporte con asignacion
R9(i,j,m) restriccion de flujo
R10(i,j) relacion logica entre apertura de tributario y asignacion
R11(i,j) relacion logica entre apertura de bioelectrica y asignacion;

Costo.. CT =e= sum(i,CII*X(i)) + sum(j,CIU*PI*Y(j)) + sum((i,j),CUT(i,j)/25*sum(m,F(i,j,m)))/1000000 ;
R1.. sum(i,X(i))=1=3;
R2.. sum(j,Y(j))=1=3;
R3(i).. sum((m,j),F(i,j,m))=e=TD(i,"CMOL_trib")*0.1347*X(i);
R4(i).. sum(j,A(i,j))=1= 1;
R5(i,j).. sum(m,F(i,j,m)) =1= bigM*A(i,j) ;
R6(j).. sum(i,A(i,j))=g= 1;
R7(m).. sum((i,j),TR(i,j,m))=e= MAXtm(m);
R8(i,j).. sum(m,TR(i,j,m)) =1= bigT*A(i,j) ;
R9(i,j,m).. TR(i,j,m)*VCMT(m)=L= F(i,j,m);
R10(i,j).. A(i,j) - X(i)=1= 0;
R11(i,j).. A(i,j) - Y(j)=1= 0;

MODEL AZCUBA /all / ;
SOLVE AZCUBA using MIP minimizing CT ;
DISPLAY x.l,y.l,a.l,f.l,tr.l ;

```

### Anexo 3. Resumen de los resultados del modelo

Escenario	Bioeléctrica	Tributarios	Flujo de bagazo	Demanda Insatisfecha	Días de zafra	Días fuera zafra	Número de camiones
Base	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María	42586	0	150	150	110
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Heriberto Duquezne	47919	0	150	150	32
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso Perucho Figueredo	94214	0	150	150	199
Escenario A (-30%)	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María	25552	0	150	150	154
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Heriberto Duquezne	28751	0	150	150	104
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso Perucho Figueredo	56528	0	150	150	83
Escenario B (-60%)	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María	12776	11839	150	101	145
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Perucho Figueredo Heriberto Duquezne	23757	764	150	147	136
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso	18883	5733	150	126	60
Flujo de bagazo (toneladas), demanda insatisfecha (toneladas)							

**Anexo 3.** Resumen de los resultados del modelo. Continuación.

Escenarios	Bioeléctrica	Tributarios	Flujo de bagazo por tipo de camiones					
			Kamaz	Kamaz Remot	Chino	Súper Kamaz	Sinotruk	Zil
			18t	27t	30t	42t	55t	11t
Base	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María			31904			10682
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Heriberto Duquezne		24669		23249		
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso Perucho Figueredo	31272				29533	33409
Escenario A (-30%)	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María	6409					19142
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Heriberto Duquezne				14802		13950
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso Perucho Figueredo		17720	20045		18763	
Escenario B (-60%)	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María					9571	3205
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Perucho Figueredo Heriberto Duquezne		7401	9382			6975
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso	8860			10023		
Flujo de bagazo (toneladas)								

**Anexo 3.** Resumen de los resultados del modelo. Continuación.

Escenarios	Bioeléctrica	Tributarios	Asignación de medios de transporte					
			Kamaz	Kamaz Remot	Chino	Súper Kamaz	Sinotruk	Zil
			18t	27t	30t	42t	55t	11t
Base	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María			10			100
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Heriberto Duquezne		28		4		
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso Perucho Figueredo	56				45	98
	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María	56					98
Escenario A (-30%)	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Heriberto Duquezne				4		100
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso Perucho Figueredo		28	10		45	
	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María					45	100
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Perucho Figueredo Heriberto Duquezne		28	10			98
Escenario B (-60%)	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso	56			4		
	Quintín Bandera	Carlos Baliño José María					45	100
	Héctor Rodríguez	Abel Santamaría Perucho Figueredo Heriberto Duquezne		28	10			98
	George Washington	Panchito Gómez T Efraín Alfonso	56			4		

Flujo de bagazo (toneladas)