



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PLANIFICACIÓN INTEGRAL DE CADENAS DE SUMINISTRO
BASADAS EN PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES**

TESIS presentada por:

JOSÉ EZEQUIEL SANTIBAÑEZ AGUILAR

**A la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química como
requisito parcial para obtener el
grado de:**

**DOCTOR EN CIENCIAS
EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

ASESOR: DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

Morelia, Michoacán

Agosto de 2016



Asunto: Aprobación de Impresión de Tesis

Oficio número 139/2016/2016.

Por este medio nos dirigimos a usted de la manera más atenta para notificarle que después de haberle dado seguimiento al desarrollo de la tesis: "PLANIFICACIÓN INTEGRAL DE CADENAS DE SUMINISTRO BASADAS EN PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES" y revisado el manuscrito que presentó el alumno **José Ezequiel Santibañez Aguilar con matrícula 0518407G**, concluimos que cumple con los requisitos académicos y con lo establecido en el Reglamento General de Estudios de Posgrado para el desarrollo de tesis.

Por lo anterior este Comité Tutorial da el aval para su impresión final.

Atentamente.
Morelia, Michoacán a 11 de agosto de 2016.



DR. JAIME SAUCEDO LUNA,
COORDINADOR DEL DOCTORADO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA



Presidente o Asesor: Dr. José Ma. Ponce Ortega 03002829

Vocales:

Dr. Medardo Serna González 89000676

Dra. Janett Betzabe González Campos 11000015

Dr. Fabricio Nápoles Rivera 12002518

Dr. Agustín Jaime Castro Montoya 01000179

JSL/mcpa.



DEPARTAMENTO DE POSGRADO

ÍNDICE

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE TABLAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Justificación	5
1.3 Hipótesis	7
1.4 Objetivo general	7
1.5 Objetivo específicos.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Aspectos teóricos y métodos a utilizar	8
2.2 Antecedentes	16
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	20
3.1 Optimización dinámica de un sistema de biorefinerías.....	20
3.2 Planificación bajo incertidumbre de sistemas de biorefinerías considerando aspectos económicos y ambientales	39
3.3 Evaluación del riesgo financiero en una cadena de suministro para la conversión de biomasa	65
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	69

4.1	Optimización dinámica de un sistema de biorefinerías.....	69
4.2	Planificación bajo incertidumbre de sistemas de biorefinerías considerando aspectos económicos y ambientales	83
4.3	Evaluación del riesgo financiero en una cadena de suministro para la conversión de biomasa.....	92
	CONCLUSIONES.....	115
	LISTA DE REFERENCIAS	117
	APÉNDICE. ARTÍCULOS PUBLICADOS DURANTE EL DOCTORADO	122

RESUMEN

PLANIFICACIÓN INTEGRAL DE CADENAS DE SUMINISTRO BASADAS EN PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

Por

José Ezequiel Santibañez Aguilar

Agosto del 2016

Doctor en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

El presente trabajo aborda la planificación óptima de cadenas de suministro enfocadas a la producción de biocombustibles considerando aspectos importantes como el comportamiento dinámico, el tiempo de respuesta de la cadena de suministro, así como la incertidumbre asociada a la cadena productiva. En un primer caso de estudio se aborda la planificación óptima de la cadena de valor y el modelado del comportamiento dinámico de una manera robusta mediante la solución de ecuaciones diferenciales por medio del método de colocación ortogonal sobre elementos finitos. Los resultados muestran que los niveles de inventario pueden ajustarse para satisfacer la máxima demanda posible; sin embargo, los requerimientos de producto no pueden ser cubiertos totalmente debido a que el tiempo de respuesta del sistema no es suficiente y la disponibilidad de materia prima depende fuertemente del valor del horizonte de tiempo considerado. Por otro lado, se presenta una metodología para tomar en cuenta la incertidumbre asociada al precio de la materia prima en la cadena de suministro considerando la ganancia anual y el impacto ambiental como funciones objetivo. Mediante ésta metodología fue posible identificar las etapas críticas de la cadena de valor con el fin de seleccionar la topología con un menor número de variaciones en éstas etapas críticas. Además, se identificaron las materias primas con mayor influencia en la función objetivo económica. Finalmente, se desarrolla un método sistemático para la evaluación del riesgo financiero en las cadenas de suministro bajo un precio de materia prima incierto. Durante éste método se muestran las curvas de probabilidad acumulada para la ganancia neta anual así como una curva Pareto que muestra el compromiso entre la maximización del valor esperado de ganancia y el peor valor dicha ganancia.

Palabras Clave: Planificación, Cadena de suministro, Optimización dinámica, Incertidumbre, Riesgo económico

ABSTRACT

INTEGRAL PLANNING OF SUPPLY CHAIN FOCUSED ON THE BIOFUELS PRODUCTION

By

José Ezequiel Santibañez Aguilar

August 2016

PhD in Chemical Engineering

Supervised by: Dr. José María Ponce Ortega

The present work address the optimal planning of supply chains focused to the biofuels production considering important aspects as the dynamic behavior, the response time of the supply chain, as well as the uncertainty associated to the supply chain. The first part consists of a case study for the optimal planning of the supply chain and the modelling for the dynamic behavior through a robust approach; which involves differential equations solved within the orthogonal collocation under finite elements. Results show that the inventory levels can be adjusted in order to satisfy the maximum demand; however, the product requirements cannot be satisfied completely because of the response time is not sufficient and the availability of raw material depends significantly of the horizon of the time. On the other hand, it is presented an approach to consider the uncertainty associated to the raw material price considering the net annual profit and the environmental objectives. This methodology is able to identify the main parts of the supply chain to select the topology with a minor number of changes in these stages. Additionally, it was identified that some raw materials can affect seriously the economic objective function. Finally, this work develops a systematic method to assess the financial risk for supply chains subject to uncertain raw material price. This method illustrates the cumulative probability for the net annual profit as well as a Pareto curve; which shows the tradeoff between the maximization of the expected value and the worst price.

Palabras Clave: Planificación, Cadena de suministro, Optimización dinámica, Uncertainty, Financial Risk

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Categorías y subcategorías de la metodología del Eco-Indicador99	15
Tabla 4.1	Descripción geográfica para los centros de abastecimiento	70
Tabla 4.2	Materias primas seleccionadas en las plantas de procesamiento	76
Tabla 4.3	Descripción para el caso de estudio.....	84
Tabla 4.4	Datos históricos para los precios de materia prima, \$US/tonelada métrica	85
Tabla 4.5	Información estadística para distribución basada en movimiento Browniano	93
Tabla 4.6	Precio de materias primas para los escenarios con las soluciones de mayor y menor riesgo con la mayor y menor ganancia para la distribución no correlacionada.....	99
Tabla 4.7	Porcentaje de demanda satisfecha de los productos para distribución no correlacionada para las soluciones con mayor y menor riesgo.....	102
Tabla 4.8	Cantidad de biomasa utilizada para las soluciones con el mayor y el menor riesgo (Caso no correlacionado)	103
Tabla 4.9	Matriz de correlación para la distribución correlaciona	105
Tabla 4.10	Precios de la materia prima para los escenarios críticos para los parámetros correlacionados	109
Tabla 4.11	Porcentaje de demanda satisfecha de los productos para distribución correlacionada para las soluciones con mayor y menor riesgo.....	113
Tabla 4.12	Cantidad de biomasa utilizada para las soluciones con el mayor y el menor riesgo (Caso correlacionado)	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Demanda energética global representada como consumo de petróleo crudo equivalente para los años 1995, 2015 y 2035. (BP Global, 2015).....	2
Figura 2.1	Descripción gráfica del método ϵ constraint para dos objetivos.....	13
Figura 3.1	Superestructura para la planificación dinámica de una cadena de suministro procesadora de biomasa	21
Figura 3.2	Representación de un problema no lineal de control predictivo.....	38
Figura 3.3	Metodología para un modelo de control predictivo (Gutiérrez-Limón y col., (2014)).....	39
Figura 3.4	Representación general de la estrategia de solución para el problema de la sección 3.2.....	60
Figura 3.5	Representación de las diferentes secciones de la cadena de suministro	63
Figura 3.6	Ejemplificación del método para seleccionar la topología a partir de las soluciones determinísticas	64
Figura 3.7	Superestructura de la metodología propuesta para la evaluación del riesgo financiero	66
Figura 4.1	Nivel de inventario de materia prima en los centros de abastecimiento.....	71
Figura 4.2	Nivel de inventario de materia prima en las plantas de procesamiento. Parte 1 (Astillas de madera, caña de azúcar y maíz grano)	73
Figura 4.3	Nivel de inventario de materia prima en las plantas de procesamiento. Parte 2 (Sorgo dulce y sorgo grano)	74
Figura 4.4	Nivel de inventario de materia prima en las plantas de procesamiento. Parte 3 (Jatropha y girasol)	75
Figura 4.5	Demandas satisfecha y requerida de bioetanol en los centros de consumo	78
Figura 4.6	Nivel de inventario para el etanol en: a) Plantas de procesamiento. b) Centros de distribución.....	79
Figura 4.7	Demandas satisfecha y requerida de biodiésel en los centros de consumo	81
Figura 4.8	Nivel de inventario para el biodiésel en: a) Plantas de procesamiento. b) Centros de distribución.....	82
Figura 4.9	Distribución de los precios de la materia prima para el caso descrito en la sección 3.2.....	86

Figura 4.10	Curva Pareto entre el objetivo económico y ambiental	87
Figura4.11	Macro estructura de la cadena de suministro para los puntos A y C de la Figura 4.10.....	89
Figura 4.12	Configuración de las tecnologías de procesamiento para la planta localizada en Salamanca	90
Figura 4.13	Dependencia del objetivo económico con respecto a los parámetros inciertos	91
Figura 4.14	Distribución para el precio de materia prima vía movimiento Browniano.....	94
Figura 4.15	Curva Pareto para el riesgo económico asociado a la implementación de una cadena de suministro (distribución no correlacionada)	94
Figure 4.16	Curvas de probabilidad acumulada para la distribución no correlacionada	96
Figura 4.17	Ganancia neta anual para cada escenario para las soluciones con mayor y menor riesgo para la distribución no correlacionada	97
Figure 4.18	Histograma de frecuencia para la ganancia neta anual para las soluciones con el mayor y menor riesgo para la distribución no correlacionada	98
Figure 4.19	Configuración de la cadena de suministro para la solución con mayor riesgo para los parámetros no correlacionados	100
Figura 4.20	Configuración de la cadena de suministro para la solución con el menor riesgo para los parámetros no correlacionados	101
Figura 4.21	Distribución del precio de materia prima a través de una distribución log-normal correlacionada	104
Figura 4.22	Curva Pareto para el riesgo económico asociado a la implementación de una cadena de suministro (distribución correlacionada)	106
Figure 4.23	Curvas de probabilidad acumulada para la distribución correlacionada	107
Figura 4.24	Ganancia neta anual para cada escenario para las soluciones con mayor y menor riesgo para la distribución correlacionada	108
Figure 4.25	Histograma de frecuencia para la ganancia neta anual para las soluciones con el mayor y menor riesgo para la distribución correlacionada.....	110
Figura 4.26	Configuración de la cadena de suministro para la solución con el mayor riesgo para los parámetros correlacionados	111
Figura 4.27	Configuración de la cadena de suministro para la solución con el menor riesgo para los parámetros correlacionados	112

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se proporciona una descripción general de cada apartado del presente trabajo de investigación. En este sentido, la primera sección aborda las generalidades del proyecto como lo son la definición y partes que conforman una cadena de suministro, diferencias entre una biorefinería y una refinería convencional y la importancia de la producción de biocombustibles en la reducción de emisiones.

Por otro lado, el Capítulo 2 presenta el marco teórico, el cual contiene la descripción de los diferentes tipos de problemas de programación matemática abordados en el presente proyecto como lo son la planificación y control de la cadena de suministro, la definición de función de probabilidad e incertidumbre, así como, metodologías usadas para resolver problemas multi-objetivos y evaluar el impacto ambiental en los procesos.

El Capítulo 3 aborda la metodología empleada en la investigación, la cual es dividida en varias etapas. La primera etapa consta del modelamiento y control dinámico de la cadena de suministro y las etapas restantes están basadas en la inclusión de la incertidumbre en el precio de la materia prima.

La discusión y presentación de los resultados es presentada en el Capítulo 4 con el fin de destacar la importancia de tomar en cuenta aspectos como lo son: el modelamiento dinámico e incertidumbre en cadenas de suministro.

1.1 Generalidades

1.1.1 Panorama Energético

Actualmente, la sustentabilidad energética a nivel mundial es de primordial importancia, ya que la producción de energía depende principalmente de combustibles fósiles. En este sentido, entre las principales fuentes de energía a nivel mundial se encuentran el petróleo con 32 %, el carbón con 30 % y el gas natural con 24 %, seguido de otras como la nuclear con 4 %, la biomasa y otras renovables con 3 %; y finalmente el 7 % restante es satisfecho por medio de plantas hidroeléctricas (BP Global, 2015). Es importante destacar que dicha dependencia de los

combustibles fósiles está asociada con un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales contribuyen de manera significativa al cambio climático.

Además, el consumo de energía a nivel mundial se ha incrementado drásticamente en los años recientes, principalmente por el desarrollo tecnológico y crecimiento poblacional. Un ejemplo de éste incremento es que la demanda global de energía fue de alrededor de 9 billones de toneladas de petróleo equivalente para el año 1995; mientras que en el año 2015 la demanda creció hasta un poco más de 13 billones de crudo equivalente. Asimismo, se espera que la demanda para el año 2035 se incremente hasta los 18 billones de toneladas de petróleo equivalente. En este sentido, el aumento en solo 40 años sería 200 %. También se observa que el uso de fuentes renovables se proyecta a ser triplicado ya que en el año 2015 solo representa el 3 % y en el año 2035 se espera un 9 %, siendo el mayor aumento relativo de fuentes alternas de energía (ver Figura 1.1).

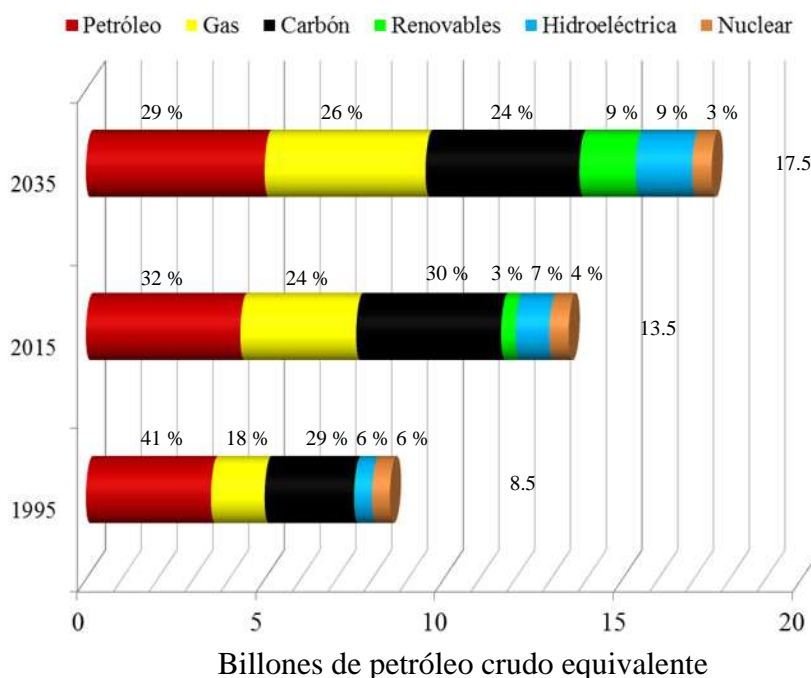


Figura 1.1 Demanda energética global representada como consumo de petróleo crudo equivalente para los años 1995, 2015 y 2035 (BP Global, 2015).

Por otro lado, particularmente en el caso del petróleo, el incremento en el uso del mismo para consumo energético y producción de productos derivados del mismo como plásticos y medicamentos provoca que se consuma gran parte de éste, disminuyendo sus reservas

constantemente; debido a esto, diariamente se buscan nuevos yacimientos que puedan solventar el problema de la disponibilidad del petróleo, sin embargo la velocidad de consumo del petróleo casi siempre es mayor que la velocidad con la que se encuentran los nuevos yacimientos.

Para el caso de México, de acuerdo a estadísticas del año 2011, las reservas probadas ascienden a 13,796 millones de barriles de petróleo crudo equivalente, 15,013 millones de barriles se encuentran como reservas probables y 14,264.5 millones de barriles son reservas posibles con una tasa de restitución integrada de reservas probadas de 86 %.

1.1.2 Biorefinerías y cambio climático

La comunidad científica se ha esforzado por desarrollar alternativas para afrontar la problemática ambiental relacionada con el uso de combustibles fósiles así como su disponibilidad. Sin embargo, la mayoría de éstas se pretenden usar en conjunto con los combustibles fósiles ya que aún no se tiene el desarrollo tecnológico ni la factibilidad económica de reemplazarlos en su totalidad. Específicamente, la producción de biocombustibles a partir de la biomasa ha captado la atención debido a las atractivas características de la misma; entre las cuales destacan: su disponibilidad como recurso renovable, la captura de gases de efecto invernadero durante su crecimiento, así como la flexibilidad en los tipos de biomasa que pueden ser utilizados para la producción de una gran variedad de productos de alto valor agregado.

En consecuencia, es importante definir el concepto de biorefinería; la cual es una instalación industrial donde se producen múltiples productos (biocombustibles, químicos especializados, precursores, etc.) a partir de una amplia gama de tipos de biomasa. Donde, la biomasa es cualquier material orgánico procedente de un proceso biológico, espontáneo o provocado, que pueda usarse como fuente de energía. Actualmente, el concepto de biorefinería ha ganado una significativa atención ya que éstas pueden contribuir significativamente a minimizar las consecuencias del uso de los combustibles fósiles.

1.1.3 Cadenas de suministro y biorefinerías

Asimismo, las alternativas para producir los biocombustibles a partir de la biomasa son enormes y éstas han ido en aumento debido a que las investigaciones se enfocan en obtener

mejores rendimientos, distintas materias primas y mejor calidad de producto, con lo cual las opciones se incrementan. Estas alternativas están fuertemente ligadas a los lugares de suministro de materia prima así como a los lugares para el consumo de productos; con lo cual, el término de biorefinería no debería ser considerado de manera aislada sino que se necesita incluir dentro del concepto de cadena de suministro para tomar en cuenta las interacciones con factores como disponibilidad de materia prima, demanda de producto y capacidad de producción.

Una cadena de suministro involucra todas las partes que ayudan a satisfacer las necesidades y/o demandas de algún cliente; es decir, las zonas donde se puede extraer u obtener la materia prima, los lugares de almacenamiento de material, los lugares donde se ubica el proceso productivo, así como los distintos lugares de consumo. Es importante destacar que dada la complejidad y el tipo de análisis que pueden hacerse de las cadenas de suministro, éstas son divididas en partes. La primera se conoce como la parte alta de la cadena de suministro, la cual abarca toda la estructura desde el suministro de materia prima hasta el proceso productivo. Por otro lado, la segunda parte de la cadena contempla las interconexiones entre el proceso productivo y los consumidores finales y se conoce la parte baja de la cadena de valor.

Además, las cadenas de suministro pueden ser clasificadas en tres tipos de acuerdo a su forma de operación. La primera se conoce como operación centralizada y se define así debido a que la etapa de procesamiento es realizada en plantas de mayor capacidad para disminuir costos de capital y no existe algún tipo de pre-procesamiento. Adicionalmente, las decisiones entorno a la cadena de suministro son tomadas priorizando el funcionamiento de las plantas centrales. La segunda es llamada operación distribuida; en este tipo de operación existen entidades para el procesamiento de menor capacidad y pueden estar distribuidas a lo largo de la cadena; también, se permiten etapas de pre-procesamiento con las cuales se pretende disminuir los costos de transporte ya que las distancias recorridas por la materia prima son menores entre las diferentes entidades y se puede transportar mayor cantidad neta de material. Finalmente, se consideran las configuraciones mixtas; las cuales contemplan los dos tipos anteriores de operación. Este último tipo de operación busca aprovechar las ventajas de los dos tipos anteriores y disminuir sus limitantes, ya que la operación distribución centralizada disminuye los costos de capital y operación; sin embargo aumenta los costos asociados al transporte siendo el caso contrario la operación distribuida.

Para el caso de las cadenas de suministro basadas en biorefinerías se prefiere un funcionamiento distribuido pues la mayoría de la materia prima utilizada requiere de pre-procesamiento y la materia prima neta que es transportada a las plantas de procesamiento es muy poca. Además, la disponibilidad de la mayoría de la biomasa es afectada por la estacionalidad debido a que su producción está ligada fuertemente a los cambios de clima a lo largo del año. Asimismo, el costo de la materia prima está conectado con la disponibilidad de la misma y puede ser afectado por algún cambio drástico en las condiciones climatológicas ocasionadas por un siniestro como un huracán, sequía, lluvia, etc.

1.2 Justificación

El acceso a fuentes de energía capaces de satisfacer la demanda de una manera segura es esencial para el desarrollo de la sociedad, ya que la energía se utiliza en todas las actividades humanas, desde calentar los alimentos hasta la producción y transporte de diferentes bienes de consumo. En este sentido, la demanda energética es satisfecha principalmente por combustibles fósiles, los cuales hasta hace poco se creía que su disponibilidad estaba limitada para los próximos años; aunque, debido a los hallazgos de nuevos yacimientos de petróleo así como de gas denominado “shale gas”, el abastecimiento energético por medio de combustibles fósiles estaría asegurado en el largo plazo. Un ejemplo de que la demanda de energía estaría cubierta es que Estados Unidos ha reportado que tiene la capacidad suficiente para satisfacer dicha demanda al menos 20 años basando su producción energética solo en gas natural, carbón y petróleo, mientras que con la incorporación del “shale gas” su proyección es extender esta cobertura al menos 116 años.

Sin embargo, un serio problema que presentan los combustibles fósiles es la gran cantidad de emisiones a la atmósfera generadas durante su uso y producción. En este contexto, cabe destacar que la producción y uso de energía genera cerca de dos terceras partes de las emisiones de CO₂ de origen antropogénico y se espera que para el año 2035 las emisiones de CO₂ provenientes de los combustibles fósiles representen el 20 % de las emisiones globales principalmente por el rápido crecimiento de las economías (BP Global, 2015).

Por esta razón, las formas alternas de energía como el uso de la biomasa para la producción de biocombustibles y productos para usos similares como los obtenidos por medio del

petróleo y sus derivados han atraído la atención de la comunidad científica global en busca de alternativas más limpias capaces de reducir la tasa de emisión por el uso y producción de energéticos.

Sin embargo, el impacto real de la producción de biocombustibles debe ser evaluado y el número de alternativas factibles para evaluación han ido en aumento debido a los diversos tipos de biomasa, productos y rutas de procesamiento involucradas en el aprovechamiento de ésta. Asimismo, al incluir la producción de biocombustibles dentro de una cadena de suministro existen otros factores a tomar en cuenta como la ubicación de las plantas de procesamiento, centros de distribución, almacenamiento y lugares de abastecimiento. Además, éste tipo de cadenas de suministro es muy susceptible a cambios a lo largo del tiempo ya que la disponibilidad de biomasa y la demanda de producto pueden cambiar constantemente. También, es importante destacar que los cambios en la disponibilidad se relacionan directamente en los precios de la materia prima y que el valor presente del precio de materia prima afecta los valores futuros del mismo; es por ello que se necesitan metodologías capaces de considerar la variación de las diferentes variables, de operación y de diseño, debido a que la decisión final acerca de la topología y operación de la cadena de suministro debe contemplar la incertidumbre asociada buscando que sea capaz de operar durante distintos periodos de tiempo bajo una misma estructura (Las variables de operación podrían cambiar pero las de diseño tienden a ser fijadas debido a que implican la compra e instalación de equipos y construcción de instalaciones adecuadas).

Por lo tanto, el presente trabajo está justificado debido a que propone modelos matemáticos y metodologías para la planificación y control de cadenas de suministro productoras de biocombustibles capaces de contemplar la incertidumbre en los precios de la biomasa, asimismo tomar acciones de control ante los cambios de la demanda y disponibilidad a través del tiempo.

1.3 Hipótesis

Mediante el desarrollo y aplicación de modelos de programación matemática es posible la planificación integral de cadenas de suministro basadas en conversión de biomasa con el objetivo de contribuir al problema de la sustentabilidad energética aprovechando los beneficios ambientales de la biomasa.

1.4 Objetivo general

Proponer y desarrollar modelos de programación matemática para la planificación óptima de sistemas de conversión de biomasa considerando la dinámica y la incertidumbre asociada al sistema productivo.

1.5 Objetivos específicos

- ❖ Desarrollar y aplicar modelos dinámicos para cadenas de suministro productoras de biocombustibles con el fin de simular la capacidad para satisfacer demandas de éste tipo de procesos.
- ❖ Incorporación de modelos capaces de predecir las variaciones en el precio de la materia prima en cadenas de suministro para la conversión de biomasa.
- ❖ Desarrollar modelos de programación matemática para la selección de topologías para cadenas de suministro capaces de considerar la incertidumbre asociada en el precio de la materia prima.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo consta de dos secciones, la primera sección proporciona conceptos e información básica para la comprensión de aspectos abordados en los Capítulos 3 y 4 del presente trabajo (Metodología y Resultados, respectivamente). En resumen, la primera parte aborda lo que es un problema de optimización dinámica, evaluación de impacto, el método ϵ -constraint para problemas de optimización multi-objetivo, entre otros conceptos.

La segunda parte del capítulo se conforma de los antecedentes del trabajo; es decir, trabajos previos que sirven de sustento para el desarrollo del presente trabajo.

2.1 Aspectos teóricos y métodos a utilizar

2.1.1 Problemas de optimización dinámica

Un modelo de optimización dinámica describe el comportamiento de un sistema por medio de ecuaciones diferenciales; las cuales tienen que ser resueltas para aplicar al modelo los algoritmos de optimización conocidos. En este sentido, (Biegler, 2010) propuso un algoritmo para la resolución de estos problemas, donde es necesario discretizar todas las ecuaciones diferenciales para transformar el problema mixto entero dinámico a un problema de programación mixto entero no lineal, para resolverlo por métodos estándar. Una manera para discretizar las ecuaciones diferenciales es por medio del método de colocación ortogonal sobre elementos finitos.

Primeramente hay que tener en cuenta que la aplicación de balances de masa, energía y momento producen modelos basados en ecuaciones algebraicas diferenciales como:

$$\dot{x} = f(x, y, u), \quad x(0) = x_0 \quad (2.1)$$

$$0 = g(x, y, u) \quad (2.2)$$

Donde x son los estados del sistema dinámico definido en forma semi-explicita, y son los estados del sistema algebraico representado por la función $0 = g(x, y, u)$ y u son las variables manipuladas. Si se asume que el índice para el problema algebraico diferencial es igual a 1,

entonces las condiciones iniciales del sistema dinámico son dadas por x_0 , y las condiciones iniciales de las variables algebraicas son obtenidas de la Ecuación (2.2). Además, las restricciones adicionales que no son parte directa del sistema algebraico diferencial son incluidas en el problema dinámico de optimización mixto entero para contemplar restricciones para pureza del producto, márgenes de seguridad, límites para procesamiento, transporte, costos, así como algunas variables de decisión, etc. En términos generales, éste conjunto de restricciones se establece como:

$$h(x, y, u) \leq 0 \quad (2.3)$$

Como se mencionó anteriormente, el método de colocación ortogonal sobre elementos finitos puede ser utilizado para discretizar las ecuaciones diferenciales del sistema algebraico diferencial y el conjunto de restricciones relacionadas. En este sentido, el espacio de solución es dividido en un conjunto de elementos finitos; dentro de cada elemento finito existen o puntos de colocación ortogonal. Por lo tanto, las variables en función de los elementos finitos y puntos de colocación ortogonal puede ser definida como:

$$x = x_e^0 + h_e \cdot \sum_{o=1}^{N_p} A_o(\tau) \cdot \dot{x}, \quad e \in N_f \quad (2.4)$$

Donde, N_f es el número de elementos finitos, N_p es el número de puntos internos de colocación, h_e es el largo de los elementos finitos e , τ es el tiempo escalado normalmente limitado entre $[0,1]$, x_e^0 es el valor de la variable de estado al inicio del elemento j , \dot{x} es el valor de la primera derivada de la variable de estado en el elemento finito j y el punto interno de colocación o . Finalmente, $A_o(\tau)$ es un polinomio en τ de orden N_p ; el cual se puede definir como:

$$A_o(\tau) = \int_0^\tau l_k(\tau') d\tau' \quad (2.5)$$

Donde l_k representa una función base de la siguiente interpolación del polinomio de Lagrange:

$$l_k(\tau) = \prod_{k'=1, \neq k}^{N_p} \frac{\tau - \tau_{k'}}{\tau_k - \tau_{k'}} \quad (2.6)$$

Por otro lado, la continuidad entre elementos finitos adyacentes tiene que ser forzada:

$$x_{e+1}^0 = x_e^0 + h_e \cdot \sum_{o=1}^{N_p} \tau_{N_p,o} \cdot \dot{x}_{o,e}, \quad e > 1, e \leq N_f \quad (2.7)$$

Además, las derivadas de las variables de estado son evaluadas en cada elemento finito e y cada punto interno de colocación o :

$$\dot{x}_{o,e} = f(x_{o,e}, y_{o,e}, u_{o,e}) \quad (2.8)$$

Finalmente, las variables de estado algebraicas y son evaluadas usando el polinomio de Lagrange como sigue:

$$y = \sum_{o=1}^{N_p} l_k(\tau) \cdot y_{o,e}, \quad e \in N_f \quad (2.9)$$

Una vez que el modelo dinámico es discretizado, la solución es dada por la resolución de un problema mixto entero no lineal para el espacio completo de búsqueda. Este modelo puede ser resuelto por algoritmos estándar como los resolvedores Dicopt o SBB disponibles en alguna plataforma para lenguaje algebraico como GAMS. Para encontrar la solución óptima de un problema a gran escala se requiere una metodología específica, como la reportada por Terrazas-Moreno y col. (2008)

2.1.2 Problemas de optimización multi-objetivo

Primeramente, es necesario establecer que la toma de decisiones es crucial cuando se pretende la implementación de algún proceso, elaborar algún producto o bien aprovechar algún recurso. En este sentido, los tomadores de decisiones se enfrentan a un vasto número de opciones a evaluar con el fin de tomar una decisión que proporcione los mejores beneficios y la mayoría de las ocasiones dicha decisión debe satisfacer diversos intereses. Consecuentemente, la selección de

la mejor solución de un conjunto de soluciones posibles implica el uso de técnicas de optimización y debido a la relevancia de los problemas que involucran varios objetivos sujetos a ciertas restricciones se deben emplear técnicas de optimización multi-objetivo.

En este contexto, un problema de optimización multi-objetivo es un problema de decisión descrito por un conjunto de objetivos, los cuales se pretenden maximizar o minimizar sujetos a igualdades y desigualdades.

La solución de un problema de optimización multi-objetivo se puede obtener por varios métodos y su importancia está asociada a que desde el año 2007 a la fecha se han publicado más de 250 artículos que utilizan algún método de optimización multi-objetivo; entre los cuales las principales áreas de investigación son: diseño y operación de procesos, generación de potencia, energía renovable, emisiones al ambiente, producción de hidrógeno y celdas combustibles.

Los métodos para resolver problemas multi-objetivo se clasifican como generadores y basados en preferencia. Los primeros generan un conjunto de soluciones óptimas o conjunto Pareto. Los métodos basados en preferencia contemplan la cuantificación de la preferencia de los objetivos para tomar una decisión, la cual se identifica con la solución que mayormente se acerque a dichas preferencias. La principal ventaja de los métodos basados en preferencia es que el tiempo de cómputo es inferior al de los métodos generadores aunque carecen de información para la toma de decisiones, en cambio, los métodos generadores son capaces de proporcionar información, sin embargo, el tiempo de cómputo es mayor.

Uno de los métodos más usados para resolver problemas de optimización multi-objetivo es el método ϵ -constraint, el cual se basa en la selección de un objetivo como el objetivo principal y la formulación de los otros objetivos como restricciones de la siguiente manera:

El problema original se define como:

$$\begin{aligned} & \text{Optimizar } \{Obj1, Obj2, Obj3, \dots\} \\ & \text{sujeta a} \\ & h(x) \leq \epsilon \\ & g(x) = 0 \end{aligned}$$

Después, el problema es reemplazado dejando uno de los objetivos como principal y dejando los otros como restricciones:

$$\begin{aligned} & \textit{Optimizar} \{Obj1\} \\ & \textit{sujeta a} \\ & Obj2 \leq R2 \\ & Obj3 \leq R3 \\ & \vdots \\ & h(x) \leq \varepsilon \\ & g(x) = 0 \end{aligned}$$

Una vez que la reformulación es realizada, el primer paso consiste en obtener valores límites para los objetivos, lo cual se consigue por la optimización de cada uno de los objetivos sujetos solo a las restricciones del problema original. Consecuentemente, se obtienen los mejores valores para cada uno de los objetivos (el límite superior si se optimiza y el límite inferior si se minimiza). Así mismo, durante este paso se obtienen los peores valores para los objetivos, ya que se supone que los objetivos son contradictorios, es decir, el mejor valor en el objetivo 1 produce el peor valor en el objetivo 2 y viceversa. A continuación se resuelve el problema modificado varias veces (donde los objetivos secundarios se formulan como restricciones) en el cual, los valores de R2, R3, etc. se encuentran dentro de los límites superiores e inferiores determinados anteriormente. Cabe destacar que el problema puede ser resuelto las veces que se considere necesario para generar todo el frente de Pareto. La representación gráfica del método ϵ -constraint es provista en la Figura 2.1.

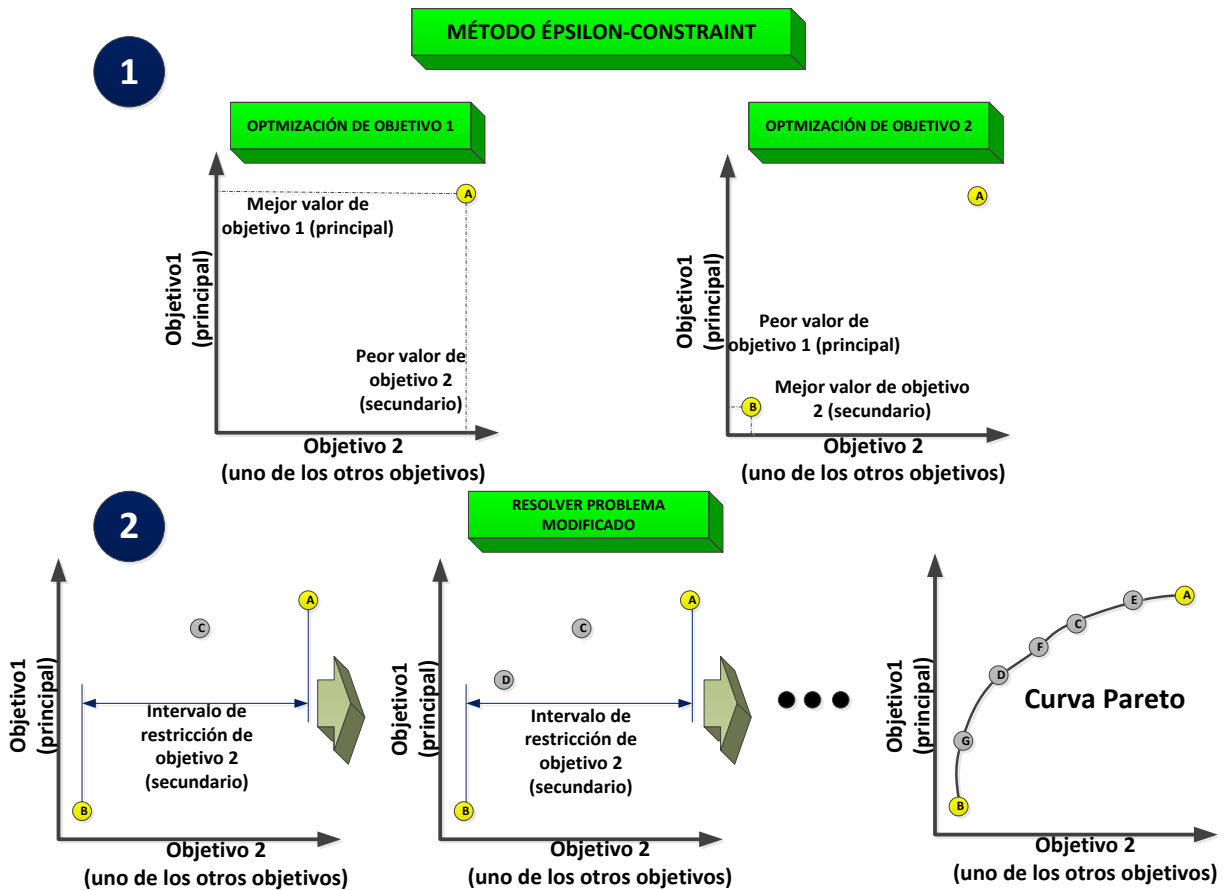


Figura 2.1 Descripción gráfica del método epsilon-constraint para dos objetivos

2.1.3 Distribución Geométrica Browniana

Una parte importante del presente trabajo es la referente a la generación de escenarios para parámetros inciertos por medio de diferentes distribuciones de probabilidad. Una de ellas es la distribución geométrica Browniana, la cual es una de las usadas para describir el comportamiento de precios de diversas materias primas y productos, así como de algunos parámetros económicos.

Esta distribución considera una varianza constante y tiene un comportamiento log-normal respecto a la relación entre dos valores del parámetro a predecir en distintos periodos de tiempo, es decir que el logaritmo natural de la relación entre los parámetros a predecir sigue una distribución normal con un valor de media y varianza establecidos. En este sentido, la función que determina la distribución geométrica Browniana se define por la siguiente ecuación:

$$X(t) = X(t-1) \text{EXP} \left(\left(\mu - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) \Delta t + \sigma \sqrt{\Delta t} (N(0,1)) \right)$$

Donde $X(t)$ es el valor del parámetro a predecir en un tiempo t y $X(t-1)$ es el valor de dicho parámetro en un tiempo $t-1$. σ es la desviación estándar del logaritmo natural de la relación entre los diferentes parámetros para diferentes tiempos. El término $N(0,1)$ es el responsable del comportamiento normal de los logaritmos naturales mencionados ya que es una distribución normal con media de cero y desviación estándar de 1, es decir, la distribución normal estándar. Por otro lado, μ es la media utilizada para la generación de los parámetros con una distribución log-normal. Es importante mencionar que esta media está ligada a la desviación estándar y a un valor conocido como parámetro de salto; el cual se puede definir como el error de la predicción y normalmente tiene valores de 0.10, 0.05 y 0.01. Por ejemplo, si la distribución predice un valor para el parámetro incierto igual a 10 con un parámetro de salto igual a 0.05, el valor del parámetro incierto podría ser 10.5 o bien 9.5. La relación entre μ y el parámetro de salto es la siguiente:

$$\mu - \frac{1}{2} \sigma^2 = \text{Parámetro de Salto}$$

Por lo tanto, con la aplicación de un muestreo por el método de Monte Carlo para esta distribución es posible generar un conjunto de escenarios con igual probabilidad de ocurrencia (Cristobal y col., 2013), los cuales pueden ser usados para la consideración de la incertidumbre de forma estocástica en problemas de optimización como el presentado en la sección 3.3.

2.1.4 Evaluación de impacto ambiental

Primeramente, hay que establecer que existen múltiples maneras de realizar la consideración del impacto ambiental, por ejemplo: la disminución de gases de efecto invernadero, la huella hidrológica de un proceso, la disminución de algún contaminante o plaga, entre otras. Una de las más aceptas, debido a que es una metodología sistemática y altamente reproducible, es la reportada por Geodkoop y Spriensma (2001), la cual considera un indicador del impacto ambiental denominado Eco-Indicador99. Esta metodología está basada en el análisis del ciclo de vida y tiene la ventaja que se puede aplicar a cualquier sustancia, proceso o actividad.

Además, el método del Eco-Indicador99 es un método enfocado al daño y se divide en tres categorías principales: daño a la salud humana, daño al ecosistema y daño a los recursos, que a su vez se subdividen en once categorías de impacto, las cuales se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Categorías y subcategorías de la metodología del Eco-Indicador99

Categoría	Subcategoría
Daño a la salud humana	Sustancias carcinógenas
	Sustancias orgánicas que afectan la respiración
	Sustancias inorgánicas que afectan la respiración
	Cambio climático
	Agotamiento de la capa de ozono
Daño al ecosistema	Sustancias eco-tóxicas
	Acidificación y eutrofización
	Uso y conversión de tierra
Daño a los recursos debido a la extracción	Recursos minerales
	Combustibles fósiles

Es importante mencionar que para el cálculo del Eco-indicador99 se tienen tres perspectivas (jerárquica, igualitaria e individualista) y cada una tiene sus propios valores de ponderación para las tres categorías de daño.

En la perspectiva jerárquica el tiempo elegido es a largo plazo, las sustancias se incluyen si hay consenso en cuanto a su efecto. En la perspectiva jerárquica se supone que los daños son evitables mediante una buena gestión. En el caso de los combustibles fósiles se hace la suposición de que los combustibles fósiles no se pueden reemplazar fácilmente.

En la perspectiva igualitaria el tiempo elegido es a muy largo plazo. Las sustancias se incluyen si no se encuentra ninguna indicación sobre su efecto. En la perspectiva igualitaria, los daños no se pueden evitar y puede dar lugar a eventos catastróficos. En el caso de los combustibles fósiles se hace la suposición de que los combustibles fósiles no pueden ser sustituidos.

En la perspectiva individualista el tiempo elegido es a corto plazo (100 años o menos), las sustancias se incluyen si se ha completado la prueba sobre su efecto. En la perspectiva individualista, se supone que los daños son objeto de reembolso por el desarrollo tecnológico y económico. En el caso de los combustibles fósiles se hace la suposición de que los combustibles fósiles no pueden agotarse. Por lo tanto, quedan fuera de ponderación.

2.2 Antecedentes

Recientemente, la biomasa ha sido identificada como un recurso renovable para la producción de biocombustibles, químicos y otros productos de alto valor agregado usando diversas tecnologías de procesamiento (Ng y col., 2015). En este contexto, Torjai y col. (2015) sugirió contemplar el concepto de cadena de suministro en la discusión del procesamiento de la biomasa. Además, Liew y col. (2014) concluyó que el uso de los biocombustibles ha aumentado en los últimos años pero es necesaria la evaluación de su potencial desde el punto de vista social, salud humana, económica y ambiental antes de implementarlos para el reemplazo de los combustibles fósiles. Por otro lado, Emery y col (2015) mencionaron que la implementación de biorefinerías requiere el análisis de varios aspectos, especialmente la producción de biomasa y productos pues estos factores determinan la eficacia de un sistema de producción de biocombustibles.

Acorde a los trabajos anteriores, Hosseini y Shah (2011) y Yue y col (2014) han descrito los retos clave así como las oportunidades en el modelamiento y optimización de cadenas de suministro conocidas como biomasa-bioenergía. Estos autores demostraron que el modelamiento y optimización a diferentes niveles de escala juegan un rol importante para abordar los diferentes retos. Entre los principales retos definidos por Hosseini y Shah (2011) está la integración de los diferentes componentes de las cadenas de suministro sin realizar ninguna suposición previa de la estructura fundamental de la red.

Adicionalmente, Gold y Seuring (2011) reportaron que las publicaciones acerca del manejo de las cadenas de suministro basadas en la producción de bioenergía se han enfocado en la generación de datos técnicos, económicos y ambientales para la evaluación de las diversas alternativas. También se han desarrollado modelos multi-objetivo e inventarios para el análisis del ciclo de vida. Una revisión más reciente de publicaciones fue realizada por Elia y Floudas

(2014), en este estudio se reportó que uno de los principales retos es el desarrollo de estudios de cadena de suministro a nivel nacional, así mismo se mostró que existe una falta de contribuciones acerca de producción de múltiples productos, almacenamiento en diferentes instalaciones y distribución de energéticos desde las plantas de procesamiento a los centros de distribución y consumidores finales. También, An y col. (2011) indicaron que no existen suficientes estudios acerca de las interacciones entre las plantas de procesamiento y los consumidores finales en el ámbito de producción de biocombustibles.

Por otro lado, Georgiadis y col. (2011) ilustraron como la mayoría de los trabajos publicados sobre cadenas de suministro se basan en la selección de materia prima, sitios de abastecimiento, plantas de procesamiento, y mercados. En este sentido, existen varios trabajos que se han enfocado en el diseño de cadenas de suministro asociadas a biorefinerías; por ejemplo, Sammons y col. (2007) propusieron una estructura flexible para optimizar el portafolio de productos y la configuración de procesos en biorefinerías integradas. Mansoornejad y col. (2010) y Santibañez-Aguilar y col. (2011) contemplaron la utilización de múltiples materias primas para la planificación de la producción en biorefinerías. Elia y col. (2012) propusieron una estructura de optimización para una cadena de suministro a nivel nacional para producción de energía basada en biomasa, carbón y gas natural, proponiendo reemplazar los combustibles fósiles en varios porcentajes. Shabani y Sowlati (2013) presentaron un estudio para determinar la configuración de una cadena de suministro basada en biomasa forestal para producir potencia eléctrica. Haankuku y col. (2015) propusieron un modelo de programación matemática mixto entero lineal para determinar el precio adecuado del etanol producido así como la localización de las plantas de procesamiento. Además, una formulación matemática para la optimización de la operación de las cadenas de suministro fue desarrollada por Yue y You (2014). También, Ahn y col. (2015) presentaron un modelo determinístico de programación matemática para la planificación de la producción de biodiésel a partir de micro algas.

En cuanto a la incorporación de criterios ambientales en las cadenas de suministro de biocombustibles, Moncada y col. (2014) resumieron la importancia de los modelos multi-objetivo que toman en cuenta los criterios de la sustentabilidad, es decir, los aspectos ambiental, económico y social, simultáneamente. Más recientemente, Kremer y col. (2016) realizaron un reporte de las diferentes ventajas por la incorporación de criterios de sustentabilidad en las cadenas de suministro. Otros autores han evaluado el impacto ambiental en cadenas de suministro

y biorefinerías por distintas metodologías. Mele y col. (2009) integraron aspectos ambientales en el diseño de una cadena productiva de etanol mediante un modelo de programación mixto entero lineal. El modelo propuesto por Mele y col (2009) fue utilizado por Kostin y col. (2012) para identificar los objetivos ambientales redundantes en el diseño de biorefinerías. Recientemente, Murillo-Alvarado y col. (2015) determinaron el impacto ambiental, con la metodología del Eco-indicador99, en una cadena de valor para uso de residuos de Agave. D'Avino y col. (2015) evaluaron el impacto ambiental considerando el efecto de los sub productos en cadenas de suministro productoras de biodiésel. Trapp y Sarkis (2016) desarrollaron un modelo de programación matemática mixto entero lineal para seleccionar los centros de abastecimiento en cadenas de suministro sustentables. También, una estructura para la optimización de una cadena de valor capaz de considerar el costo total y la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero fue propuesta por Zhang y col. (2014). Adicionalmente, You y col. (2012) y Santibañez-Aguilar y col. (2014) involucraron el aspecto social, ambiental y económico en la planificación de cadenas productivas.

Es importante mencionar que los estudios acerca la optimización de cadenas de suministro pueden ser categorizados en dos principales perspectivas: en estado estable y dinámica. Cabe destacar que los trabajos anteriores acerca de la optimización de cadenas de suministro se han desarrollado bajo condiciones de estado estable. Alguno de los trabajos que han extendido el análisis para la consideración del tiempo como un importante factor en las cadenas de suministro es el presentado por Basnet y Leung (2005), en el cual analizó el nivel de inventario bajo demanda dinámica. También Shabani y Sowlati (2013) presentaron un modelo matemático para la optimización dinámica con el fin de obtener la configuración de una cadena de suministro basada en biomasa forestal. Posteriormente, Cambero y col. (2015) desarrollaron un modelo multi-periodo para optimizar la cadena de suministro para producir bioenergía y biocombustibles simultáneamente a partir de residuos forestales. Sin embargo, la consideración de la dinámica en los trabajos previos ha sido través de ecuaciones de diferencia, la cual puede ser una pobre aproximación al comportamiento real de cualquier proceso industrial, en especial las cadenas de suministro. Además, los trabajos anteriores no involucran ningún aspecto en el control de la producción de biocombustibles.

La mayoría de los trabajos mencionados previamente asumen que los parámetros suministrados a los modelos desarrollados son nominales y por lo tanto las soluciones obtenidas a

partir de ellos son las mejores desde los diversos puntos de vista abordados. Sin embargo, en muchas ocasiones, los datos específicos de algún caso de estudio no son conocidos completamente; en otras palabras, tienen una incertidumbre asociada, por lo cual las soluciones obtenidas a través de datos nominales pueden proveer valores óptimos para un caso concreto, no obstante pueden representar soluciones muy pobres para otras condiciones. Por esta razón, la incertidumbre es un aspecto importante a considerar cuando se planifican las cadenas de suministro, especialmente en las que son basadas en sistemas altamente volátiles, como las basadas en biomasa ya que su disponibilidad depende las condiciones climáticas, tiempo de vida, entre otros factores; lo cual provoca que éstos sistemas tengan una alta incertidumbre asociada.

Existen dos métodos principales para la optimización bajo incertidumbre: por un lado está la programación estocástica y por otro se encuentra la optimización robusta (ver Sahinidis, 2004). En el área de cadenas de suministro, existen grandes avances el desarrollo de modelos de optimización que consideran múltiples variantes para los parámetros inciertos. En este sentido, la demanda ha sido el parámetro más estudiado (Gullén-Gosalbez y col. 2005). Otros modelos se han enfocado en incertidumbres asociadas al ambiente (Guiillén-Gosalbez y Grossmann, 2009). Por otro lado, McCarty y col. (2014) consideraron la importancia del precio en el riesgo de inversión en una planta de biocombustibles bajo un precio de producto incierto. Desafortunadamente, la inclusión de incertidumbre genera problemas más complejos y por lo tanto mayores tiempos de cómputo (Quaglia y col. 2013). Sin embargo, sigue siendo una extensión natural de los problemas determinísticos.

La mayoría de los modelos bajo incertidumbre optimizan el valor esperado de la función objetivo propuesta, pero es necesaria alguna medida de control para el funcionamiento del sistema en el espacio en que se dan los parámetros inciertos. En este contexto, Kostin y col. (2012) desarrollaron una estrategia para diseñar cadenas de suministro considerando el riesgo asociado con la demanda incierta. Sahling y Kayser (2016) propusieron una metodología para determinar la configuración de la cadena de suministro para una planificación a largo plazo considerando la demanda incierta. Adicionalmente, Akbari y Karimi (2015) presentaron una estrategia de optimización robusta para la planificación de una cadena de suministro bajo incertidumbre en la capacidad de producción. Cabe destacar que la revisión bibliográfica previa indica que no existen trabajos que contemplen la posibilidad de planificar una cadena de suministro bajo precio incierto de la materia prima.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología consta de tres etapas: la primera aborda el problema de planificación de un sistema de conversión de biomasa bajo un esquema dinámico usando un modelo de control predictivo para producir un problema de optimización dinámico; el cual es reformulado como un problema mixto entero no lineal. La segunda consiste en la incorporación de la incertidumbre a la cadena de suministro para la evaluación del riesgo financiero. La tercera etapa contempla la extensión del modelo de incertidumbre para considerar aspectos económicos y ambientales simultáneamente. En este sentido, se desarrollan varios modelos matemáticos con algunas similitudes para la aplicación a las diferentes etapas; los cuales se describen en los apartados siguientes.

3.1 Optimización dinámica de un sistema de biorefinerías

La presente sección de la metodología involucra la planificación óptima de una cadena de suministro basada en procesamiento de biomasa considerando como función objetivo la maximización de la ganancia para regular el comportamiento de la cadena de suministro a través de un modelo no lineal de control predictivo. La Figura 3.1 muestra las principales consideraciones para la cadena productiva. La cadena de suministro contempla la posibilidad de producir biocombustibles y otros químicos especiales a partir de diversos tipos de biomasa; la cual puede ser obtenida a través de un conjunto de centros de suministro potenciales. Es importante notar que la disponibilidad de materia prima en estos centros de suministro está limitada y varía con el tiempo. Además, la Figura 3.1 considera flujo de material y flujo de información entre los diferentes nodos de la cadena productiva. Finalmente, la superestructura ilustra que cada planta de procesamiento puede utilizar distintas tecnologías para producir un conjunto de productos con diversas materias primas y cada ente de la cadena de suministro es modelado de manera dinámica para tomar en cuenta el almacenamiento de los diversos materiales.

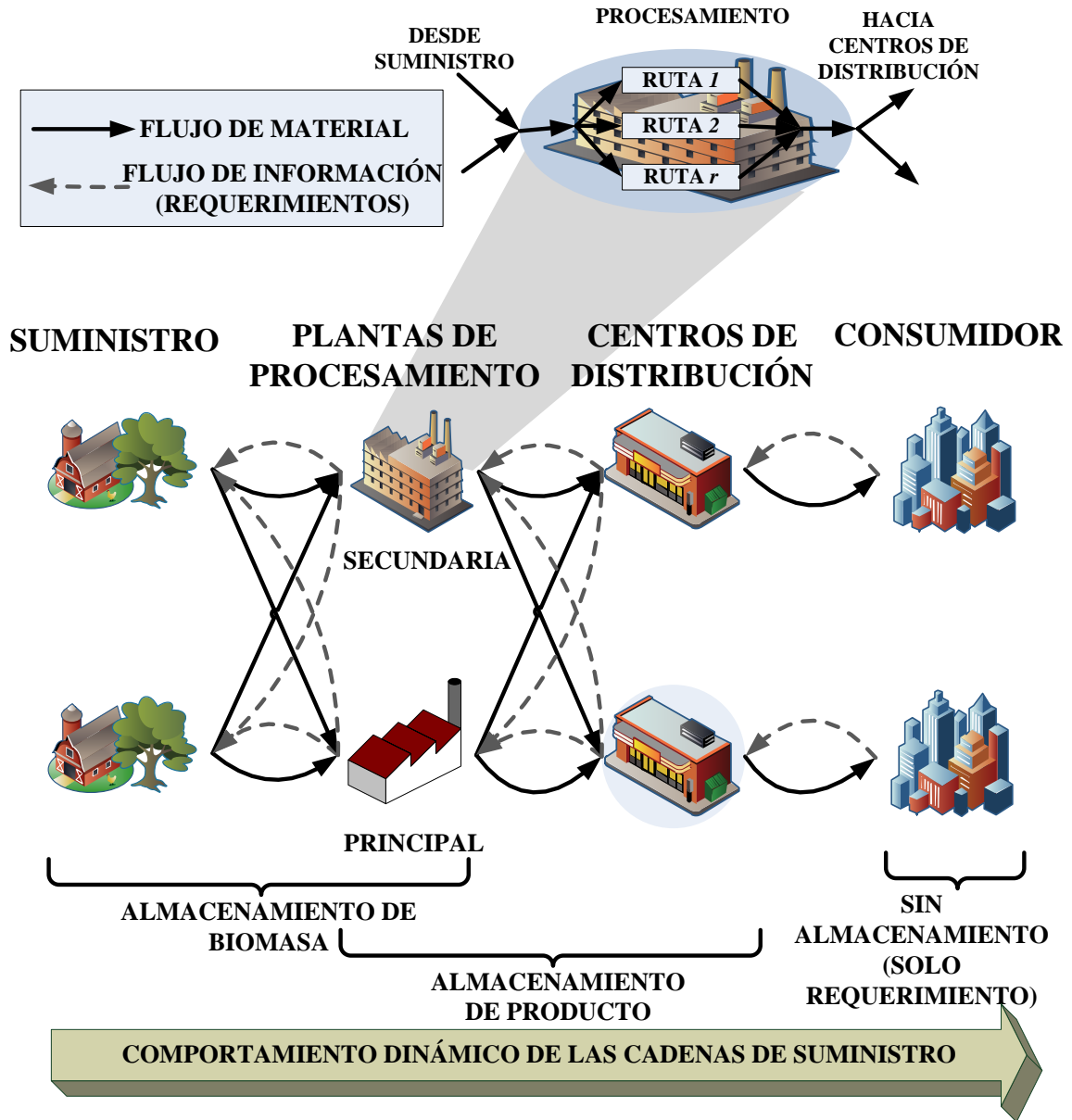


Figura 3.1 Superestructura para la planificación dinámica de una cadena de suministro procesadora de biomasa

3.1.1 Modelo matemático para cadena de suministro dinámica

Antes de describir el modelo matemático, es necesario definir los índices considerados en el modelo de optimización dinámica de una cadena de suministro. En este sentido, existen 3 nodos considerados: centros de abastecimiento, plantas de procesamiento y centros de distribución denotados con los índices s , ph y dc . Adicionalmente, los materiales son definidos

por el índice m para la biomasa y p para los productos. Por otro lado, las tecnologías de procesamiento son dadas por el índice r y las economías de escala por el índice q . Finalmente, se eligen los índices e y o para la consideración de la dinámica en la cadena productiva, donde el primero denota el número de elementos finitos y el segundo el número de puntos de colocación ortogonal para la solución de las ecuaciones diferenciales resultantes.

3.1.1.1 Inventario de materia prima en centros de abastecimiento

El cambio en el nivel de inventario de la materia prima en los centros de abastecimiento ($I_{m,h}^{suppliers}(t)$) es modelado a través de una ecuación diferencial que toma en cuenta la velocidad de producción de materia prima en dichos centros ($M_{m,h}^{prod}(t)$) así como la materia prima enviada hacia la plantas de procesamiento ($M_{m,h,ph}^{h-ph}(t)$ y $M_{m,h}^{h-main}(t)$).

$$\frac{d[I_{m,h}^{suppliers}(t)]}{dt} = M_{m,h}^{prod}(t) - \sum_{ph \in PH} M_{m,h,ph}^{h-ph}(t) - M_{m,h}^{h-main}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.1)$$

3.1.1.2 Inventario de materia prima en las plantas de procesamiento

El cambio en el inventario de materia prima en las plantas de procesamiento principal y secundarias ($I_{m,ph}^{rm-plants}(t)$, $I_m^{rm-main}(t)$) es igual a la suma de la tasa de transporte desde los centros de suministro a las plantas de procesamiento ($Me_{m,h,ph}^{h-ph}(t)$, $Me_{m,h}^{h-main}(t)$) menos la materia prima total que es usada para el procesamiento ($M_{m,r,ph}^{route, processing}(t)$, $M_{m,r}^{route, main-processing}(t)$) para obtener los productos.

$$\frac{d[I_{m,ph}^{rm-plants}(t)]}{dt} = \sum_{h \in H} Me_{m,h,ph}^{h-ph}(t) - \sum_{r \in R} M_{m,r,ph}^{route, processing}(t), \quad \forall m \in M, ph \in PH \quad (3.1.2)$$

$$\frac{d[I_m^{rm-main}(t)]}{dt} = \sum_{h \in H} Me_{m,h}^{h-main}(t) - \sum_{r \in R} M_{m,r}^{route, main-processing}(t), \quad \forall m \in M \quad (3.1.3)$$

3.1.1.3 Inventario de producto en las plantas de procesamiento

Por otro lado, los productos pueden ser almacenados en las plantas de procesamiento; en este sentido, el cambio en el nivel de inventario ($I_{m,ph}^{rm-plants}(t)$, $I_m^{rm-main}(t)$) es igual a la razón de producción de producto ($P_{k,r,ph}^{route\ processing}(t)$, $P_{k,r}^{route\ main-processing}(t)$) menos la razón de transporte del producto a los centros de distribución.

$$\frac{d[I_{k,ph}^{pr-plants}(t)]}{dt} = \sum_{r \in R} P_{k,r,ph}^{route\ processing}(t) - \sum_{dc \in DC} P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t), \quad \forall k \in K, ph \in PH \quad (3.1.4)$$

$$\frac{d[I_k^{pr-main}(t)]}{dt} = \sum_{r \in R} P_{k,r}^{route\ main-processing}(t) - \sum_{dc \in DC} P_{k,dc}^{main-dc}(t), \quad \forall k \in K \quad (3.1.5)$$

3.1.1.4 Inventario de producto en los centros de distribución

Además, el modelo matemático contempla la posibilidad de almacenar el producto en los centros de distribución para finalmente ser enviado a los consumidores y satisfacer una demanda en un tiempo dado. La ecuación que define el nivel de inventario de producto ($I_{k,dc}^{distr-centers}(t)$) considera la velocidad a la que es recibido el producto desde las plantas de procesamiento ($Pe_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t)$, $Pe_{k,dc}^{main-dc}(t)$) y la velocidad a la que son abastecidos los consumidores ($P_{k,dc}^{sale}(t)$).

$$\frac{d[I_{k,dc}^{distr-centers}(t)]}{dt} = \sum_{ph \in PH} Pe_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) + Pe_{k,dc}^{main-dc}(t) - P_{k,dc}^{sale}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.6)$$

3.1.1.5 Continuidad de nivel de inventario

Con la finalidad de garantizar la continuidad de los niveles de inventarios para cada horizonte de tiempo, el nivel de inventario de cualquier material en alguna instalación de la cadena de suministro al inicio del horizonte de tiempo ($I_{materials,locations}^{locations}(t)|_{t=0}$), es igual al nivel de inventario al final del horizonte de tiempo ($I_{materials,locations}^{locations}(t)|_{t=Horizon}$).

$$I_{materials,locations}^{locations}(t)\Big|_{t=0} = I_{materials,locations}^{locations}(t)\Big|_{t=Horizon}, \quad \forall M \cup K \in MATERIALS, \quad H \cup PH \cup DC \cup MAIN \in LOCATIONS \quad (3.1.7)$$

3.1.1.6 Ordenes de materia prima desde las plantas de procesamiento a los sitios de abastecimiento

Adicionalmente, el modelo permite transmitir información acerca del comportamiento y requerimientos de la cadena de suministro entre dos diferentes locaciones, La información es transmitida a través de las órdenes desde un nodo superior a otro nodo inferior. La variación del valor de las ordenes desde las plantas de procesamiento a los sitios de suministro ($O_{m,h,ph}^{s-facilities}(t)$), $O_{m,h}^{s-main}(t)$) es dado por el requerimiento de materia prima ($Rq_{m,h,ph}^{facilities}(t)$, $Rq_{m,h}^{main}(t)$) menos la materia prima que es recibida para satisfacer la materia prima necesaria en las plantas de procesamiento ($M_{m,h,ph}^{h-ph}(t)$, $M_{m,h}^{h-main}(t)$).

$$\frac{d\left[O_{m,h,ph}^{s-facilities}(t)\right]}{dt} = Rq_{m,h,ph}^{facilities}(t) - M_{m,h,ph}^{h-ph}(t), \quad \forall m \in M, h \in H, ph \in PH \quad (3.1.8)$$

$$\frac{d\left[O_{m,h}^{s-main}(t)\right]}{dt} = Rq_{m,h}^{main}(t) - M_{m,h}^{h-main}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.9)$$

3.1.1.7 Ordenes de producto desde centros de distribución hasta plantas de procesamiento

Además, los centros de distribución requieren productos desde las plantas de procesamiento; por esta razón, se ha definido la variación en las ordenes de producto en los centros de distribución ($O_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t)$, $O_{k,dc}^{main-dc}(t)$) como el producto requerido desde las plantas de procesamiento ($Rq_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t)$, $Rq_{k,dc}^{main-dc}(t)$) menos el producto que llega a los centros de distribución ($P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t)$, $P_{k,dc}^{main-dc}(t)$).

$$\frac{d\left[O_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t)\right]}{dt} = Rq_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) - P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t), \quad \forall k \in K, ph \in PH, dc \in DC \quad (3.1.10)$$

$$\frac{d \left[O_{k,dc}^{main-dc}(t) \right]}{dt} = Rq_{k,dc}^{main-dc}(t) - P_{k,dc}^{main-dc}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.11)$$

3.1.1.8 Ordenes de producto desde los consumidores a los centros de distribución

Finalmente, se han considerado los balances para las ordene provenientes de los consumidores hacia los centros de distribución ($O_{k,dc}^{dc}(t)$). En este sentido, los centros de distribución pueden satisfacer la demanda a través de material enviado a los consumidores finales ($P_{k,dc}^{sale}(t)$).

$$\frac{d \left[O_{k,dc}^{dc}(t) \right]}{dt} = Rq_{k,dc}^{dc}(t) - P_{k,dc}^{sale}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.12)$$

3.1.1.9 Continuidad de ordenes

La continuidad de las órdenes al final del horizonte de tiempo debe estar garantizada. El valor de las ordenes de cualquier material desde en una instalación a otra es igual al inicio y al final del horizonte.

$$O_{materials,loc1,loc2}^{locations}(t) \Big|_{t=0} = O_{materials,loc1,loc2}^{locations}(t) \Big|_{t=Horizon}, \quad \forall M \cup K \in MATERIALS, \quad H \cup PH \cup DC \cup MAIN \in LOC1, LOC2 \quad (3.1.13)$$

3.1.1.10 Disponibilidad de material

La producción de materia prima en cualquier sitio de abastecimiento en cualquier tiempo está limitada por un valor máximo para la producción de materia prima debido a que la producción de esta depende de las condiciones climáticas del lugar de producción y por tanto de la temporalidad.

$$\max M_{m,h}^{prod}(t) \geq M_{m,h}^{prod}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.14)$$

3.1.1.11 *Demanda máxima*

La cantidad de producto que puede ser vendido en los mercados está limitada por la demanda total de cualquier producto en el mercado para cada uno de los tiempos.

$$P_{k,dc}^{\text{demand}}(t) \geq P_{k,dc}^{\text{sale}}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.15)$$

3.1.1.12 *Restricciones para el control de las ordenes originarias en los centros de consumo*

Las principales acciones de control son el nivel de las ordenes desde los consumidores a los centros de distribución ($O_{k,dc}^{dc}(t)$). En este sentido, el nivel de las órdenes para el primer punto de colocación ortogonal para cualquier elemento finito es igual al segundo punto de colocación para el mismo elemento finito. Adicionalmente, el nivel de las órdenes para el tercer punto de colocación es igual a cero ya que el tiempo de respuesta de la cadena de suministro es igual al tamaño de cada elemento; en otras palabras, si el producto no es satisfecho a un tiempo determinado y no puede ser satisfecho en otro tiempo, y la orden inicial del siguiente elemento finito es igual a cero.

$$O_{k,dc}^{dc}(t)|_{t \in (o=1)} = O_{k,dc}^{dc}(t)|_{t \in (o=2)}, \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.16)$$

$$O_{k,dc}^{dc}(t)|_{t \in (o=3)} = 0, \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.17)$$

3.1.1.13 *Restricciones para el flujo transportado entre las diferentes instalaciones*

El modelo matemático contempla varias restricciones para el material transportado entre las diferentes instalaciones de la cadena productiva. Es importante mencionar que el tiempo de transporte considerado es igual a la diferencia entre un punto de colocación ortogonal y otro con el fin de definir que la tasa de material que entra a un nodo de la cadena de suministro al tiempo t es igual a la tasa de material que salió rumbo a éste nodo en un tiempo anterior (ver ecuaciones (18)-(25)). Cabe destacar que para el tercer punto de colocación ortogonal en cualquier elemento finito es el punto previo al primer punto de colocación del siguiente elemento.

$$M_{m,h,ph}^{h-ph}(t) \Big|_{t \in f(e,o)} = M e_{m,h,ph}^{h-ph}(t) \Big|_{t \in f(e,o+1)}, \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.18)$$

$$M_{m,h}^{h-main}(t) \Big|_{t \in f(e,o)} = M e_{m,h}^{h-main}(t) \Big|_{t \in f(e,o+1)}, \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.19)$$

$$P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) \Big|_{t \in f(e,o)} = P e_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) \Big|_{t \in f(e,o+1)}, \quad \forall k \in K, ph \in PH, dc \in DC \quad (3.1.20)$$

$$P_{k,dc}^{main-dc}(t) \Big|_{t \in f(e,o)} = P e_{k,dc}^{main-dc}(t) \Big|_{t \in f(e,o+1)}, \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.21)$$

$$M_{m,h,ph}^{h-ph}(t) \Big|_{t=HORIZON} = M e_{m,h,ph}^{h-ph}(t) \Big|_{t=0}, \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.22)$$

$$M_{m,h}^{h-main}(t) \Big|_{t=HORIZON} = M e_{m,h}^{h-main}(t) \Big|_{t=0}, \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.23)$$

$$P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) \Big|_{t=HORIZON} = P e_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) \Big|_{t=0}, \quad \forall k \in K, ph \in PH, dc \in DC \quad (3.1.24)$$

$$P_{k,dc}^{main-dc}(t) \Big|_{t=HORIZON} = P e_{k,dc}^{main-dc}(t) \Big|_{t=0}, \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.25)$$

3.1.1.14 Límites de transporte

Existe la necesidad de establecer límites para el transporte debido a que capacidad para transportar material del sistema no es ilimitada, pues depende de la infraestructura y el tipo de transporte. Por esta razón, las siguientes ecuaciones son usadas para determinar las cantidades mínimas y máximas que pueden ser transportadas entre las diferentes instalaciones.

$$M_{m,h,ph}^{h-ph}(t) \leq \text{MAX } M_{m,h,ph}^{h-ph} \cdot y_{m,h,ph}^{h-ph}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.26)$$

$$M_{m,h}^{h-main}(t) \leq \text{MAX } M_{m,h}^{h-main} \cdot y_{m,h}^{h-main}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.27)$$

$$P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) \leq \text{MAX } P_{k,ph,dc}^{ph-dc} \cdot y_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t), \quad \forall k \in K, ph \in PH, dc \in DC \quad (3.1.28)$$

$$P_{k,dc}^{main-dc}(t) \leq \text{MAX } P_{k,dc}^{main-dc} \cdot y_{k,dc}^{main-dc}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.29)$$

$$M_{m,h,ph}^{h-ph}(t) \geq \text{MIN } M_{m,h,ph}^{h-ph} \cdot y_{m,h,ph}^{h-ph}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.30)$$

$$M_{m,h}^{h-main}(t) \geq \text{MIN } M_{m,h}^{h-main} \cdot y_{m,h}^{h-main}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.31)$$

$$P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) \geq \text{MIN } P_{k,ph,dc}^{ph-dc} \cdot y_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t), \quad \forall k \in K, ph \in PH, dc \in DC \quad (3.1.32)$$

$$P_{k,dc}^{main-dc}(t) \geq \text{MIN } P_{k,dc}^{main-dc} \cdot y_{k,dc}^{main-dc}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.33)$$

3.1.1.15 *Procesamiento*

Los productos obtenidos en las plantas de procesamiento ($P_{k,m,r,ph}^{produced}(t)$, $P_{k,m,r}^{main-produced}(t)$) son igual a la cantidad de materia prima distribuida a cada una de las rutas de procesamiento ($M_{m,k,r,ph}^{processing}$, $M_{m,k,r}^{main-processing}(t)$) multiplicada por un factor de conversión ($\alpha_{m,k,r}^{conversion}$). Es importante resaltar que el tiempo de procesamiento es considerado por la diferencia entre dos puntos de colocación ortogonal consecutivos.

$$M_{m,r,ph}^{processing}(t) = \sum_{k \in K} M_{m,k,r,ph}^{product}(t), \quad \forall m \in M, r \in R, ph \in PH \quad (3.1.34)$$

$$\alpha_{m,k,r}^{conversion} M_{m,k,r,ph}^{product}(t) \Big|_{t \in f(e,o)} = P_{k,m,r,ph}^{produced}(t) \Big|_{t \in f(e,o+1)}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH \quad (3.1.35)$$

$$P_{k,r,ph}^{processing}(t) = \sum_{m \in M} P_{k,m,r,ph}^{produced}(t), \quad \forall k \in K, r \in R, ph \in PH \quad (3.1.36)$$

$$M_{m,r}^{main-processing}(t) = \sum_{k \in K} M_{m,k,r}^{product}(t), \quad \forall m \in M, r \in R \quad (3.1.37)$$

$$\alpha_{m,k,r}^{conversion} M_{m,k,r}^{product}(t) \Big|_{t \in f(e,o)} = P_{k,m,r}^{main-produced}(t) \Big|_{t \in f(e,o+1)}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R \quad (3.1.38)$$

$$P_{k,r}^{main-processing}(t) = \sum_{m \in M} P_{k,m,r}^{main-produced}(t), \quad \forall k \in K, r \in R \quad (3.1.39)$$

3.1.1.16 *Economías de escala*

Para modelar las economías de escala y los costos de capital para el procesamiento se han propuesto dos disyunciones. La primera disyunción establece que el procesamiento es necesario a través del tiempo; la cual está asociada a una variable binaria dependiente del tiempo ($y_{m,k,r,ph,q}^{processing}(t)$). En este contexto, si la materia prima es procesada en cualquier tiempo, la variable binaria es activada ($y_{m,k,r,ph,q}^{processing}(t)$). Por otro lado, la segunda disyunción está asociada a

una variable binaria sin dependencia con el tiempo ($y_{m,k,r,ph,q}^{processing\ route}$); la cual es activada cuando al menos una de las variables con dependencia del tiempo es activada. Las disyunciones para las plantas de procesamiento secundarias y principal son mostradas a continuación:

$$\forall t \left[\begin{array}{l} \text{time } Y_{m,k,r,ph,q}^{processing\ route}(t) \\ M_{m,k,r,ph}^{product} (t) \leq \text{UPP } M_{m,k,r,ph,q}^{processing\ route} \\ M_{m,k,r,ph}^{product} (t) \geq \text{LOW } M_{m,k,r,ph,q}^{processing\ route} \end{array} \right], \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH$$

$$\forall q \left[\begin{array}{l} Y_{m,k,r,ph,q}^{processing\ route} \\ C_{m,k,r,ph,q}^{CAP} = C_{m,k,r,ph,q}^{FIX} + C_{m,k,r,ph,q}^{VAR} \cdot CAP M_{m,k,r,ph}^{processing} \end{array} \right], \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH$$

$$\forall t \left[\begin{array}{l} \text{time } Y_{m,k,r,q}^{main-processing\ route}(t) \\ M_{m,k,r}^{product} (t) \leq \text{UPP } M_{m,k,r,q}^{main-processing\ route} \\ M_{m,k,r}^{product} (t) \geq \text{LOW } M_{m,k,r,q}^{main-processing\ route} \end{array} \right], \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R$$

$$\forall q \left[\begin{array}{l} Y_{m,k,r,q}^{main-processing\ route} \\ C_{m,k,r,q}^{main-CAP} = C_{m,k,r,q}^{main-FIX} + C_{m,k,r,q}^{main-VAR} \cdot CAP M_{m,k,r}^{main-processing} \end{array} \right], \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R$$

Las disyunciones previas son reformuladas con el propósito de resolver el modelo de programación matemática. Es importante notar que la suma de las variables binarias sin dependencia con el tiempo ($y_{m,k,r,ph,q}^{processing\ route}$) respecto al intervalo de las economías de escala igual a 1 ya que solo un intervalo debe ser seleccionado.

$$\sum_{q \in Q} y_{m,k,r,ph,q}^{processing\ route} = 1, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH \quad (3.1.40)$$

$$\sum_{q \in Q} y_{m,k,r,q}^{main-processing} = 1, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R \quad (3.1.41)$$

Además, la formulación matemática considera que la materia prima puede ser enviada para procesamiento a cualquier tiempo. Esta materia prima es discretizada en varias secciones restringida por límites máximos y mínimos para establecer las cotas de las economías escala. Consecuentemente, la variable de flujo de materia prima que es discretizada toma un valor cuando la variable binaria para el procesamiento sin dependencia con el tiempo es igual a uno.

$$dis M_{m,k,r,ph,q}^{processing} (t) \leq UPP M_{m,k,r,ph,q}^{processing} \cdot time y_{m,k,r,ph,q}^{processing} (t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, \quad ph \in PH, q \in Q \quad (3.1.42)$$

$$dis M_{m,k,r,ph,q}^{processing} (t) \geq LOW M_{m,k,r,ph,q}^{processing} \cdot time y_{m,k,r,ph,q}^{processing} (t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, \quad ph \in PH, q \in Q \quad (3.1.43)$$

$$M_{m,k,r,ph}^{processing} (t) = \sum_{q \in Q} dis M_{m,k,r,ph,q}^{processing} (t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, \quad ph \in PH \quad (3.1.44)$$

$$dis M_{m,k,r,q}^{main-processing} (t) \leq UPP M_{m,k,r,q}^{main-processing} \cdot time y_{m,k,r,q}^{main-processing} (t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, \quad q \in Q \quad (3.1.45)$$

$$dis M_{m,k,r,q}^{main-processing} (t) \geq LOW M_{m,k,r,q}^{main-processing} \cdot time y_{m,k,r,q}^{main-processing} (t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, \quad q \in Q \quad (3.1.46)$$

$$M_{m,k,r}^{main-processing} (t) = \sum_{q \in Q} dis M_{m,k,r,q}^{main-processing} (t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R \quad (3.1.47)$$

Adicionalmente, el costo de capital para las plantas de procesamiento depende de la cantidad máxima a ser procesada por cada planta de procesamiento. Es importante notar que la cantidad de materia prima a ser tratada es discretizada para permitir que se seleccione el flujo de materia prima dependiendo de las economías de escala. Todos los flujos discretizados deben de ser menores al límite máximo a ser procesado.

$$CAP M_{m,k,r,ph}^{processing} = \sum_{q \in Q} CAP-dis M_{m,k,r,ph,q}^{processing}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH \quad (3.1.48)$$

$$dis M_{m,k,r,ph,q}^{processing} (t) \leq CAP-dis M_{m,k,r,ph,q}^{processing}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, q \in Q \quad (3.1.49)$$

$$CAP-dis M_{m,k,r,ph,q}^{processing} \leq UPP M_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing} \cdot y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, q \in Q \quad (3.1.50)$$

$$dis M_{m,k,r,q}^{main-processing\ product} (t) \leq CAP-dis M_{m,k,r,q}^{main-processing}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, q \in Q \quad (3.1.51)$$

$$CAP M_{m,k,r}^{main-processing} = \sum_{q \in Q} CAP-dis M_{m,k,r,q}^{main-processing}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R \quad (3.1.52)$$

$$CAP-dis M_{m,k,r,q}^{main-processing} \leq UPP M_{m,k,r,q}^{main-processing\ route} \cdot y_{m,k,r,q}^{main-processing\ route}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, q \in Q \quad (3.1.53)$$

Subsecuentemente, el costo de capital consta de dos partes. Por un lado, el modelo considera un costo fijo; el cual es multiplicado por la variable binaria que activa uno de los intervalos para las economías de escala ($C_{m,k,r,ph,q}^{FIX} \cdot y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing}$). Por otro lado, la formulación matemática contempla una parte variable que es obtenida por la multiplicación de un costo unitario y un límite de procesamiento asociado a un intervalo para las economías de escala ($C_{m,k,r,ph,q}^{VAR} \cdot CAP M_{m,k,r,ph}^{processing}$).

$$C_{m,k,r,ph,q}^{CAP} = C_{m,k,r,ph,q}^{FIX} \cdot y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing} + C_{m,k,r,ph,q}^{VAR} \cdot CAP M_{m,k,r,ph}^{processing}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, q \in Q \quad (3.1.54)$$

$$C_{m,k,r,q}^{main-CAP} = C_{m,k,r,q}^{main-FIX} \cdot y_{m,k,r,q}^{main-processing\ route} + C_{m,k,r,q}^{main-VAR} \cdot CAP M_{m,k,r}^{main-processing}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, q \in Q \quad (3.1.55)$$

Finalmente, existen dos relaciones adicionales para las variables binarias; las cuales son para asegurar que la variable binaria ($y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing}$) es igual a 1 si y solo si alguna de las variables binarias con dependencia del tiempo ($time y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing}(t)$) es igual a 1.

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing} \geq \sum_{t \in f(e,o)} time y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing}(t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, q \in Q \quad (3.1.56)$$

$$y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing} \leq \sum_{t \in f(e,o)} time y_{m,k,r,ph,q}^{route\ processing}(t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, ph \in PH, q \in Q \quad (3.1.57)$$

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_{m,k,r,q}^{\text{main-processing route}} \geq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{m,k,r,q}^{\text{main-processing route}}(t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, q \in Q \quad (3.1.58)$$

$$y_{m,k,r,q}^{\text{main-processing route}} \leq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{m,k,r,q}^{\text{main-processing route}}(t), \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, q \in Q \quad (3.1.59)$$

3.1.1.17 Ecuaciones para almacenamiento

Existen seis tipos diferentes de almacenamiento, los cuales se diferencian por el tipo de material almacenado y el lugar donde se lleva a cabo el mismo. El primer tipo de almacenamiento está asociado a la materia prima en los lugares de abastecimiento ($I_{m,h}^{\text{suppliers}}(t)$). La segunda y tercer variedad es el almacenamiento de materia prima en las plantas de procesamiento secundarias ($I_{m,ph}^{\text{rm-plants}}(t)$) y principal ($I_m^{\text{rm-main}}(t)$). Además, se ha contemplado el almacenamiento de producto en ambas plantas de procesamiento ($I_{k,ph}^{\text{pr-plants}}(t)$, $I_k^{\text{pr-main}}(t)$), y finalmente, existe la posibilidad de almacenar producto en los centros de distribución ($I_{k,dc}^{\text{distr-centers}}(t)$). Las cantidades de material almacenado son definidas como el nivel de inventario en las diferentes instalaciones de la cadena de suministro y son limitadas por cuotas máximas (Ecuaciones (60)-(65)) y mínimas (Ecuaciones (66)-(71)). También, existen dos tipos de variables binarias para el almacenamiento; la primera variable binaria no tiene dependencia con el tiempo ($y_{m,h}^{\text{suppliers}}$, $y_{m,ph}^{\text{rm-plants}}$, $y_m^{\text{rm-main}}$, $y_{k,ph}^{\text{pr-plants}}$, $y_k^{\text{pr-main}}$ and $y_{k,dc}^{\text{distr-centers}}$) y la segunda si la presenta ($\text{time } y_{m,h}^{\text{suppliers}}(t)$, $\text{time } y_{m,ph}^{\text{rm-plants}}(t)$, $\text{time } y_m^{\text{rm-main}}(t)$, $\text{time } y_{k,ph}^{\text{pr-plants}}(t)$, $\text{time } y_k^{\text{pr-main}}(t)$); por esta razón, existen ecuaciones para relacionar y activar estas variables binarias de la misma manera que se realizó para el procesamiento (Ecuaciones (72)-(83)).

$$I_{m,h}^{\text{suppliers}}(t) \leq \text{UPP } I_{m,h}^{\text{suppliers}} \cdot \text{time } y_{m,h}^{\text{suppliers}}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.60)$$

$$I_{m,ph}^{\text{rm-plants}}(t) \leq \text{UPP } I_{m,ph}^{\text{rm-plants}} \cdot \text{time } y_{m,ph}^{\text{rm-plants}}(t), \quad \forall m \in M, ph \in PH \quad (3.1.61)$$

$$I_m^{\text{rm-main}}(t) \leq \text{UPP } I_m^{\text{rm-main}} \cdot \text{time } y_m^{\text{rm-main}}(t), \quad \forall m \in M \quad (3.1.62)$$

$$I_{k,ph}^{\text{pr-plants}}(t) \leq \text{UPP } I_{k,ph}^{\text{pr-plants}} \cdot \text{time } y_{k,ph}^{\text{pr-plants}}(t), \quad k \in K, ph \in PH \quad (3.1.63)$$

$$I_k^{\text{pr-main}}(t) \leq \text{UPP } I_k^{\text{pr-main}} \cdot \text{time } y_k^{\text{pr-main}}(t), \quad k \in K \quad (3.1.64)$$

$$I_{k,dc}^{distr-centers}(t) \leq \text{UPP} I_{k,dc}^{distr-centers} \cdot \text{time } y_{k,dc}^{distr-centers}(t), \quad k \in K, dc \in DC \quad (3.1.65)$$

$$I_{m,h}^{suppliers}(t) \geq \text{LOW} I_{m,h}^{suppliers} \cdot \text{time } y_{m,h}^{suppliers}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.66)$$

$$I_{m,ph}^{rm-plants}(t) \geq \text{LOW} I_{m,ph}^{rm-plants} \cdot \text{time } y_{m,ph}^{rm-plants}(t), \quad \forall m \in M, ph \in PH \quad (3.1.67)$$

$$I_m^{rm-main}(t) \geq \text{LOW} I_m^{rm-main} \cdot \text{time } y_m^{rm-main}(t), \quad \forall m \in M \quad (3.1.68)$$

$$I_{k,ph}^{pr-plants}(t) \geq \text{LOW} I_{k,ph}^{pr-plants} \cdot \text{time } y_{k,ph}^{pr-plants}(t), \quad k \in K, ph \in PH \quad (3.1.69)$$

$$I_k^{pr-main}(t) \geq \text{LOW} I_k^{pr-main} \cdot \text{time } y_k^{pr-main}(t), \quad k \in K \quad (3.1.70)$$

$$I_{k,dc}^{distr-centers}(t) \geq \text{LOW} I_{k,dc}^{distr-centers} \cdot \text{time } y_{k,dc}^{distr-centers}(t), \quad k \in K, dc \in DC \quad (3.1.71)$$

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_{m,h}^{suppliers} \geq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{m,h}^{suppliers}(t), \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1.72)$$

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_{m,ph}^{rm-plants} \geq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{m,ph}^{rm-plants}(t), \quad \forall m \in M, ph \in PH \quad (3.1.73)$$

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_m^{rm-main} \geq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_m^{rm-main}(t), \quad \forall m \in M \quad (3.1.74)$$

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_{k,ph}^{pr-plants} \geq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{k,ph}^{pr-plants}(t), \quad \forall k \in K, ph \in PH \quad (3.1.75)$$

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_k^{pr-main} \geq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_k^{pr-main}(t), \quad \forall k \in K \quad (3.1.76)$$

$$(\text{MaxPeriods}) \cdot y_{k,dc}^{distr-centers} \geq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{k,dc}^{distr-centers}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.77)$$

$$y_{m,h}^{suppliers} \leq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{m,h}^{suppliers}(t), \quad \forall m \in M, h \in M \quad (3.1.78)$$

$$y_{m,ph}^{rm-plants} \leq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{m,ph}^{rm-plants}(t), \quad \forall m \in M, ph \in PH \quad (3.1.79)$$

$$y_m^{rm-main} \leq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_m^{rm-main}(t), \quad \forall m \in M \quad (3.1.80)$$

$$y_{k,ph}^{pr-plants} \leq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{k,ph}^{pr-plants}(t), \quad \forall k \in K, ph \in PH \quad (3.1.81)$$

$$y_k^{pr-main} \leq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_k^{pr-main}(t), \quad \forall k \in K, \quad (3.1.82)$$

$$y_{k,dc}^{distr-centers} \leq \sum_{t \in f(e,o)} \text{time } y_{k,dc}^{distr-centers}(t), \quad \forall k \in K, dc \in DC \quad (3.1.83)$$

3.1.1.18 Costo operacional

El costo operacional es igual a un costo de operación unitario ($C_{m,k,r}^{plant, processing}$, $C_{m,k,r}^{main, processing}$) multiplicado por el flujo de material procesado ($M_{m,k,r,ph}^{product, processing}(t)$, $M_{m,k,r,ph}^{main-product, processing}(t)$); el cual depende del tipo de la materia prima m , producto obtenido k , tecnología usada r , la planta de procesamiento, así como del tiempo. Es importante destacar que esta ecuación es discretizada a lo largo del tiempo en varios puntos de colocación ortogonal (o) y un número de elementos finitos (e). Por lo tanto, con el fin de calcular el costo de operación total, es necesario integrar el costo operacional individual con respecto al tiempo para cada materia prima, producto, plantas y ruta de procesamiento.

$$C^{OPERATIONAL} = \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{ph \in PH} C_{m,k,r}^{plant, processing} \cdot M_{m,k,r,ph}^{product, processing}(t) dt + \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} C_{m,k,r}^{main, processing} \cdot M_{m,k,r,ph}^{main-product, processing}(t) dt \quad (3.1.84)$$

3.1.1.19 Costo de capital total

El costo de capital total ($C^{CAPITAL}$) es igual a la suma de los costos de capital asociados a cada una de las plantas de procesamiento ($C_{m,k,r,ph,q}^{CAP}$, $C_{m,k,r,q}^{main-CAP}$):

$$C^{CAPITAL} = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{ph \in PH} \sum_{q \in Q} C_{m,k,r,ph,q}^{CAP} + \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{q \in Q} C_{m,k,r,q}^{main-CAP} \quad (3.1.85)$$

3.1.1.20 Costo de transporte

El costo de transporte es determinado por un costo unitario de transporte por distancia y la cantidad de material transportado (C_m^m , C_k^p) multiplicado por la distancia entre los diversos nodos de la cadena de suministro ($d_{h,ph}^{h-ph}$, $d_{h,main}^{h-main}$, $d_{ph,dc}^{ph-dc}$, $d_{main,dc}^{main-dc}$) y la tasa de transporte de

material a un valor de tiempo dado ($M_{m,h,ph}^{h-ph}(t)$, $M_{m,h}^{h-main}(t)$, $P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t)$, $P_{k,dc}^{main-dc}(t)$). Por esta razón, es necesario llevar a cabo la integral con respecto al tiempo para obtener el costo total de transporte ($C^{TRANSPORTATION}$).

$$\begin{aligned}
 C^{TRANSPORTATION} = & \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{m \in M} \sum_{h \in H} \sum_{ph \in PH} C_m^{rm} \cdot d_{h,ph}^{h-ph} \cdot M_{m,h,ph}^{h-ph}(t) dt \\
 & \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{m \in M} \sum_{h \in H} C_m^{rw} \cdot d_{h,main}^{h-main} \cdot M_{m,h}^{h-main}(t) dt \\
 & \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{k \in K} \sum_{ph \in PH} \sum_{dc \in DC} C_k^p \cdot d_{ph,dc}^{ph-dc} \cdot P_{k,ph,dc}^{ph-dc}(t) dt \\
 & \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{k \in K} \sum_{dc \in DC} C_k^p \cdot d_{main,dc}^{main-dc} \cdot P_{k,dc}^{main-dc}(t) dt
 \end{aligned} \tag{3.1.86}$$

3.1.1.21 Costo de almacenamiento

El costo de almacenamiento ($C^{STORAGE}$) es dividido en dos partes. La primera parte considera el costo de capital por almacenamiento y la segunda parte contempla el costo de almacenamiento que depende del nivel de inventario a lo largo del tiempo. El costo de capital por almacenamiento está formada por una parte fija, más un término que depende de la máxima cantidad almacenada en todo el horizonte del tiempo. Este término toma en consideración un costo unitario de almacenamiento ($C_{s_{m,h}}^{suppliers}$, $C_{s_{m,ph}}^{rm-plants}$, $C_{s_m}^{rm-main}$, $C_{s_{k,ph}}^{pr-plants}$, $C_{s_k}^{pr-main}$, $C_{s_{k,dc}}^{distr-centers}$) multiplicado por el máximo nivel de inventario ($UPP I_{m,h}^{suppliers}$, $UPP I_{m,ph}^{rm-plants}$, $UPP I_m^{rm-main}$, $UPP I_{k,ph}^{pr-plants}$, $UPP I_k^{pr-main}$, $UPP I_{k,dc}^{distr-centers}$) y la variable binaria para la existencia de almacenamiento ($y_{m,h}^{suppliers}$, $y_{m,ph}^{rm-plants}$, $y_m^{rm-main}$, $y_{k,ph}^{pr-plants}$, $y_k^{pr-main}$, $y_{k,dc}^{distr-centers}$). Cabe destacar que las variables binarias para la existencia del almacenamiento sin dependencia del tiempo es igual a 1 si y solo si al menos una de las variables binarias con dependencia del tiempo ($time y_{m,h}^{suppliers}(t)$, $time y_{m,ph}^{rm-plants}(t)$, $time y_m^{rm-main}(t)$, $time y_{k,ph}^{pr-plants}(t)$, $time y_k^{pr-main}(t)$) son igual a 1.

Por otro lado, los costos de operación para el almacenamiento involucra una integral con respecto al tiempo ($OP C_{s_{m,h}}^{suppliers}$, $OP C_{s_{m,ph}}^{rm-plants}$, $OP C_{s_m}^{rm-main}$, $OP C_{s_{k,ph}}^{pr-plants}$, $OP C_{s_k}^{pr-main}$, $OP C_{s_{k,dc}}^{distr-centers}$)

multiplicado por el nivel de inventario para los diferentes tipos de almacenamiento ($I_{m,h}^{suppliers}(t)$,

$I_{m,ph}^{rm-plants}(t)$, $I_m^{rm-main}(t)$, $I_{k,ph}^{pr-plants}(t)$, $I_k^{pr-main}(t)$, $I_{k,dc}^{distr-centers}(t)$).

$$\begin{aligned}
 C^{STORAGE} = & \sum_{m \in M} \sum_{h \in H} \left(C_{m,h}^{suppliers} \cdot UPP I_{m,h}^{suppliers} \cdot y_{m,h}^{suppliers} + \int_{t=0}^{t=HORIZON} OP C_{m,h}^{suppliers} \cdot I_{m,h}^{suppliers}(t) dt \right) \\
 & + \sum_{m \in M} \sum_{ph \in PH} \left(C_{m,ph}^{rm-plants} \cdot UPP I_{m,ph}^{rm-plants} \cdot y_{m,ph}^{rm-plants} + \int_{t=0}^{t=HORIZON} OP C_{m,ph}^{rm-plants} \cdot I_{m,ph}^{rm-plants}(t) dt(t) \right) \\
 & + \sum_{m \in M} \left(C_m^{rm-main} \cdot UPP I_m^{rm-main} \cdot y_m^{rm-main} + \int_{t=0}^{t=HORIZON} OP C_m^{rm-main} \cdot I_m^{rm-main}(t) dt(t) \right) \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{ph \in PH} \left(C_{k,ph}^{pr-plants} \cdot UPP I_{k,ph}^{pr-plants} \cdot y_{k,ph}^{pr-plants} + \int_{t=0}^{t=HORIZON} OP C_{k,ph}^{pr-plants} \cdot I_{k,ph}^{pr-plants}(t) dt(t) \right) \\
 & + \sum_{k \in K} \left(C_k^{pr-main} \cdot UPP I_k^{pr-main} \cdot y_k^{pr-main} + \int_{t=0}^{t=HORIZON} OP C_k^{pr-main} \cdot I_k^{pr-main}(t) dt(t) \right) \\
 & + \sum_{k \in K} \sum_{dc \in DC} \left(C_{k,dc}^{distr-centers} \cdot UPP I_{k,dc}^{distr-centers} \cdot y_{k,dc}^{distr-centers} + \int_{t=0}^{t=HORIZON} OP C_{k,dc}^{distr-centers} \cdot I_{k,dc}^{distr-centers}(t) dt(t) \right)
 \end{aligned} \tag{3.1.87}$$

3.1.1.22 Ganancia neta anual

La ganancia neta anual (*PROFIT*) considera los ingresos económicos por la venta de productos; los cuales son iguales a un precio de venta de producto (C_k^{sale}) multiplicado por la cantidad de producto vendido ($P_{k,dc}^{sale}(t)$). También, la ganancia incluye los costos de materia prima ($C_{m,h}^{prod} \cdot M_{m,h}^{prod}(t)$), el costo de capital anualizado ($K_F \cdot C^{CAP}$), el costo de operación ($C^{OPERATIONAL}$), costo de transporte ($C^{TRANSPORTATION}$) y el costo de almacenamiento ($C^{STORAGE}$).

$$\begin{aligned}
 PROFIT = & \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{k \in K} \sum_{dc \in DC} C_k^{sale} \cdot P_{k,dc}^{sale}(t) dt - \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{m \in M} \sum_{h \in H} C_{m,h}^{prod} \cdot M_{m,h}^{prod}(t) dt \\
 & - K_F \cdot C^{CAP} - C^{OPERATIONAL} - C^{TRANSPORTATION} - C^{STORAGE}
 \end{aligned} \tag{3.1.88}$$

3.1.1.23 *Control de la demanda de producto*

Por otro lado, se ha desarrollado una ecuación con el fin de controlar la demanda de producto que debe ser satisfecha. En este sentido, se define una variable ($CTRL^{DEMAND}$) como la diferencia entre la demanda requerida ($P_{k,dc}^{demand}(t)$) y la demanda satisfecha de producto elevada al cuadrado ($P_{k,dc}^{sale}(t)$).

$$CTRL^{DEMAND} = \int_{t=0}^{t=HORIZON} \sum_{k \in K} \sum_{dc \in DC} \left([P_{k,dc}^{demand}(t) - P_{k,dc}^{sale}(t)]^2 \right) dt \quad (3.1.89)$$

Esta ecuación es usada como función objetivo con el fin de satisfacer la mayor demanda posible en función de la demanda requerida.

3.1.2 Modelo no lineal de control predictivo

Para considerar políticas de control óptimo en conjunto con perturbaciones en una forma robusta se ha propuesto un modelo no lineal de control predictivo; el cual matemáticamente puede describirse como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } W(x,u) \text{ (NLMPC)} \\ & \text{sujeto a :} \\ & \frac{dx}{dt} = f(x,u) \\ & h(x,u) \leq 0 \\ & x^L \leq x \leq x^U \\ & u^L \leq u \leq u^U \end{aligned}$$

Donde x es el vector de variables de estado dado por el flujo de material distribuido entre las diferentes instalaciones de la cadena de suministro, así como la tasa de producción y consumo de productos y materia primas, respectivamente. u es el vector de las variables manipulables las cuales son los niveles de inventario y órdenes para los diferentes nodos. W representa la función

objetivo proporcionada en la Ecuación (89). f es la representación dinámica del comportamiento del proceso. Finalmente, las restricciones del sistema son dadas por h .

La Figura 3.2 muestra una representación de las diversas partes del problema no lineal de control predictivo, donde las variables manipulables, variables de estado y de control son definidas. Por otro lado, la Figura 3.3 ilustra la idea básica de la metodología para resolver el problema no lineal de control predictivo. Primeramente, se fija un valor objetivo de una variable denominada Y_{sp} usando un conjunto de valores para las acciones de control $u(t)$. Las acciones de control son divididas en un conjunto de intervalos de tiempo. Cabe destacar que se asume que al final de cada intervalo de tiempo se conoce y el valor de la variable Y_k requiere ajustarse al valor buscado de Y_{sp} . Entonces, cuando se conoce el valor de la variable Y_k , se resuelven un conjunto de problemas de optimización dinámicos para el intervalo de tiempo presente y los subsecuentes, con el fin de conocer las acciones de control en todos los intervalos de tiempo; sin embargo, sólo la acción del primer intervalo es aplicada al modelo dinámico y las acciones de control remanentes son descartadas. Después se repite el procedimiento para tratar de ajustar la variable Y_k a la variable Y_{sp} .

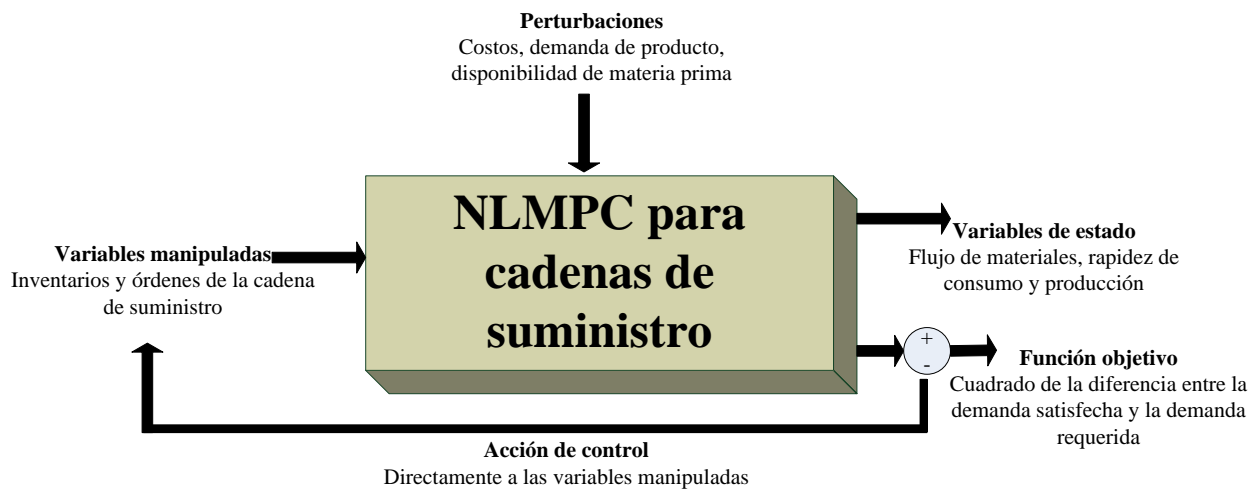


Figura 3.2 Representación de un problema no lineal de control predictivo

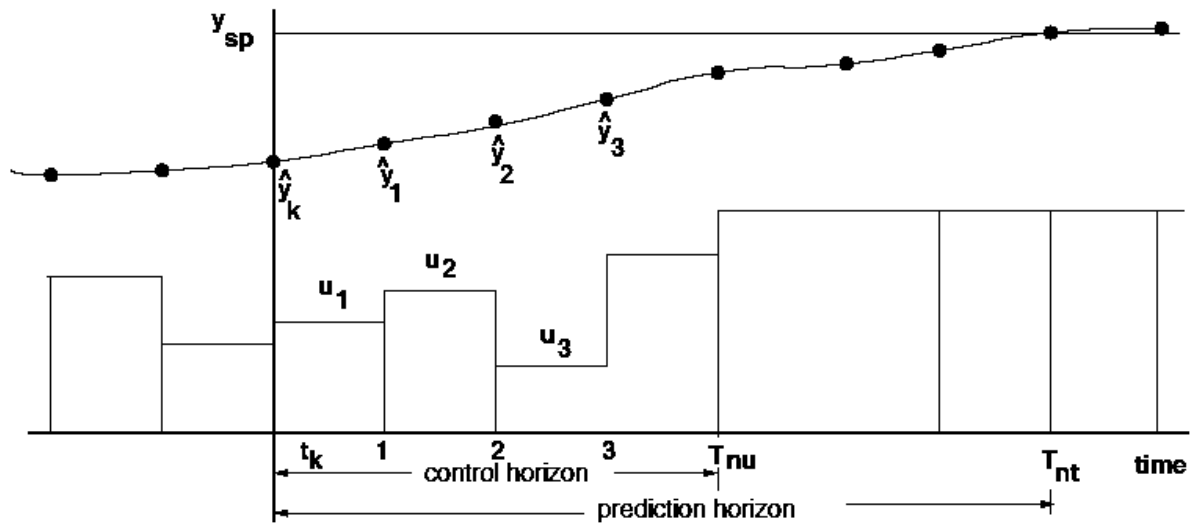


Figura 3.3 Metodología para un modelo de control predictivo (Gutiérrez-Limón y col.,(2014))

3.2 Planificación bajo incertidumbre de sistemas de biorefinerías considerando aspectos económicos y ambientales

En esta sección se presenta una metodología para la planificación bajo incertidumbre de una cadena de suministro de biorefinerías considerando aspectos económicos y ambientales. Donde, la metodología considera la determinación de un conjunto de materias primas, productos, plantas y tecnologías de procesamiento con el objetivo de obtener los mejores beneficios económicos y ambientales. En este sentido, los principales aspectos considerados son:

- Tres conjuntos de instalaciones potenciales: centros de abastecimiento, plantas de procesamiento y centros de consumo.
- Tres tipos de materiales: Materias primas, productos y subproductos.
- Dos tipos de etapas de procesamiento: El procesamiento directo de la materia prima para obtener productos y subproductos, y el procesamiento de los subproductos para obtener una mayor cantidad de productos principales.
- Varios escenarios para el precio de materia prima con el fin de contemplar la incertidumbre asociada a los biorecursos.

Además, la metodología considera una estrategia para seleccionar la topología óptima desde los puntos de vista económico y ambiental simultáneamente con el uso de herramientas apropiadas para la obtención de soluciones determinísticas basadas en análisis estadístico.

Para explicar el modelo matemático propuesto, es necesario definir los índices usados en la formulación. En este contexto, el índice h es usado para los centros de abastecimiento, el índice ph representa las plantas secundarias de procesamiento y el índice mk denota a los centros de consumo. Por otro lado, los índices m y k ilustran las materias primas y los productos. Las rutas de procesamiento son representadas por el índice r para la primera etapa de procesamiento y el índice sr para la segunda etapa de procesamiento. También, se contempla un índice t para el tiempo ya que se propone un modelo matemático muti-periodo. Finalmente, el índice q es usado para las economías de escala y los escenarios para la parte estocástica con representados por el índice s .

3.2.1 Disponibilidad de materia prima

La materia prima se produce en los centros de abastecimiento y es limitada dada que la producción depende de la estación del año. En este contexto, la cantidad de biomasa producida en los centros de abastecimiento h ($M_{m,h,t}^{prod}$) debe ser menor que la máxima cantidad de biomasa que puede ser producida para cada uno de los periodos del tiempo ($^{UPP}M_{m,h,t}^{available}$).

$$^{UPP}M_{m,h,t}^{available} \geq M_{m,h,t}^{prod}, \quad \forall m \in BIOMASS, h \in HARVSITES, t \in PERIODS \quad (3.2.1)$$

3.2.2 Balances de masa en los centros de abastecimiento

Dentro de los centros de abastecimiento son desarrolladas varias actividades; algunas de ellas son la distribución de la materia prima a las plantas de procesamiento, la producción de biomasa y el almacenamiento de la misma. Por lo tanto, la biomasa almacenada en los sitios de abastecimiento h para el periodo de tiempo t ($M_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}$) es igual a la biomasa producida ($M_{m,h,t}^{prod}$)

menos la biomasa distribuida a las plantas de procesamiento ($M_{m,h,ph,t}^{distributed\ hs-facilities}$ y $M_{m,h,t}^{distributed\ hs-main}$), más el nivel de almacenamiento en el periodo de tiempo previo ($M_{m,h,t-1}^{storage\ harv-sites}$).

$$M_{m,h,t}^{storage\ harv-sites} = M_{m,h,t}^{prod} - \sum_{ph} M_{m,h,ph,t}^{distributed\ hs-facilities} - M_{m,h,t}^{distributed\ hs-main} + M_{m,h,t-1}^{storage\ harv-sites}, \quad \begin{array}{l} m \in BIOMASS, \\ \forall h \in HARVSITES, \\ t \in PERIODS \end{array} \quad (3.2.2)$$

3.2.3 Balances de masa en las plantas de procesamiento

El modelo matemático propuesto toma en consideración dos tipos de plantas de procesamiento (planta principal y plantas secundarias) así como dos tipos de materiales (biorecursos y productos). Por lo tanto, el primer tipo de balance de masa corresponde a los balances de materia prima en las plantas de procesamiento, donde la cantidad de biomasa almacenada en las plantas de procesamiento ($M_{m,ph,t}^{storage\ facilities}$, $M_{m,t}^{storage\ main}$) es igual al flujo de biomasa obtenida de los centros de abastecimiento ($Me_{m,h,ph,t}^{distributed\ hs-facilities}$, $Me_{m,h,t}^{distributed\ hs-main}$), menos el flujo de biomasa enviada a la primera etapa de procesamiento ($M_{m,k,r,ph,t}^{processed\ facilities}$, $M_{m,k,r,t}^{processed\ main}$), más la cantidad de biomasa almacenada en un periodo de tiempo previo ($M_{m,ph,t-1}^{storage\ facilities}$, $M_{m,t-1}^{storage\ main}$).

$$M_{m,ph,t}^{storage\ facilities} = \sum_h Me_{m,h,ph,t}^{distributed\ hs-facilities} - \sum_k \sum_r M_{m,k,r,ph,t}^{processed\ facilities} + M_{m,ph,t-1}^{storage\ facilities}, \quad \begin{array}{l} m \in BIOMASS, \\ \forall ph \in FACILITIES, \\ t \in PERIODS \end{array} \quad (3.2.3)$$

$$M_{m,t}^{storage\ main} = \sum_h Me_{m,h,t}^{distributed\ hs-main} - \sum_k \sum_r M_{m,k,r,t}^{processed\ main} + M_{m,t-1}^{storage\ main}, \quad \begin{array}{l} m \in BIOMASS, \\ t \in PERIODS \end{array} \quad (3.2.4)$$

Por otra parte, los balances de producto en las plantas de procesamiento establecen que el nivel de inventario de producto en un tiempo dado ($P_{k,ph,t}^{storage\ facilities}$, $P_{k,t}^{storage\ main}$) es igual al producto producido en las plantas de procesamiento ($P_{k,ph,t}^{yield\ facilities}$, $P_{k,t}^{yield\ main}$), menos el producto distribuido a los

centros de consumo ($P_{k,ph,mk,t}^{distributed}$, $P_{k,mk,t}^{distributed}$), más la cantidad de producto almacenado en el periodo de tiempo anterior ($P_{k,ph,t-1}^{storage}$, $P_{k,t-1}^{storage}$).

$$P_{k,ph,t}^{storage} = P_{k,ph,t}^{yield} - \sum_{mk} P_{k,ph,mk,t}^{distributed} + P_{k,ph,t-1}^{storage}, \quad \forall ph \in FACILITIES, \quad k \in PRODUCTS, \quad t \in PERIODS \quad (3.2.5)$$

$$P_{k,t}^{storage} = P_{k,t}^{yield} - \sum_{mk} P_{k,mk,t}^{distributed} + P_{k,t-1}^{storage}, \quad \forall k \in PRODUCTS, \quad t \in PERIODS \quad (3.2.6)$$

3.2.4 Balances de materia en los centros de consumo

Adicionalmente, es necesario considerar una ecuación para el balance de masa en los centros de consumo. El producto almacenado en los mercados en el periodo de tiempo t ($P_{k,mk,t}^{storage}$) es igual al producto recibido desde las plantas de procesamiento ($Pe_{k,ph,mk,t}^{distributed}$, $Pe_{k,mk,t}^{distributed}$), menos el producto consumido ($P_{k,mk,t}^{sold}$), más el producto almacenado en el intervalo de tiempo previo ($P_{k,mk,t-1}^{storage}$).

$$P_{k,mk,t}^{storage} = \sum_{ph} Pe_{k,ph,mk,t}^{distributed} + Pe_{k,mk,t}^{distributed} - P_{k,mk,t}^{sold} + P_{k,mk,t-1}^{storage}, \quad \forall mk \in MARKETS, \quad k \in PRODUCTS, \quad t \in PERIODS \quad (3.2.7)$$

3.2.5 Restricción para la demanda

La restricción de la demanda es una importante restricción usada para ahorrar recursos y limitar la producción. En este sentido, el producto vendido ($P_{k,mk,t}^{sold}$) debe ser menor que la máxima demanda en cada uno de las regiones de consumo ($P_{k,mk,t}^{sold}$).

$$P_{k,mk,t}^{sold} \leq P_{k,mk,t}^{demand}, \quad \forall k \in PRODUCTS, mk \in MARKETS, t \in PERIODS \quad (3.2.8)$$

3.2.6 Relaciones de entrada-salida del material distribuido

Algunas restricciones son necesarias para considerar las relaciones entre los flujos de entrada y salida en los diversos nodos de la cadena de suministro. Estas restricciones son dadas para el transporte entre los centros de suministro y las plantas de procesamiento así como desde las plantas de procesamiento a las regiones de consumo. Además, permiten contemplar el tiempo de transporte debido a que cualquier material puede salir de un nodo origen en el periodo de

tiempo $t-1$ ($M_{m,h,ph,t-1}^{hs-facilities}$, $M_{m,h,t-1}^{hs-main}$, $P_{k,ph,mk,t-1}^{facilities-mk}$, $P_{k,mk,t-1}^{main-mk}$) y llegar al nodo destino en el periodo de tiempo t ($Me_{m,h,ph,t}^{hs-facilities}$, $Me_{m,h,t}^{hs-main}$, $Pe_{k,ph,mk,t}^{facilities-mk}$, $Pe_{k,mk,t}^{main-mk}$). Cabe mencionar que se toma en cuenta que el último periodo de tiempo es el periodo previo al primer periodo del horizonte de tiempo.

$$M_{m,h,ph,t-1}^{hs-facilities} = Me_{m,h,ph,t}^{hs-facilities}, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, h \in HARVSITES, \\ ph \in FACILITIES, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.9)$$

$$M_{m,h,t-1}^{hs-main} = Me_{m,h,t}^{hs-main}, \quad \forall m \in BIOMASS, h \in HARVSITES, t \in PERIODS \quad (3.2.10)$$

$$P_{k,ph,mk,t-1}^{facilities-mk} = Pe_{k,ph,mk,t}^{facilities-mk}, \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, ph \in FACILITIES, \\ mk \in MARKETS, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.11)$$

$$P_{k,mk,t-1}^{main-mk} = Pe_{k,mk,t}^{main-mk}, \quad \forall k \in PRODUCTS, mk \in MARKETS, t \in PERIODS \quad (3.2.12)$$

3.2.7 Límites y costos de transporte

La formulación matemática considera variables binarias para el transporte de materiales para decidir donde y cuando los materiales son distribuidos. Consecuentemente, la cantidad

transportada de algún material ($M_{m,h,ph,t}^{hs-facilities}$, $M_{m,h,t}^{hs-main}$, $P_{k,ph,mk,t}^{facilities-mk}$, $P_{k,mk,t}^{main-mk}$) es mayor que un

límite inferior ($\text{LOWER } M_{m,h,ph}^{\text{distributed hs-facilities}}$, $\text{LOWER } M_{m,h}^{\text{distributed hs-main}}$, $\text{LOWER } P_{k,ph,mk}^{\text{distributed facilities-mk}}$, $\text{LOWER } P_{k,mk}^{\text{distributed main-mk}}$) multiplicado por una variable binaria para definir la existencia de transporte ($y_{m,h,ph,t}^{\text{distributed hs-facilities}}$, $y_{m,h,t}^{\text{distributed hs-main}}$, $y_{k,ph,mk,t}^{\text{distributed facilities-mk}}$, $y_{k,mk,t}^{\text{distributed main-mk}}$). Así mismo, la cantidad de material transportada es menor a un límite máximo ($\text{UPPER } M_{m,h,ph}^{\text{distributed hs-facilities}}$, $\text{UPPER } M_{m,h}^{\text{distributed hs-main}}$, $\text{UPPER } P_{k,ph,mk}^{\text{distributed facilities-mk}}$, $\text{UPPER } P_{k,mk}^{\text{distributed main-mk}}$) multiplicado por la misma variable binaria. Los tipos de transporte son los asociados al transporte de materia prima desde los centros de producción hasta las plantas de procesamiento y el transporte de producto desde las plantas de procesamiento a las zonas de consumo. Es importante notar que el efecto de la densidad de la materia prima es considerado en el presente trabajo, ya que los límites de transporte son basados en la masa y el volumen dependiendo de las normas establecidas para el transporte; en las cuales la máxima cantidad a ser transportada en tráiler es alrededor de 20-40 toneladas por cada remolque. Por otro lado, el límite de volumen por cada remolque es hasta 96 m³. En este sentido, el número de carros de transporte a ser utilizados es definido por el límite de volumen y de masa, el cual afecta directamente el costo unitario de transporte para cada tipo de materia prima.

$$\text{LOWER } M_{m,h,ph}^{\text{distributed hs-facilities}} \cdot y_{m,h,ph,t}^{\text{distributed hs-facilities}} \leq M_{m,h,ph,t}^{\text{distributed hs-facilities}}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES}, ph \in \text{FACILITIES}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.13)$$

$$\text{LOWER } M_{m,h}^{\text{distributed hs-main}} \cdot y_{m,h,t}^{\text{distributed hs-main}} \leq M_{m,h,t}^{\text{distributed hs-main}}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.14)$$

$$\text{LOWER } P_{k,ph,mk}^{\text{distributed facilities-mk}} \cdot y_{k,ph,mk,t}^{\text{distributed facilities-mk}} \leq P_{k,ph,mk,t}^{\text{distributed facilities-mk}}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, ph \in \text{FACILITIES}, mk \in \text{MARKETS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.15)$$

$$\text{LOWER } P_{k,mk}^{\text{distributed main-mk}} \cdot y_{k,mk,t}^{\text{distributed main-mk}} \leq P_{k,mk,t}^{\text{distributed main-mk}}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, mk \in \text{MARKETS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.16)$$

$$M_{m,h,ph,t}^{\text{distributed hs-facilities}} \leq \text{UPPER } M_{m,h,ph}^{\text{distributed hs-facilities}} \cdot y_{m,h,ph,t}^{\text{distributed hs-facilities}}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES}, ph \in \text{FACILITIES}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.17)$$

$$M_{m,h,t}^{\text{distributed hs-main}} \leq \text{UPPER } M_{m,h}^{\text{distributed hs-main}} \cdot y_{m,h,t}^{\text{distributed hs-main}}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.18)$$

$$P_{k,ph,mk,t}^{\text{distributed facilities-mk}} \leq \text{UPPER } P_{k,ph,mk}^{\text{distributed facilities-mk}} \cdot y_{k,ph,mk,t}^{\text{distributed facilities-mk}}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, ph \in \text{FACILITIES}, mk \in \text{MARKETS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.19)$$

$$P_{k,mk,t}^{\text{distributed main-mk}} \leq \text{UPPER } P_{k,mk}^{\text{distributed main-mk}} \cdot y_{k,mk,t}^{\text{distributed main-mk}}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, mk \in \text{MARKETS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.20)$$

También, se incluye el costo de transporte debido a que este costo puede definir la configuración de la cadena de suministro. En este caso, el costo de transporte ($C_{transp}^{distributed\ hs-facilities}$, $C_{transp}^{distributed\ hs-main}$, $C_{transp}^{distributed\ facilities-mk}$, $C_{transp}^{distributed\ main-mk}$) es igual a un costo de transporte unitario ($UC_{transp}^{distributed\ hs-facilities\ m,h,ph}$, $UC_{transp}^{distributed\ hs-main\ m,h}$, $UC_{transp}^{distributed\ facilities-mk\ k,ph,mk}$, $UC_{transp}^{distributed\ main-mk\ k,mk}$) multiplicado por la cantidad de materia transportado ($M_{m,h,ph,t}^{distributed\ hs-facilities}$, $M_{m,h,t}^{distributed\ hs-main}$, $P_{k,ph,mk,t}^{distributed\ facilities-mk}$, $P_{k,mk,t}^{distributed\ main-mk}$). El costo de transporte unitario depende de la distancia entre los entes de la cadena de suministro así como el tipo de material (materia prima o producto).

$$C_{transp}^{distributed\ hs-facilities} = \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t UC_{transp}^{distributed\ hs-facilities\ m,h,ph} \cdot M_{m,h,ph,t}^{distributed\ hs-facilities} \quad (3.2.21)$$

$$C_{transp}^{distributed\ hs-main} = \sum_m \sum_h \sum_t UC_{transp}^{distributed\ hs-main\ m,h} \cdot M_{m,h,t}^{distributed\ hs-main} \quad (3.2.22)$$

$$C_{transp}^{distributed\ facilities-mk} = \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t UC_{transp}^{distributed\ facilities-mk\ k,ph,mk} \cdot P_{k,ph,mk,t}^{distributed\ facilities-mk} \quad (3.2.23)$$

$$C_{transp}^{distributed\ main-mk} \leq \sum_k \sum_{mk} \sum_t UC_{transp}^{distributed\ main-mk\ k,mk} \cdot P_{k,mk,t}^{distributed\ main-mk} \quad (3.2.24)$$

3.2.8 Etapas de procesamiento en las plantas de procesamiento

Todas las plantas de procesamiento contemplan dos etapas de procesamiento y ambas están interrelacionadas. Entonces, la primera etapa de procesamiento establece que el producto obtenido durante el periodo de tiempo t ($P_{m,k,r,ph,t}^{stage1\ facilities}$, $P_{m,k,r,t}^{stage1\ main}$) es igual a la materia prima distribuida a diversas rutas de procesamiento durante el periodo de tiempo $t-1$ ($M_{m,k,r,ph,t-1}^{processed\ facilities}$, $M_{m,k,r,t-1}^{processed\ main}$) multiplicado por un factor de conversión para las tecnologías de procesamiento ($\alpha_{m,k,r}^{conversion\ factor\ stage\ 1}$).

$$P_{m,k,r,ph,t}^{stage1\ facilities} = \alpha_{m,k,r}^{conversion\ factor\ stage\ 1} \cdot M_{m,k,r,ph,t-1}^{processed\ facilities}, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, r \in TECH1 \\ ph \in FACILITIES, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.25)$$

$$P_{m,k,r,t}^{stage1\ main} = \alpha_{m,k,r}^{conversion\ factor\ stage\ 1} \cdot M_{m,k,r,t-1}^{processed\ main}, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, r \in TECH1 \\ t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.26)$$

El producto producido en la primera etapa de procesamiento es mezclado para obtener la cantidad total de producto de la primera etapa de procesamiento. Entonces, la cantidad total de producto k en la primera etapa de procesamiento ($Ptotal_{k,r,ph,t}^{stage1\ facilities}$, $Ptotal_{k,r,t}^{stage1\ main}$) es igual a la suma del producto obtenido a partir de todas las materias primas m ($P_{m,k,r,ph,t}^{stage1\ facilities}$, $P_{m,k,r,t}^{stage1\ main}$).

$$Ptotal_{k,r,ph,t}^{stage1\ facilities} = \sum_m P_{m,k,r,ph,t}^{stage1\ facilities}, \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, r \in TECH1 \\ ph \in FACILITIES, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.27)$$

$$Ptotal_{k,r,t}^{stage1\ main} = \sum_m P_{m,k,r,t}^{stage1\ main}, \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, r \in TECH1 \\ t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.28)$$

Existe la posibilidad de enviar una parte del flujo de material proveniente de la primera etapa de procesamiento y distribuirlo a diferentes tecnologías de procesamiento para la segunda etapa de procesamiento. En este contexto, la cantidad de producto producido a partir de la primera etapa es relacionada al flujo de subproducto que es enviado a la segunda etapa de procesamiento. La siguiente restricción establece que el flujo de producto desde la primera etapa ($Ptotal_{k,r,ph,t}^{stage1\ facilities}$ and $Ptotal_{k,r,t}^{stage1\ main}$) es igual a la suma de las alimentaciones para la segunda etapa ($Pfeed_{k,sr,ph,t}^{stage2\ facilities}$ and $Pfeed_{k,sr,t}^{stage2\ main}$).

$$Ptotal_{k,r,ph,t}^{stage1\ facilities} = \sum_m Pfeed_{k,r,sr,ph,t}^{stage2\ facilities}, \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, sr \in TECH2 \\ ph \in FACILITIES, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.29)$$

$$Ptotal_{k,r,t}^{stage1\ main} = \sum_m Pfeed_{k,r,sr,t}^{stage2\ main}, \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, r \in TECH1 \\ sr \in TECH2, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.30)$$

Una vez que se obtiene la cantidad de producto distribuido a las distintas tecnologías de procesamiento de la segunda etapa ($Pfeed_{k,r,sr,ph,t}^{stage2\ facilities}$ and $Pfeed_{k,r,sr,t}^{stage2\ main}$), es posible calcular el producto

producido durante la segunda etapa ($P_{k,r,sr,k',ph,t}^{stage2}$ and $P_{k,r,sr,k',t}^{stage2}$). Esto es hecho a través de un factor ($\alpha_{k,r,sr,k'}^{conversion}$ factor stage 2) para obtener el producto proveniente de la segunda etapa.

$$P_{k,r,sr,k',ph,t}^{stage2} = \alpha_{k,r,sr,k'}^{conversion} \cdot P_{k,r,sr,ph,t}^{stage2} \quad \forall \quad \begin{matrix} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, sr \in TECH2 \\ k' \in PRODUCTS, ph \in FACILITIES, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.31)$$

$$P_{k,r,sr,k',t}^{stage2} = \alpha_{k,r,sr,k'}^{conversion} \cdot P_{k,r,sr,t}^{stage2} \quad \forall \quad \begin{matrix} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, sr \in TECH2 \\ k' \in PRODUCTS, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.32)$$

Finalmente, con la cantidad de producto originaria de la primera y la segunda etapa, es posible calcular la cantidad total de producto producido en las plantas de procesamiento. Por lo tanto, la cantidad total de producto obtenido en las plantas de procesamiento ($P_{k,ph,t}^{yield}$, $P_{k,t}^{yield}$) es igual a la suma del producto de la primera etapa ($P_{k,r,ph,t}^{stage1}$, $P_{k,r,t}^{stage1}$) y la segunda etapa de procesamiento ($P_{k',r,sr,k,ph,t}^{stage2}$, $P_{k',r,sr,k,t}^{stage2}$).

$$P_{k,ph,t}^{yield} = \sum_r P_{k,r,ph,t}^{stage1} + \sum_r \sum_{sr} \sum_{k'} P_{k',r,sr,k,ph,t}^{stage2} \quad \forall \quad \begin{matrix} k \in PRODUCTS, \\ ph \in FACILITIES, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.33)$$

$$P_{k,t}^{yield} = \sum_r P_{k,r,t}^{stage1} + \sum_r \sum_{sr} \sum_{k'} P_{k',r,sr,k,t}^{stage2} \quad \forall k \in PRODUCTS, t \in PERIODS \quad (3.2.34)$$

3.2.9 Restricciones para la primera etapa de procesamiento

Para considerar las economías de escala, es necesario discretizar la materia prima procesada durante la primera y segunda etapa de procesamiento en varios intervalos para transformar la función de costo de capital en una serie de segmentos lineales con la finalidad de evitar problemas numéricos. Por esta razón, la materia prima para cada planta de procesamiento ($M_{m,k,r,ph,t}^{processed}$, $M_{m,k,r,t}^{processed}$) es igual a la suma del flujo de materia prima discretizada para cada una de

las economías de escala ($M_{m,k,r,ph,t,q}^{processed}$, $M_{m,k,r,t,q}^{processed}$).

$$M_{m,k,r,ph,t}^{\text{processed facilities}} = \sum_q Mdis_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{processed facilities}}, \quad \forall \begin{array}{l} m \in \text{BIOMASS}, k \in \text{PRODUCTS}, \\ r \in \text{TECH1}, ph \in \text{FACILITIES}, \\ t \in \text{PERIODS} \end{array} \quad (3.2.35)$$

$$M_{m,k,r,t}^{\text{processed main}} = \sum_q Mdis_{m,k,r,t,q}^{\text{processed main}}, \quad \forall \begin{array}{l} m \in \text{BIOMASS}, k \in \text{PRODUCTS}, \\ r \in \text{TECH1}, t \in \text{PERIODS} \end{array} \quad (3.2.36)$$

Otras restricciones son incluidas para las tecnologías de procesamiento ya que estas tecnologías son limitadas por las economías de escala. En este contexto, existen varios intervalos para las tecnologías de procesamiento asociadas a variables binarias. Cada una de estas variables binarias es activada cuando la cantidad procesada está dada entre límites máximos y mínimos. Por lo tanto, la cantidad de materia prima utilizada en cada ruta de procesamiento en la primera

etapa ($Mdis_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{processed facilities}}$, $Mdis_{m,k,r,t,q}^{\text{processed main}}$) es mayor que el límite inferior ($LOWER M_{m,k,r,ph,q}^{\text{processed facilities}}$, $LOWER M_{m,k,r,q}^{\text{processed main}}$)

multiplicado por una variable binaria para el procesamiento en la primera etapa ($y_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{capital facilities}}$,

$y_{m,k,r,t,q}^{\text{capital main}}$). También, la cantidad de materia prima usada ($Mdis_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{processed facilities}}$, $Mdis_{m,k,r,t,q}^{\text{processed main}}$) es menor que

un límite superior ($UPPER M_{m,k,r,ph,q}^{\text{processed facilities}}$, $UPPER M_{m,k,r,q}^{\text{processed main}}$) multiplicado por la misma variable binaria

$$LOWER M_{m,k,r,ph,q}^{\text{processed facilities}} \cdot y_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{capital facilities}} \leq Mdis_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{processed facilities}}, \quad \forall \begin{array}{l} m \in \text{BIOMASS}, k \in \text{PRODUCTS}, \\ r \in \text{TECH1}, ph \in \text{FACILITIES}, \\ t \in \text{PERIODS}, q \in \text{ECON} \end{array} \quad (3.2.37)$$

$$Mdis_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{processed facilities}} \leq UPPER M_{m,k,r,ph,q}^{\text{processed facilities}} \cdot y_{m,k,r,ph,t,q}^{\text{capital facilities}}, \quad \forall \begin{array}{l} m \in \text{BIOMASS}, k \in \text{PRODUCTS}, \\ r \in \text{TECH1}, ph \in \text{FACILITIES}, \\ t \in \text{PERIODS}, q \in \text{ECON} \end{array} \quad (3.2.38)$$

$$LOWER M_{m,k,r,q}^{\text{processed main}} \cdot y_{m,k,r,t,q}^{\text{capital main}} \leq Mdis_{m,k,r,t,q}^{\text{processed main}}, \quad \forall \begin{array}{l} m \in \text{BIOMASS}, k \in \text{PRODUCTS}, \\ r \in \text{TECH1}, t \in \text{PERIODS}, q \in \text{ECON} \end{array} \quad (3.2.39)$$

$$Mdis_{m,k,r,t,q}^{\text{processed main}} \leq UPPER M_{m,k,r,q}^{\text{processed main}} \cdot y_{m,k,r,t,q}^{\text{capital main}}, \quad \forall \begin{array}{l} m \in \text{BIOMASS}, k \in \text{PRODUCTS}, \\ r \in \text{TECH1}, t \in \text{PERIODS}, q \in \text{ECON} \end{array} \quad (3.2.40)$$

Es importante mencionar que la suma de estas variables binarias ($y_{m,k,r,ph,t,q}^{capital\ facilities}$, $y_{m,k,r,t,q}^{capital\ main}$) con respecto al intervalo q es igual a 1, porque solo una variable binaria para el intervalo q puede ser activada.

$$\sum_q y_{m,k,r,ph,t,q}^{capital\ facilities} = 1, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, ph \in FACILITIES, \\ t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.41)$$

$$\sum_q y_{m,k,r,t,q}^{capital\ main} = 1, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, t \in PERIODS \end{matrix} \quad (3.2.42)$$

Adicionalmente, el modelo propuesto considera otras restricciones y variables binarias sin dependencia de tiempo; las cuales son activadas si una de las variables binarias con dependencia del tiempo es uno. Por esta razón, las siguientes restricciones son propuestas para asegurar que la variable binaria para la primera etapa de procesamiento ($y_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities}$, $y_{m,k,r,q}^{capital\ main}$) es activada cuando cualquiera de variables binarias toman el valor de 1 ($y_{m,k,r,ph,t,q}^{capital\ facilities}$, $y_{m,k,r,t,q}^{capital\ main}$). Estas restricciones dependen del máximo número de periodos (H_{max}).

$$y_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities} \leq \sum_t y_{m,k,r,ph,t,q}^{capital\ facilities}, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, ph \in FACILITIES, \\ q \in ECON \end{matrix} \quad (3.2.43)$$

$$y_{m,k,r,q}^{capital\ main} \leq \sum_t y_{m,k,r,t,q}^{capital\ main}, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, q \in ECON \end{matrix} \quad (3.2.44)$$

$$H_{max} \cdot y_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities} \geq \sum_t y_{m,k,r,ph,t,q}^{capital\ facilities}, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, ph \in FACILITIES, \\ q \in ECON \end{matrix} \quad (3.2.45)$$

$$H_{max} \cdot y_{m,k,r,q}^{capital\ main} \geq \sum_t y_{m,k,r,t,q}^{capital\ main}, \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, q \in ECON \end{matrix} \quad (3.2.46)$$

Además, el costo de capital es tomado en cuenta para ambas etapas de procesamiento. El costo de capital para la primera etapa de procesamiento ($C_{m,k,r,ph}^{capital\ facilities}$, $C_{m,k,r}^{capital\ main}$) es igual a un costo fijo de capital ($A_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities}$, $A_{m,k,r,q}^{capital\ main}$) multiplicado por la variable binaria para la primera etapa sin dependencia del tiempo ($y_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities}$, $y_{m,k,r,q}^{capital\ main}$), más un costo unitario ($B_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities}$, $B_{m,k,r,q}^{capital\ main}$) multiplicado por un límite superior para el procesamiento ($UPPER\ M_{m,k,r,ph,q}^{processed\ facilities}$, $UPPER\ M_{m,k,r,q}^{processed\ main}$) con el fin de considerar la capacidad de procesamiento en el intervalo q multiplicado por la variable binaria para el procesamiento ($y_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities}$, $y_{m,k,r,q}^{capital\ main}$).

$$C_{m,k,r,ph}^{capital\ facilities} = K_F \cdot \left(\sum_q A_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities} \cdot y_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities} + \sum_q UPPER\ M_{m,k,r,ph,q}^{processed\ facilities} \cdot B_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities} \cdot y_{m,k,r,ph,q}^{capital\ facilities} \right), \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, \\ k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, \\ ph \in FACILITIES \end{matrix} \quad (3.2.47)$$

$$C_{m,k,r}^{capital\ main} = K_F \cdot \left(\sum_q A_{m,k,r,q}^{capital\ main} \cdot y_{m,k,r,q}^{capital\ main} + \sum_q UPPER\ M_{m,k,r,q}^{processed\ main} \cdot B_{m,k,r,q}^{capital\ main} \cdot y_{m,k,r,q}^{capital\ main} \right), \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, \\ k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1 \end{matrix} \quad (3.2.48)$$

También es considerado el costo de operación ($C_{m,k,r,ph,t}^{operating\ facilities}$, $C_{m,k,r,t}^{operating\ main}$), el cual es igual al costo unitario de procesamiento ($UC_{m,k,r,ph,t}^{operating\ facilities}$, $UC_{m,k,r,t}^{operating\ main}$) multiplicado por la cantidad de materia prima que es procesada en la primera etapa de procesamiento ($M_{m,k,r,ph,t}^{processed\ facilities}$, $M_{m,k,r,t}^{processed\ main}$).

$$C_{m,k,r,ph,t}^{operating\ facilities} = \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t UC_{m,k,r,ph,t}^{operating\ facilities} \cdot M_{m,k,r,ph,t}^{processed\ facilities} \quad (3.2.49)$$

$$C_{m,k,r,t}^{operating\ main} = \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t UC_{m,k,r,t}^{operating\ main} \cdot M_{m,k,r,t}^{processed\ main} \quad (3.2.50)$$

3.2.10 Restricciones para la segunda etapa de procesamiento

La segunda etapa de procesamiento es modelada de manera similar que la primera etapa. Entones, el material procesado en la segunda etapa es igual a la suma de diversos valores para el flujo de material procesado acorde a los intervalos para la capacidad de la plantas de procesamiento ($Pdfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}$, $Pdfeed_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main}$).

$$Pfeed_{k,r,sr,ph,t}^{stage2\ facilities} = \sum_q Pdfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}, \quad \forall \begin{array}{l} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, sr \in TECH2 \\ ph \in FACILITIES, t \in PERIODS \end{array} \quad (3.2.51)$$

$$Pfeed_{k,r,sr,t}^{stage2\ main} = \sum_q Pdfeed_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main}, \quad \forall \begin{array}{l} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, sr \in TECH2 \\ t \in PERIODS \end{array} \quad (3.2.52)$$

También, se aplican límites para el procesamiento. Por lo tanto, estas restricciones consideran variables binarias para la activación de la segunda etapa de procesamiento ($yfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}$, $yfeed_{k,r,sr,t}^{stage2\ main}$) así como límites máximos ($uppPfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}$, $uppPfeed_{k,r,sr,t}^{stage2\ main}$) y mínimos para el procesamiento ($lowPfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}$, $lowPfeed_{k,r,sr,t}^{stage2\ main}$).

$$Pdfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities} \geq lowPfeed_{k,r,sr,ph,q}^{stage2\ facilities} \cdot yfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}, \quad \forall \begin{array}{l} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \\ sr \in TECH2, ph \in FACILITIES, \\ t \in PERIODS, q \in ECON \end{array} \quad (3.2.53)$$

$$Pdfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities} \leq uppPfeed_{k,r,sr,ph,q}^{stage2\ facilities} \cdot yfeed_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}, \quad \forall \begin{array}{l} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \\ sr \in TECH2, ph \in FACILITIES, \\ t \in PERIODS, q \in ECON \end{array} \quad (3.2.54)$$

$$Pdfeed_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main} \geq lowPfeed_{k,r,sr,q}^{stage2\ main} \cdot yfeed_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main}, \quad \forall \begin{array}{l} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \\ sr \in TECH2, \\ t \in PERIODS, q \in ECON \end{array} \quad (3.2.55)$$

$$Pdfeed_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main} \leq uppPfeed_{k,r,sr,q}^{stage2\ main} \cdot yfeed_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main}, \quad \forall \begin{array}{l} k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \\ sr \in TECH2, \\ t \in PERIODS, q \in ECON \end{array} \quad (3.2.56)$$

Con el fin de seleccionar solo uno de los intervalos para la capacidad, la suma de las variables binarias para el segundo paso de procesamiento con respecto al intervalo q es igual a 1.

$$\sum_q y_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities} = 1, \quad \forall sr \in TECH2, ph \in FACILITIES, \quad k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \quad t \in PERIODS \quad (3.2.57)$$

$$\sum_q y_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main} = 1, \quad \forall k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \quad sr \in TECH2, t \in PERIODS \quad (3.2.58)$$

Al igual que en la primera etapa de procesamiento, la tecnología de procesamiento para la segunda etapa se considera si al menos es necesaria en un periodo de tiempo. Las restricciones que aseguran esta condición son las siguientes:

$$y_{k,r,sr,ph,q}^{stage2\ facilities} \leq \sum_t y_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}, \quad \forall sr \in TECH2, ph \in FACILITIES, \quad k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \quad q \in ECON \quad (3.2.59)$$

$$y_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main} \leq \sum_t y_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main}, \quad \forall k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \quad sr \in TECH2, q \in ECON \quad (3.2.60)$$

$$H_{max} \cdot y_{k,r,sr,ph,q}^{stage2\ facilities} \geq \sum_t y_{k,r,sr,ph,t,q}^{stage2\ facilities}, \quad \forall sr \in TECH2, ph \in FACILITIES, \quad k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \quad q \in ECON \quad (3.2.61)$$

$$H_{max} \cdot y_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main} \geq \sum_t y_{k,r,sr,t,q}^{stage2\ main}, \quad \forall k \in PRODUCTS, r \in TECH1, \quad sr \in TECH2, q \in ECON \quad (3.2.62)$$

Así mismo, el costo de capital es definido para la segunda etapa de procesamiento en función de un término fijo y otro variable.

$$C_{k,r,sr,ph}^{capital\ facilities} = K_F \cdot \left(\sum_q A_{k,r,sr,ph,q}^{capital\ facilities} \cdot y_{k,r,sr,ph,q}^{stage2\ facilities} + \sum_q uppP_{k,r,sr,ph,q}^{stage2\ facilities} \cdot B_{k,r,sr,ph,q}^{capital\ facilities} \cdot y_{k,r,sr,ph,q}^{stage2\ facilities} \right), \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, \\ r \in TECH1, \\ sr \in TECH2, \\ ph \in FACILITIES \end{matrix} \quad (3.2.63)$$

$$C2_{k,r,sr}^{capital\ main} = K_F \cdot \left(\sum_q A2_{k,r,sr}^{capital\ main} \cdot y2_{feed_{k,r,sr,q}^{stage2\ main}} + \sum_q uppP_{feed_{k,r,sr,q}^{stage2\ main}} \cdot B2_{k,r,sr}^{capital\ main} \cdot y2_{feed_{k,r,sr,q}^{stage2\ main}} \right) \quad \begin{array}{l} k \in PRODUCTS, \\ , \forall \quad r \in TECH1, \\ sr \in TECH2, \end{array} \quad (3.2.64)$$

Finalmente, el costo de operación es definido por un costo unitario para cada una de las tecnologías en la segunda etapa de procesamiento multiplicado por la cantidad de material procesado.

$$C2_{facilities}^{operating} = \sum_k \sum_r \sum_{sr} \sum_{ph} \sum_t UC2_{k,r,sr,ph,t}^{operating\ facilities} \cdot P_{feed_{k,r,sr,ph,t}^{stage2\ facilities}} \quad (3.2.65)$$

$$C2_{main}^{operating} = \sum_k \sum_r \sum_{sr} \sum_t UC2_{k,r,sr,t}^{operating\ main} \cdot P_{feed_{k,r,sr,t}^{stage2\ main}} \quad (3.2.66)$$

3.2.11 Modelo para el almacenamiento

Primeramente, es necesario establecer los distintos tipos de almacenamiento ya que el costo de almacenamiento puede llegar a ser un costo significativo en el costo total de la cadena de suministro. En este sentido, existe almacenamiento de materia prima en lugar de abastecimiento, materia prima en planta de procesamiento, producto en planta de procesamiento y producto en los centros de consumo.

En este caso, el modelo matemático involucra restricciones para los límites de almacenamiento en cada uno de los nodos de la cadena de suministro. Para determinar si existe material almacenado en alguna instalación es necesario incluir variables binarias; las cuales son activadas cuando el nivel de inventario se encuentra delimitado en intervalos específicos. En este

sentido, la cantidad de material almacenado ($M_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}$, $M_{m,ph,t}^{storage\ facilities}$, $M_{m,t}^{storage\ main}$, $P_{k,ph,t}^{storage\ facilities}$, $P_{k,t}^{storage\ main}$, $P_{k,mk,t}^{storage\ market}$) es menor que un límite superior ($UPPER M_{m,h}^{storage\ harv-sites}$, $UPPER M_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $UPPER M_m^{storage\ main}$, $UPPER P_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $UPPER P_k^{storage\ main}$, $UPPER P_{k,mk}^{storage\ market}$) multiplicado por la variable binaria usada para definir la existencia de

almacenamiento en algún periodo de tiempo t ($y_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}$, $ym_{m,ph,t}^{storage\ facilities}$, $ym_{m,t}^{storage\ main}$, $y_{k,ph,t}^{storage\ facilities}$, $y_{k,t}^{storage\ main}$, $y_{k,mk,t}^{storage\ market}$).

$$M_{m,h,t}^{storage\ harv-sites} \leq \text{UPPER } M_{m,h}^{storage\ harv-sites} \cdot y_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES}, \quad t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.67)$$

$$M_{m,ph,t}^{storage\ facilities} \leq \text{UPPER } M_{m,ph}^{storage\ facilities} \cdot y_{m,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, ph \in \text{FACILITIES}, \quad t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.68)$$

$$M_{m,t}^{storage\ main} \leq \text{UPPER } M_m^{storage\ main} \cdot y_{m,t}^{storage\ main}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.69)$$

$$P_{k,ph,t}^{storage\ facilities} \leq \text{UPPER } P_{k,ph}^{storage\ facilities} \cdot y_{k,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, ph \in \text{FACILITIES}, \quad t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.70)$$

$$P_{k,t}^{storage\ main} \leq \text{UPPER } P_k^{storage\ main} \cdot y_{k,t}^{storage\ main}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.71)$$

$$P_{k,mk,t}^{storage\ market} \leq \text{UPPER } P_{k,mk}^{storage\ market} \cdot y_{k,mk,t}^{storage\ market}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, \text{MARKETS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.72)$$

Por otro lado, la cantidad de material almacenado ($M_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}$, $M_{m,ph,t}^{storage\ facilities}$, $M_{m,t}^{storage\ main}$, $P_{k,ph,t}^{storage\ facilities}$, $P_{k,t}^{storage\ main}$, $P_{k,mk,t}^{storage\ market}$) es mayor a un límite inferior ($\text{LOWER } M_{m,h}^{storage\ harv-sites}$, $\text{LOWER } M_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $\text{LOWER } M_m^{storage\ main}$, $\text{LOWER } P_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $\text{LOWER } P_k^{storage\ main}$, $\text{LOWER } P_{k,mk}^{storage\ market}$) multiplicado por la misma variable binaria que define el almacenamiento para un periodo de tiempo dado ($y_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}$, $ym_{m,ph,t}^{storage\ facilities}$, $ym_{m,t}^{storage\ main}$, $y_{k,ph,t}^{storage\ facilities}$, $y_{k,t}^{storage\ main}$, $y_{k,mk,t}^{storage\ market}$).

$$M_{m,h,t}^{storage\ harv-sites} \geq \text{LOWER } M_{m,h}^{storage\ harv-sites} \cdot y_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES}, \quad t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.73)$$

$$M_{m,ph,t}^{storage\ facilities} \geq \text{LOWER } M_{m,ph}^{storage\ facilities} \cdot y_{m,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, ph \in \text{FACILITIES}, \quad t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.74)$$

$$M_{m,t}^{storage\ main} \geq \text{LOWER } M_m^{storage\ main} \cdot y_{m,t}^{storage\ main}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.75)$$

$$P_{k,ph,t}^{storage\ facilities} \geq \text{LOWER } P_{k,ph}^{storage\ facilities} \cdot y_{k,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, ph \in \text{FACILITIES}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.76)$$

$$P_{k,t}^{storage\ main} \geq \text{LOWER } P_k^{storage\ main} \cdot y_{k,t}^{storage\ main}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.77)$$

$$P_{k,mk,t}^{storage\ market} \geq \text{LOWER } P_{k,mk}^{storage\ market} \cdot y_{k,mk,t}^{storage\ market}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, \text{MARKETS}, t \in \text{PERIODS} \quad (3.2.78)$$

Debido a que el modelo matemático es un modelo multi-periodo, el almacenamiento puede ser llevado a cabo en todos los periodos de tiempo así como en el tiempo inicial (se considera también como el tiempo final).

Para incluir el costo de capital, la formulación involucra variables binarias sin dependencia del tiempo ($y_{m,h}^{storage\ harv-sites}$, $ym_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $ym_m^{storage\ main}$, $y_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $y_{k,t}^{storage\ main}$, $y_{k,mk,t}^{storage\ market}$) y se han modelado de manera similar que las otras actividades (procesamiento en ambas etapas de procesamiento).

$$y_{m,h}^{storage\ harv-sites} \leq \sum_t y_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES} \quad (3.2.79)$$

$$ym_{m,ph}^{storage\ facilities} \leq \sum_t ym_{m,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, ph \in \text{FACILITIES} \quad (3.2.80)$$

$$ym_m^{storage\ main} \leq \sum_t ym_{m,t}^{storage\ main}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS} \quad (3.2.81)$$

$$y_{k,ph}^{storage\ facilities} \leq \sum_t y_{k,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, ph \in \text{FACILITIES} \quad (3.2.82)$$

$$y_{k,t}^{storage\ main} \leq \sum_t y_{k,t}^{storage\ main}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS} \quad (3.2.83)$$

$$y_{k,mk,t}^{storage\ market} \leq \sum_t y_{k,mk,t}^{storage\ market}, \quad \forall k \in \text{PRODUCTS}, \text{MARKETS} \quad (3.2.84)$$

$$H_{\max} \cdot y_{m,h}^{storage\ harv-sites} \geq \sum_t y_{m,h,t}^{storage\ harv-sites}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, h \in \text{HARVSITES} \quad (3.2.85)$$

$$H_{\max} \cdot ym_{m,ph}^{storage\ facilities} \geq \sum_t ym_{m,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall m \in \text{BIOMASS}, ph \in \text{FACILITIES} \quad (3.2.86)$$

$$H_{\max} \cdot y_{m,t}^{storage\ main} \geq \sum_t y_{m,t}^{storage\ main}, \quad \forall m \in BIOMASS \quad (3.2.87)$$

$$H_{\max} \cdot y_{k,ph}^{storage\ facilities} \geq \sum_t y_{k,ph,t}^{storage\ facilities}, \quad \forall k \in PRODUCTS, ph \in FACILITIES \quad (3.2.88)$$

$$H_{\max} \cdot y_{k,t}^{storage\ main} \geq \sum_t y_{k,t}^{storage\ main}, \quad \forall k \in PRODUCTS \quad (3.2.89)$$

$$H_{\max} \cdot y_{k,mk}^{storage\ market} \geq \sum_t y_{k,mk,t}^{storage\ market}, \quad \forall k \in PRODUCTS, MARKETS \quad (3.2.90)$$

El costo de almacenamiento ($C_{m,h}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $C_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $C_m^{storage\ main}$, $C_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $C_k^{storage\ main}$, $C_{k,mk}^{storage\ market}$) considera tanto el costo de capital así como el costo de operación. El costo de capital considera una parte fija y otra variable. La parte fija del costo de capital para el almacenamiento se obtiene por un costo fijo ($A_{m,h}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $A_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $A_m^{storage\ main}$, $A_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $A_k^{storage\ main}$, $A_{k,mk}^{storage\ market}$) multiplicado por la variable binaria asociada al almacenamiento ($y_{m,h}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $ym_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $ym_m^{storage\ main}$, $y_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $y_k^{storage\ main}$, $y_{k,mk}^{storage\ market}$). La parte variable considera un costo unitario ($B_{m,h}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $B_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $B_m^{storage\ main}$, $B_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $B_k^{storage\ main}$, $B_{k,mk}^{storage\ market}$) multiplicado por la capacidad para el almacenamiento ($UPPER\ M_{m,h}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $UPPER\ M_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $UPPER\ M_m^{storage\ main}$, $UPPER\ P_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $UPPER\ P_k^{storage\ main}$, $UPPER\ P_{k,mk}^{storage\ market}$) y a su vez por la variable binaria asociada al almacenamiento ($y_{m,h}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $ym_{m,ph}^{storage\ facilities}$, $ym_m^{storage\ main}$, $y_{k,ph}^{storage\ facilities}$, $y_k^{storage\ main}$, $y_{k,mk}^{storage\ market}$). Por otro lado, el costo operacional de almacenamiento es calculado por medio de un costo unitario ($UC_{m,h,t}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $UC_{m,ph,t}^{storage\ facilities}$, $UC_{m,t}^{storage\ main}$, $UC_{k,ph,t}^{storage\ facilities}$, $UC_{k,t}^{storage\ main}$, $UC_{k,mk,t}^{storage\ market}$) multiplicado por el nivel de inventario en cada uno de los nodos de la cadena de suministro ($M_{m,h,t}^{storage\ raw\ harv-sites}$, $M_{m,ph,t}^{storage\ facilities}$, $M_{m,t}^{storage\ main}$, $P_{k,ph,t}^{storage\ facilities}$, $P_{k,t}^{storage\ main}$, $P_{k,mk,t}^{storage\ market}$). Las ecuaciones para obtener los costos totales de almacenamiento son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 C_{m,h}^{storage-raw} = & K_F \cdot \left(A_{m,h}^{storage-raw} \cdot y2_{m,h}^{storage} \right. \\
 & \left. + \text{UPPER } M_{m,h}^{storage-raw} \cdot B_{m,h}^{storage-raw} \cdot y2_{m,h}^{storage} \right) \\
 & + \sum_t M_{m,h,t}^{storage-raw} \cdot UC_{m,h,t}^{storage-raw}
 \end{aligned}
 , \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, \\ h \in HARVSITES \end{matrix} \quad (3.2.91)$$

$$\begin{aligned}
 C_{m,ph}^{storage} = & K_F \cdot \left(A_{m,ph}^{storage} \cdot ym2_{m,ph}^{storage} \right. \\
 & \left. + \text{UPPER } M_{m,ph}^{storage} \cdot B_{m,ph}^{storage} \cdot ym2_{m,ph}^{storage} \right) \\
 & + \sum_t M_{m,ph,t}^{storage} \cdot UC_{m,ph,t}^{storage}
 \end{aligned}
 , \quad \forall \begin{matrix} m \in BIOMASS, \\ ph \in FACILITIES \end{matrix} \quad (3.2.92)$$

$$\begin{aligned}
 C_m^{storage} = & K_F \cdot \left(A_m^{storage} \cdot ym2_m^{storage} \right. \\
 & \left. + \text{UPPER } M_m^{storage} \cdot B_m^{storage} \cdot ym2_m^{storage} \right) \\
 & + \sum_t M_{m,t}^{storage} \cdot UC_{m,t}^{storage}
 \end{aligned}
 , \quad \forall m \in BIOMASS \quad (3.2.93)$$

$$\begin{aligned}
 C_{k,ph}^{storage} = & K_F \cdot \left(A_{k,ph}^{storage} \cdot y2_{k,ph}^{storage} \right. \\
 & \left. + \text{UPPER } P_{k,ph}^{storage} \cdot B_{k,ph}^{storage} \cdot y2_{k,ph}^{storage} \right) \\
 & + \sum_t P_{k,ph,t}^{storage} \cdot UC_{k,ph,t}^{storage}
 \end{aligned}
 , \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, \\ ph \in FACILITIES \end{matrix} \quad (3.2.94)$$

$$\begin{aligned}
 C_k^{storage} = & K_F \cdot \left(A_k^{storage} \cdot y2_k^{storage} \right. \\
 & \left. + \text{UPPER } P_k^{storage} \cdot B_k^{storage} \cdot y2_k^{storage} \right) \\
 & + \sum_t P_{k,t}^{storage} \cdot UC_{k,t}^{storage}
 \end{aligned}
 , \quad \forall m \in BIOMASS \quad (3.2.95)$$

$$\begin{aligned}
 C_{k,mk}^{storage\ market} = & K_F \cdot \left(A_{k,mk}^{storage\ market} \cdot y_{k,mk}^{storage\ market} \right. \\
 & \left. + \text{UPPER } P_{k,mk}^{storage\ market} \cdot B_{k,mk}^{storage\ market} \cdot y_{k,mk}^{storage\ market} \right) , \quad \forall \begin{matrix} k \in PRODUCTS, \\ mk \in MARKETS \end{matrix} \\
 & + \sum_t P_{k,mk,t}^{storage\ market} \cdot UC_{k,mk,t}^{storage\ market}
 \end{aligned} \tag{3.2.96}$$

3.2.12 Ingreso económico por venta de productos

El ingreso económico por la venta de los productos es igual a un valor unitario multiplicado por la cantidad de producto vendido en cada centro de consumo.

$$Revenue^{sale\ products} = \sum_k \sum_{mk} \sum_t UC_{k,mk}^{demand} \cdot P_{k,mk,t}^{sold} \tag{3.2.97}$$

3.2.13 Costo por producción de materia prima

El costo de producción u obtención de materia prima es igual a un costo unitario de producción multiplicado por la cantidad de materia prima producida en cada centro de abastecimiento.

$$Cost^{raw\ material} = \sum_m \sum_h \sum_t UC_{m,h}^{raw\ material} \cdot M_{m,h,t}^{prod} \tag{3.2.98}$$

3.2.14 Función objetivo económica

La función objetivo económica es dada por la ganancia anual total (*Profit*); la cual considera el ingreso económico por la venta de productos ($Revenue^{sale\ products}$), menos el costo de producción de materia prima ($Cost^{raw\ material}$), menos el costos de capital ($C_{m,k,r,ph}^{capital\ facilities}$, $C_{m,k,r}^{capital\ main}$, $C_{k,r,sr,ph}^{capital\ facilities}$, $C_{k,r,sr}^{capital\ main}$) y el costo de operación para las plantas de procesamiento para ambas etapas de

procesamiento ($C_{facilities}^{operating}$, $C_{main}^{operating}$, $C2_{facilities}^{operating}$, $C2_{main}^{operating}$), menos los costos de almacenamiento ($C_{m,h}^{storage-raw}$, $C_{m,ph}^{storage}$, $C_{m,ph}^{storage}$, $C_{k,ph}^{storage}$, $C_k^{storage}$, $C_{k,mk}^{storage}$) y los costos de transporte ($C_{transp}^{distributed}$, $C_{transp}^{distributed}$, $C_{transp}^{distributed}$, $C_{transp}^{distributed}$).

$$\begin{aligned}
 Profit &= Revenue^{sale\ products} - Cost^{raw\ material} \\
 &- \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} C_{m,k,r,ph}^{capital\ facilities} - \sum_m \sum_k \sum_r C_{m,k,r}^{capital\ main} - \sum_k \sum_r \sum_{sr} \sum_{ph} C2_{k,r,sr,ph}^{capital\ facilities} \\
 &- \sum_k \sum_r \sum_{sr} C2_{k,r,sr}^{capital\ main} - C_{facilities}^{operating} - C_{main}^{operating} - C2_{facilities}^{operating} - C2_{main}^{operating} \\
 &- \sum_m \sum_h C_{m,h}^{storage-raw} - \sum_m \sum_{ph} C_{m,ph}^{storage} - \sum_m C_m^{storage} \\
 &- \sum_k \sum_{ph} C_{k,ph}^{storage} - \sum_k C_k^{storage} - \sum_k \sum_{mk} C_{k,mk}^{storage} \\
 &- C_{transp}^{distributed} - C_{transp}^{distributed} \\
 &- C_{transp}^{distributed} - C_{transp}^{distributed}
 \end{aligned} \tag{3.2.99}$$

3.2.15 Función objetivo ambiental

La función objetivo ambiental considera el impacto ambiental evaluado a través del método de Eco-indicador 99. Entonces, el impacto ambiental global es igual al impacto por la producción de materias primas ($UEco_m^{raw\ material} \cdot M_{m,h,t}^{prod}$) más el impacto por el uso de productos ($UEco_k^{use\ products} \cdot P_{k,mk,t}^{sold}$) más el impacto por el procesamiento de la materia prima ($UEco_{k,r,sr,ph}^{operating\ facilities} \cdot P_{feed}^{stage2}$, $UEco_{k,r,sr}^{operating\ main} \cdot P_{feed}^{stage2}$, $UEco_{m,k,r,ph}^{operating\ facilities} \cdot M_{m,k,r,ph,t}^{processed}$, $UEco_{m,k,r}^{operating\ main} \cdot M_{m,k,r,t}^{processed}$, $UEco_{k,ph,mk}^{distributed\ facilities-mk} \cdot P_{k,ph,mk,t}^{distributed}$, $UEco_{k,mk}^{distributed\ main-mk} \cdot P_{k,mk,t}^{distributed}$) más el impacto por el transporte ($UEco_{m,h,ph}^{distributed\ hs-facilities} \cdot M_{m,h,ph,t}^{distributed}$, $UEco_{m,h}^{distributed\ hs-main} \cdot M_{m,h,t}^{distributed}$). Cabe mencionar que cada impacto ambiental es obtenido por un valor de Eco-indicador unitario multiplicado por la cantidad de material asociado a cada actividad.

$$\begin{aligned}
 EI = & \sum_k \sum_{mk} \sum_t \text{UEco}_k^{\text{use products}} \cdot P_{k,mk,t}^{\text{sold}} + \sum_m \sum_h \sum_t \text{UEco}_m^{\text{raw material}} \cdot M_{m,h,t}^{\text{prod}} \\
 & + \sum_k \sum_r \sum_{sr} \sum_{ph} \sum_t \text{UEco}_{k,r,sr,ph}^{\text{operating facilities}} \cdot P_{k,r,sr,ph,t}^{\text{stage 2 feed}} + \sum_k \sum_r \sum_{sr} \sum_t \text{UEco}_{k,r,sr}^{\text{operating main}} \cdot P_{k,r,sr,t}^{\text{stage 2 feed main}} \\
 & + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t \text{UEco}_{m,k,r,ph}^{\text{operating facilities}} \cdot M_{m,k,r,ph,t}^{\text{processed facilities}} + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t \text{UEco}_{m,k,r}^{\text{operating main}} \cdot M_{m,k,r,t}^{\text{processed main}} \\
 & + \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t \text{UEco}_{m,h,ph}^{\text{distributed hs-facilities}} \cdot M_{m,h,ph,t}^{\text{distributed hs-facilities}} + \sum_m \sum_h \sum_t \text{UEco}_{m,h}^{\text{distributed hs-main}} \cdot M_{m,h,t}^{\text{distributed hs-main}} \\
 & + \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t \text{UEco}_{k,ph,mk}^{\text{distributed facilities-mk}} \cdot P_{k,ph,mk,t}^{\text{distributed facilities-mk}} + \sum_k \sum_{mk} \sum_t \text{UEco}_{k,mk}^{\text{distributed main-mk}} \cdot P_{k,mk,t}^{\text{distributed main-mk}}
 \end{aligned} \tag{3.2.100}$$

3.2.16 Metodología de solución para la consideración de incertidumbre

La Figura 3.4 muestra de manera general la estrategia de solución para el modelo propuesto en la sección 3.2. En ese sentido, la estrategia de solución es dividida en varios pasos; los cuales son definidos como sigue:

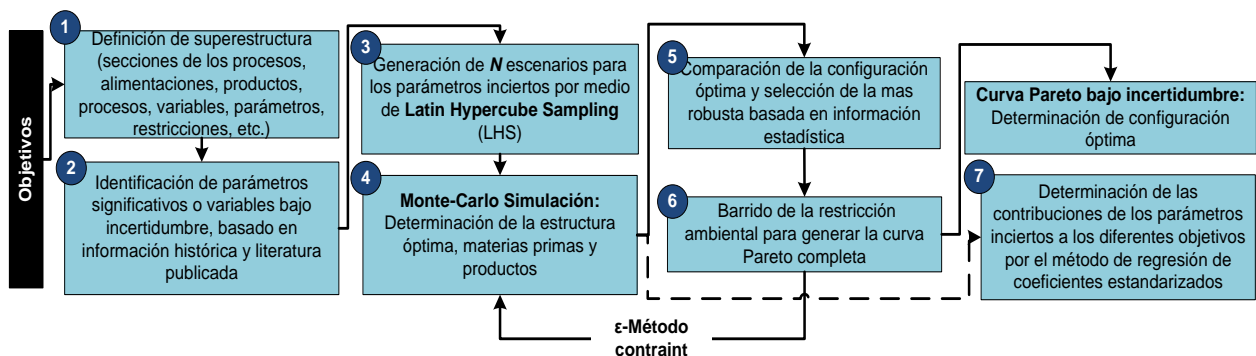


Figura 3.4 Representación general de la estrategia de solución para el problema de la sección 3.2

3.2.16.1 Definición de la superestructura

La definición de la superestructura es hecha para conocer las tecnologías de procesamiento, productos, materias primas, localización de instalaciones así como otros parámetros asociados a la cadena de suministro (límites de procesamiento, demandas, límites de transporte).

3.2.16.2 *Identificación de los parámetros inciertos*

El segundo paso consiste en la identificación de los parámetros y variables con una incertidumbre significativa basada en información histórica y datos publicados en la literatura. Los datos permiten determinar información estadística esencial para las etapas subsecuentes (principalmente para la generación de escenarios).

3.2.16.3 *Generación de escenarios para los parámetros inciertos*

Durante la tercera etapa, un muestreo para N escenarios para los parámetros inciertos es realizado a través de un método adecuado. Para este caso, se seleccionó el método Latin Hypercube Sampling (LHS); el cual requiere límites superiores e inferiores para proveer los escenarios; por lo tanto, las desviaciones estándar son empleadas en esta etapa. Subsecuentemente, se realiza una simulación tipo Monte Carlo con el fin de encontrar una solución óptima a un problema determinístico para cada parámetro generado.

3.2.16.4 *Solución del problema determinístico de optimización asociado*

Como se ha mencionado anteriormente, un conjunto de escenarios son generados para los parámetros inciertos. Por lo tanto, se genera un problema determinístico para cada uno de los escenarios, el cual tiene que ser resuelto. Cada uno de los problemas determinísticos es expresado en forma condensada de la siguiente manera:

Maximización de la ganancia neta anual y minimización del impacto ambiental global (maximización del valor negativo del impacto ambiental global).

$$\text{Max}\{Profit(\text{Equation}(3.2.99)), -EI(\text{Equation}(3.2.100))\}$$

Sujeto a:

$$\left. \begin{array}{l} h(x, y) = 0 \\ g(x, y) \leq 0 \end{array} \right\} \text{Equations (3.2.1)–(3.2.98)}$$

$$x \in \mathbb{R}, y \in \{0,1\}$$

Donde x representa a las variables continuas como el flujo de material, los niveles de inventario, el material procesado, etc. Además, y simboliza las variables binarias para seleccionar la capacidad de las tecnologías de procesamiento, existencia de transporte, almacenamiento, etc.

Como se puede observar, el problema anterior es un problema de optimización multi-objetivo, el cual puede ser resuelto por cualquier algoritmo de solución para problemas multi-objetivo. En este caso, se ha elegido el método ϵ -constraint (ver sección 2.1.2), tomando en consideración que el objetivo principal es la ganancia neta anual y el objetivo que es sujeto al valor del parámetro ϵ es el ambiental. Por lo tanto, el problema original se modifica a:

$$\text{Max} \{ \text{Profit} (\text{Equation (3.2.99)}) \}$$

Sujeto a:

$$EI(\text{Equation (3.2.100)}) \leq \epsilon$$

$$\left. \begin{array}{l} h(x, y) = 0 \\ g(x, y) \leq 0 \end{array} \right\} \text{Equations (3.2.1)–(3.2.98)}$$

$$x \in \mathbb{R}, y \in \{0,1\}$$

Una vez que el problema previo es resuelto, es posible determinar la solución óptima para la ganancia neta anual así como la topología de la cadena de suministro. Es importante mencionar que cada uno de los problemas determinísticos está sujeto a una restricción (límite superior) para el impacto ambiental.

3.2.16.5 Comparación entre las diferentes topologías de la cadena de suministro

Cuando los problemas determinísticos de optimización son resueltos, el paso siguiente es comparar las topologías de la cadena de suministro para cada una de las soluciones con el fin de seleccionar la más flexible en base en información estadística. En este paso, la cadena de suministro es dividida en varias etapas (ver Figura 3.5): 1. Transporte de biomasa desde lugares de abastecimiento hasta plantas de procesamiento, 2. Procesamiento de biomasa en la primera etapa de procesamiento, 3. Procesamiento de corriente de subproductos en la segunda etapa de procesamiento, 4. Transporte de productos desde las plantas de procesamiento a los consumidores. Cada sección de la cadena de suministro es identificada y la cadena de suministro completa es obtenida cuando al menos una opción de cada parte es seleccionada (ver Figura 3.5).

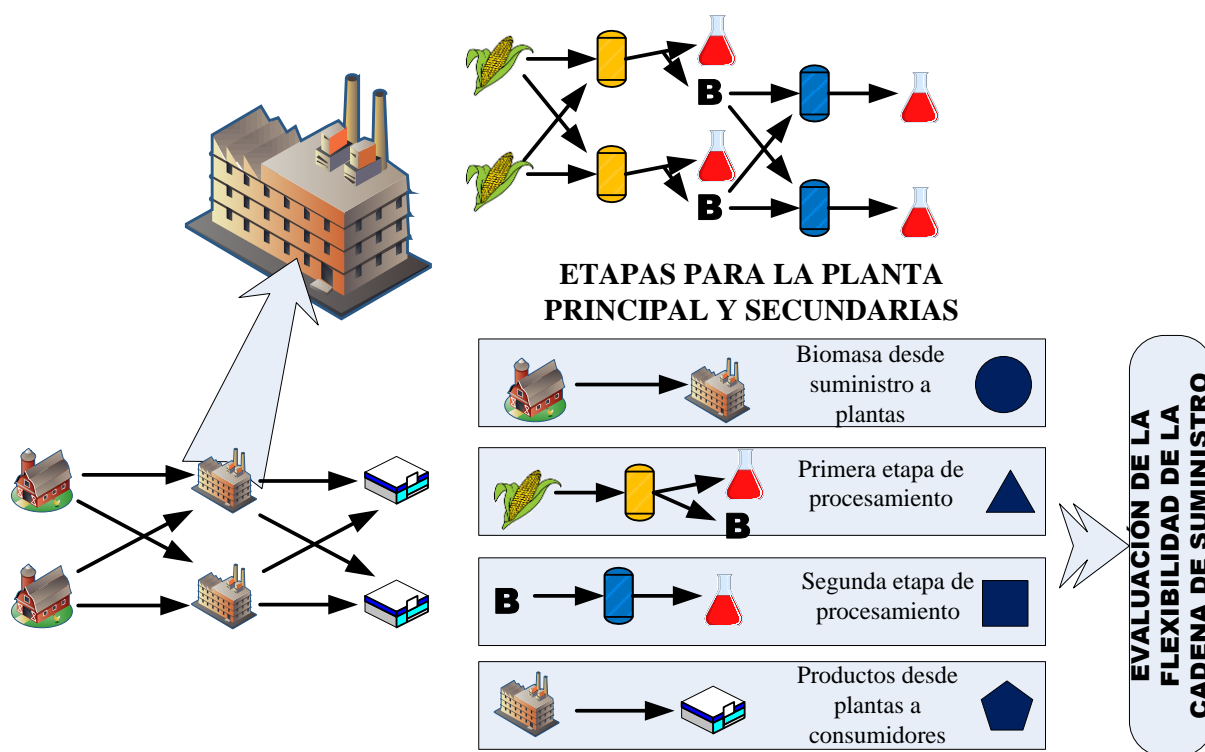


Figura 3.5 Representación de las diferentes secciones de la cadena de suministro

El número de ocasiones que cada sección es repetida es calculado para obtener la máxima frecuencia para obtener el valor de repetición; el cual es igual a la frecuencia de una sección dividida por la frecuencia de la sección que presente el mayor número de repeticiones. Entonces,

la suma de los factores de repetición para cada topología es comparado con las otras y la tecnología seleccionada es la que presenta el mayor valor del factor de repetición global. La Figura 3.6 ejemplifica dos casos de este procedimiento. El caso A representa una situación en la cual al menos una de las configuraciones es repetida en su totalidad, por tanto la topología seleccionada es la que tiene mayor moda. En este caso, la topología reportada es la que está asociada al mayor valor de la función objetivo económica. Por otro lado, el caso B provee una situación en la cual todas las configuraciones de la cadena de suministro son diferentes; entonces la estructura seleccionada corresponde a la solución dada en el primer escenario, ya que la sección 1 y 2 presentan el mayor factor de repetición individual para conseguir un factor de repetición global igual a 4. Cabe mencionar que el resultado final del caso A es la topología con el valor de moda mayor; sin embargo, si todas las topologías son completamente distintas (Caso B), la estructura seleccionada es la que produce el mayor número de interconexiones en las diferentes etapas.

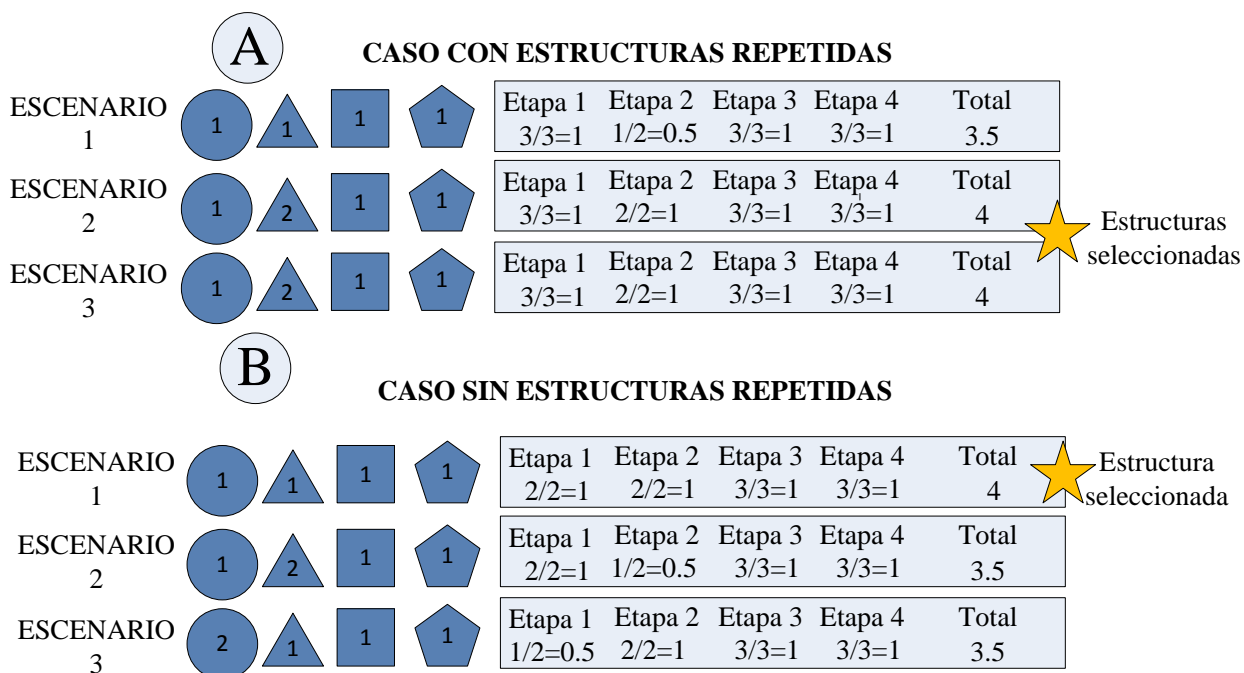


Figura 3.6 Ejemplificación del método para seleccionar la topología a partir de las soluciones determinísticas

3.2.16.6 *Cambio del límite superior para el impacto ambiental*

El sexto paso consiste en el cambio del valor del límite superior para el impacto ambiental y regresar al paso 4 para generar la curva Pareto completa.

3.2.16.7 *Regresión de coeficientes estandarizados*

Adicionalmente, el último paso es propuesto para llevar a cabo un análisis estadístico basado en el método de regresión de coeficientes estandarizados para identificar la contribución de cada uno de los parámetros inciertos o variables en los objetivos seleccionados (Morales-Rodriguez y col., 2011). Este paso puede ser útil para hacer predicciones acerca del comportamiento de la configuración de la cadena de suministro cuando el precio de algunas materias primas cambian (Sin y col., 2009).

3.3 Evaluación del riesgo financiero en una cadena de suministro para la conversión de biomasa

El problema abordado en esta sección es la planificación óptima de una cadena de suministro distribuida basada en conversión de biomasa bajo precio incierto de materia prima para la evaluación y análisis del riesgo financiero. La Figura 3.7 ilustra que el sistema considera centros de abastecimiento de biomasa, plantas de procesamiento y consumidores. Además, la interacción de las variables del sistema es contemplado a través de un horizonte de tiempo dividido en varios periodos iguales. En cada periodo, se toman las decisiones acerca de cómo distribuir la materia prima y productos y como procesar los materiales. El objetivo de éste análisis es encontrar la configuración óptima de la cadena de suministro, incluyendo la maximización del comportamiento económico esperado y minimizar el riesgo asociado.

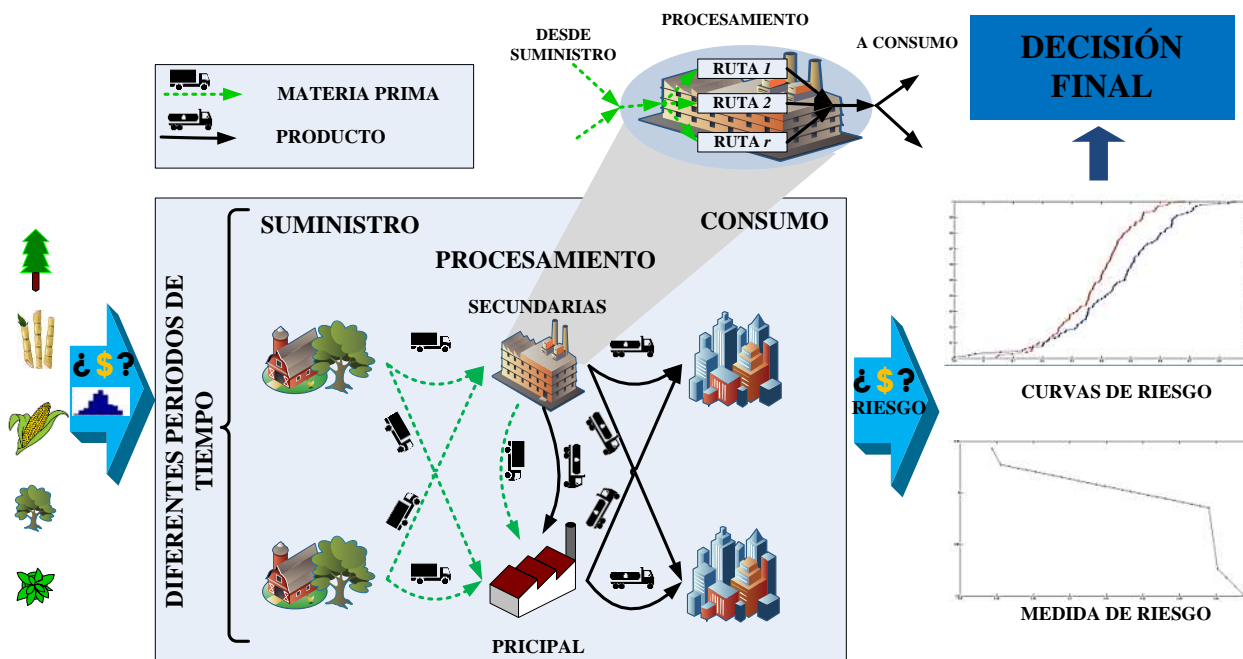


Figura 3.7 Superestructura de la metodología propuesta para la evaluación del riesgo financiero

3.3.1 Modelo matemático

La formulación matemática está compuesta de balances de masa, límites de capacidad así como de funciones objetivo. En este sentido, la notación empleada es como sigue: el índice h representa los sitios de almacenamiento, el índice ph denota las plantas de procesamiento y el índice mk definen los centros de consumo. Por otro lado, el índice m se utiliza para las materias primas, mientras k es usado para los productos considerados. Adicionalmente, el índice r define las rutas de procesamiento en las plantas de procesamiento, el índice q se usa para las economías de escala. Finalmente el índice t representan los periodos de tiempo y el índice s para los escenarios inciertos.

La formulación matemática es un modelo estocástico de dos etapas, donde las variables de la primera etapa representan la topología de la cadena de suministro, mientras las variables de la segunda etapa denotan las decisiones de planeación. En este sentido, se propone un conjunto de escenarios con igual probabilidad de ocurrencia. Es importante mencionar que, con el fin de no perder generalidad, los valores de los parámetros en cada escenario son generados a través diversas funciones de probabilidad. En esencia, el modelo contiene las ecuaciones descritas en la

sección 3.2 del presente trabajo. Una de las principales diferencias con el modelo previamente descrito es la consideración de solo una etapa de procesamiento con un factor de conversión para la segunda etapa igual a cero.

Por otro lado, el modelo contempla la optimización de dos funciones objetivo. La primera función objetivo es la maximización de la ganancia esperada y la otra es la minimización de una medida del riesgo que permite controlar la variabilidad de la distribución de ganancias en los escenarios considerados en el análisis.

3.3.1.1 Ganancia esperada

La ganancia esperada ($E[profit]$) es calculada como la suma de los valores individuales de la ganancia neta anual en cada escenario multiplicado por el correspondiente valor de probabilidad de ocurrencia ($Prob_s$):

$$E[profit] = \sum_s Prob_s \cdot Profit_s \quad (3.3.1)$$

3.3.1.2 Peor valor de la ganancia neta anual

La función objetivo para el control de la variabilidad de los parámetros inciertos es el peor valor para la ganancia neta anual; la cual es definida como el menor valor de ganancia para todos los escenarios.

$$WC \leq Profit_s, \quad \forall s \in SCENARIOS \quad (2)$$

3.3.1.3 Peor valor de la ganancia neta anual

El modelo matemático puede ser expresado de manera compacta como sigue:

$$\max \{E[\textit{profit}], WC\}$$

$$s.t. h(x, y) = 0$$

$$g(x, y) \leq 0$$

$$x \in \mathbb{R}, y \in \{0, 1\}$$

Donde x representa las variables continuas como las cantidades de biomasa y productos así como los niveles de inventario; por otro lado, y se usa para indicar las variables binarias para seleccionar la capacidad de procesamiento, límites de transporte y tecnologías de procesamiento. El modelo puede ser resuelto por cualquier algoritmo estándar para optimización multi-objetivo. Igualmente a la sección 3.2, se utiliza el método epsilon constraint ya que es posible generar información para ambos objetivos y sus soluciones.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se discutirán los resultados para cada una de las secciones de la metodología; es decir, la aplicación de la dinámica robusta y acciones de control a una cadena de suministro, la evaluación del riesgo financiero bajo precio incierto de la materia prima y, la planificación multi-objetivo bajo incertidumbre de una cadena de suministro. Por lo tanto, los resultados son divididos en tres secciones que se describen a continuación:

4.1 Optimización dinámica de un sistema de biorefinerías







El modelo referente a la optimización dinámica de un sistema de biorefinerías fue aplicado a un caso de estudio para establecer un sistema distribuido de biorefinerías en México. Las materias primas pueden ser producidas en seis regiones geográficas distribuidas; las cuales son presentadas en la Tabla 4.1, mientras los productos son procesador en seis localizaciones, 5 plantas de procesamiento secundarias y una planta de procesamiento principal. El caso involucra un conjunto de 9 biorecursos (astillas de madera, madera comercial, caña de azúcar, granos de maíz, granos de sorgo, palma africana, jatropha y girasol). Además, la disponibilidad para cada materia prima en los diferentes lugares es fuertemente afectada por la región y temporalidad ya que las condiciones climáticas cambian drásticamente a lo largo del año en el País. Por otro lado, se han considerado dos productos (bioetanol y biodiésel). Además, se contemplan 4 tecnologías de procesamiento disponibles (gasificación y biosíntesis, hidrólisis y fermentación, gasificación y síntesis química, y transesterificación). Los factores de conversión para las diversas tecnologías fueron obtenidas del trabajo desarrollado por Santibañez-Aguilar y col. (2014).

El modelo discretizado consta de 335,402 variables continuas, 83,674 variables binarias y 412,988 restricciones. El modelo para el control dinámico fue codificado en el lenguaje de programación GAMS y fue resuelto usando una computadora con dos procesadores Intel Xenon e5345 a 2.40 GHz con 100 GB de RAM. El tiempo promedio de CPU para la solución del problema dinámico es de aproximadamente 48 horas usando 20 elementos finitos en un horizonte de tiempo de un año.

La Figura 4.1 muestra el comportamiento de los inventarios de materia prima para los centros de abastecimiento. Cabe destacar que solo se muestran los niveles de inventario para tres

materia primas (astillas de madera, grano de sorgo, y sorgo dulce) porque las otras materias primas son consumidos y producidos a la misma razón. Adicionalmente, en la mayoría de los centros de abastecimiento, el nivel de inventario no es constante debido a que los requerimientos cambian continuamente. Sin embargo, para el grano de sorgo en el centro de suministro en la región, el nivel de inventario es casi constante en el primer tercio del año. También, se puede notar que el nivel de inventario del grano de sorgo es el más grande con respecto a los inventarios en sitios de abastecimiento.

Tabla 4.1 Descripción geográfica para los centros de abastecimiento

Región geográfica	Estados considerados	Representación esquemática
Noroeste	Sinaloa, Sonora, Durango, Nayarit, Baja California, Baja California sur	
Sur	Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Oaxaca	
Oeste	Michoacán, Jalisco, Guanajuato, Guerrero, Colima	
Norte	Coahuila, Nuevo León, Chihuahua, Zacatecas, Aguas calientes	
Este	Veracruz, Puebla, Tamaulipas, Hidalgo, San Luis Potosí	
Centro	Ciudad de México, Estado de México, Querétaro, Tlaxcala, Morelos	

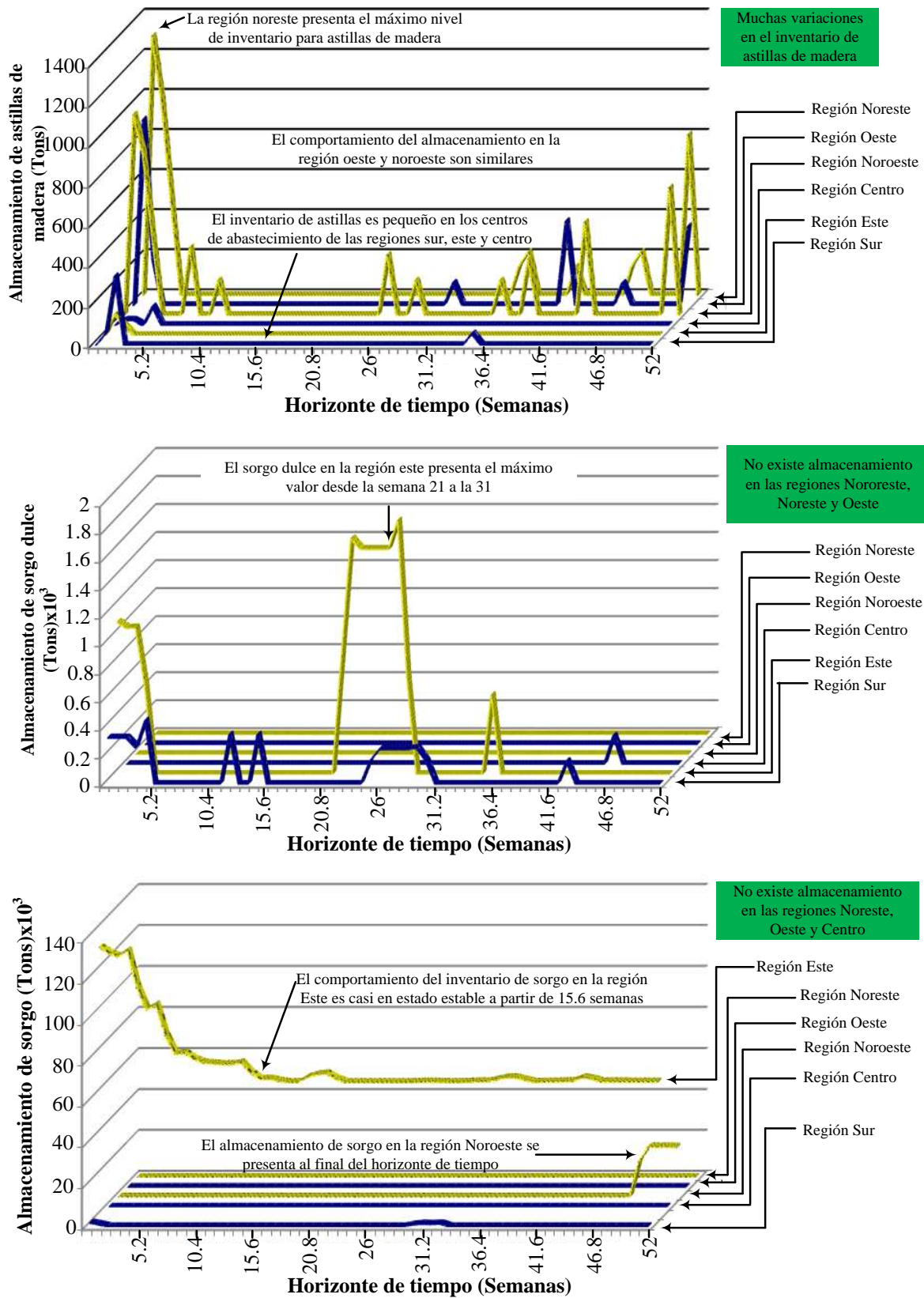


Figura 4.1 Nivel de inventario de materia prima en los centros de abastecimiento

Por otro lado, los niveles de inventario en las plantas de procesamiento son presentados en las Figuras 4.2 – 4.4. Las Figuras 4.2 y 4.3 ilustran el inventario de las materias primas utilizadas para producir etanol. Las materias primas seleccionadas para la producción de etanol son astillas de madera, caña de azúcar, grano de sorgo, sorgo dulce y grano de maíz. Es importante mencionar que la función objetivo se enfoca en satisfacer la demanda y el objetivo económico y ambiental no son considerados. Por esta razón, la mayoría de las materias primas tienen que ser utilizadas para obtener la mayor cantidad de etanol. En este sentido, la Figura 4.2 ilustra el comportamiento del almacenamiento de astillas de madera, caña de azúcar y grano de maíz, el cual es intermitente para la mayoría de las plantas de procesamiento. Sin embargo, el inventario de la planta de procesamiento central es casi constante a lo largo del año, aunque los niveles de inventario son más pequeños. Adicionalmente, el comportamiento del nivel de inventario para caña de azúcar y maíz es muy similar. Pero el nivel de inventario de caña de azúcar es aproximadamente 80 % superior al nivel de inventario del maíz. Los niveles de inventario de caña de azúcar y maíz presentan una disminución constante a lo largo del tiempo para todas las plantas de procesamiento secundarias, y para la planta de procesamiento principal es constante.

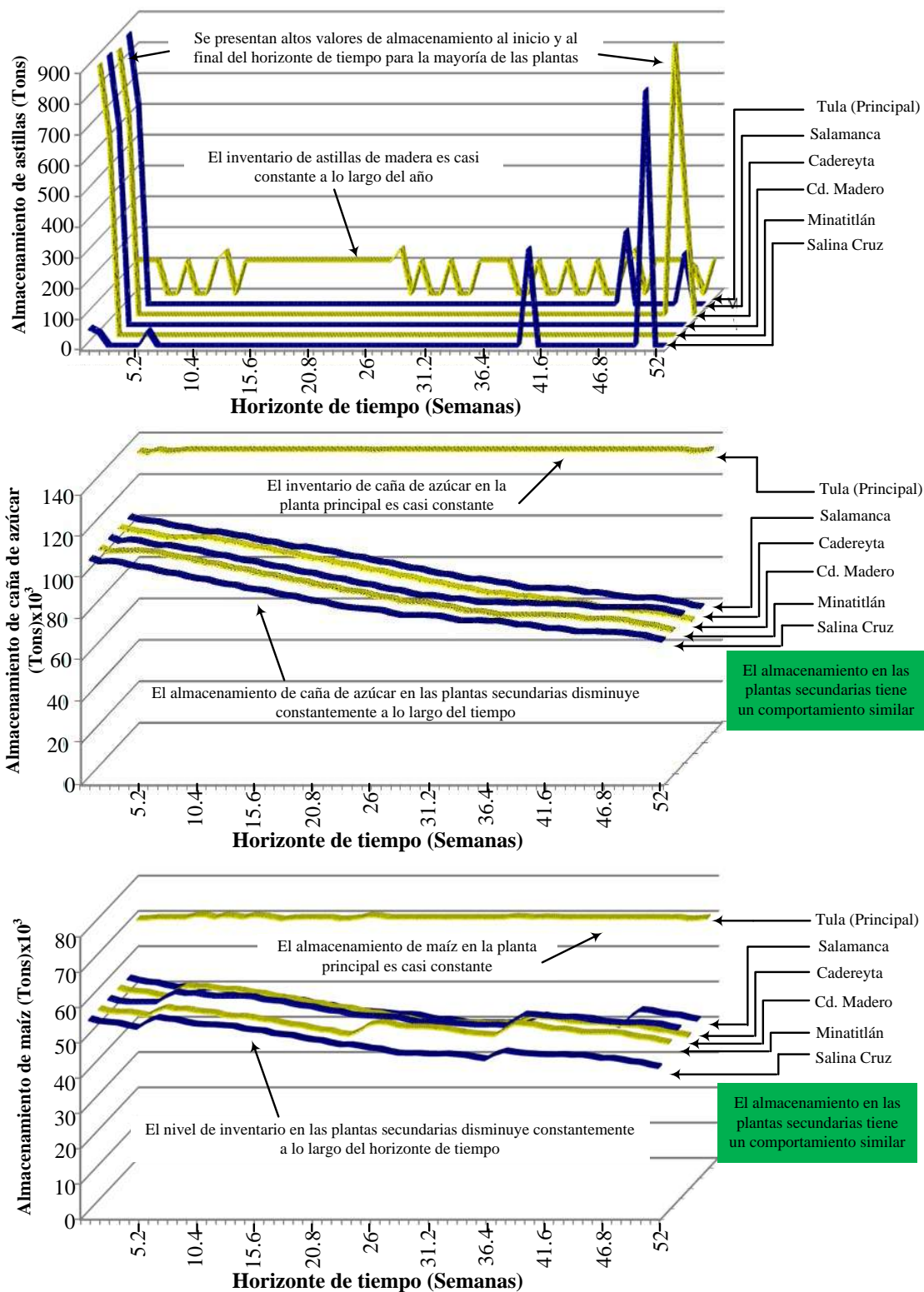


Figura 4.2 Nivel de inventario de materia prima en las plantas de procesamiento. Parte 1
(Astillas de madera, caña de azúcar y maíz grano)

Por otra parte, la Figura 4.3 muestra los niveles de inventario para sorgo en grano y sorgo dulce en las plantas de procesamiento. Para el caso del sorgo en grano, el nivel de inventario presenta un incremento al inicio del horizonte de tiempo y una continua disminución para las plantas de procesamiento secundarias. Además, el nivel de inventario para sorgo en grano en la planta de procesamiento principal es casi constante. Alternativamente, la Figura 4.3 presenta el sorgo dulce almacenado en las plantas de procesamiento secundarias con una disminución uniforme a partir del principio del horizonte del tiempo hasta el final del mismo. Finalmente, la Figura 4.4 ilustra el nivel de inventario de las materias primas para producir biodiésel, donde los niveles de inventario presentan pulsos intermitentes en el horizonte del tiempo.

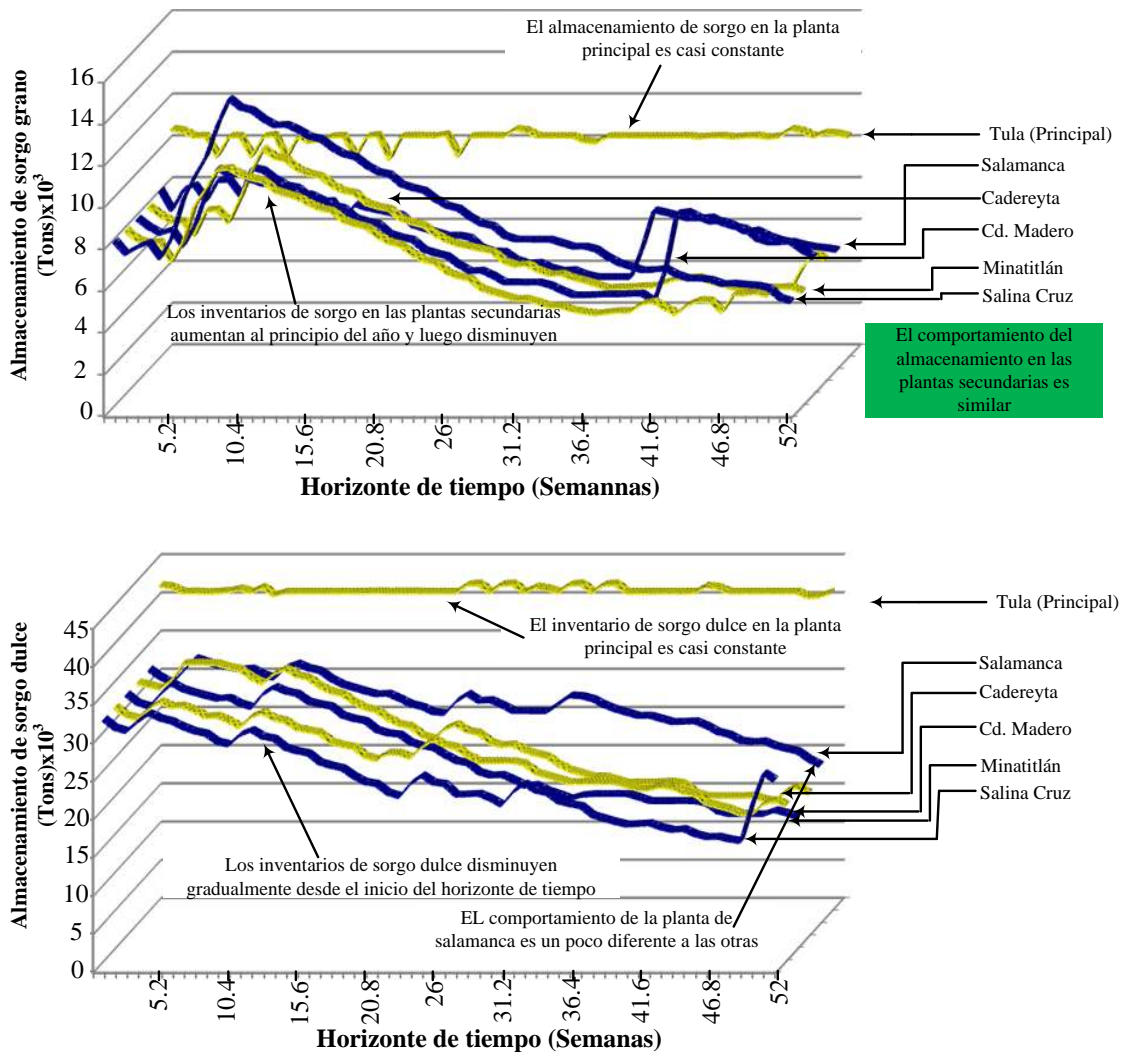


Figura 4.3 Nivel de inventario de materia prima en las plantas de procesamiento. Parte 2 (Sorgo dulce y sorgo grano)

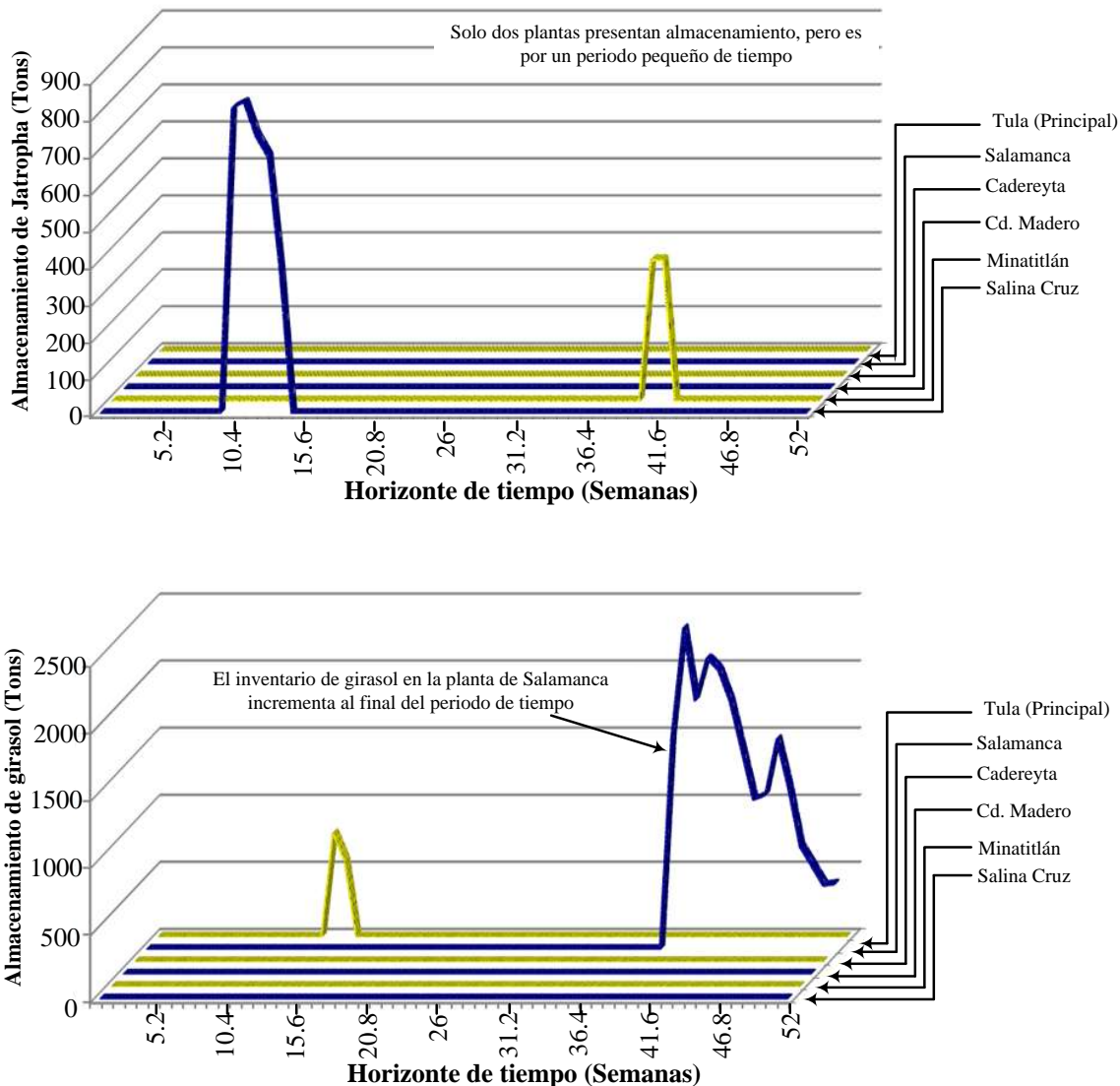


Figura 4.4 Nivel de inventario de materia prima en las plantas de procesamiento. Parte 3 (Jatropha y girasol)

La Tabla 4.2 muestra la cantidad de materias primas usadas en las plantas de procesamiento. Como se puede observar la principal materia prima para producir bioetanol es la caña de azúcar con un 35 %, la segunda es el sorgo dulce con 25.8 %. En cuanto a las plantas de procesamiento, se observa que la planta localizada en Salamanca tiene la más alta producción de etanol debido a que esta planta de procesamiento está localizada cerca de los centros de suministro con alta producción de caña de azúcar y sorgo dulce. Por otro lado, la principal materia prima para la producción de biodiésel es la jatropha (48.7 %) y el resto con girasol. También, la producción de biodiésel es muy distinta para cada planta de procesamiento; por

ejemplo, la planta localizada en Minatitlán está basada en girasol, mientras las plantas de procesamiento localizadas en Tula y Cadereyta están basadas en jatropha.

Tabla 4.2 Materias primas seleccionadas en las plantas de procesamiento

	SALAMANCA		CADEREYTA		CD. MADERO		MINATITLÁN		SALINA CRUZ		TULA		TOTAL	
	Tons (10 ⁻³)	%	Tons (10 ⁻³)	%	Tons (10 ⁻³)	%	Tons (10 ⁻³)	%	Tons (10 ⁻³)	%	Tons (10 ⁻³)	%	Tons (10 ⁻³)	%
PRODUCCIÓN DE BIOETANOL														
ASTILLAS														
DE	8.95	7.9	17.31	14.5	11.34	11.3	12.67	10.7	12.54	11.2	4.68	6.9	67.48	10.7
MADERA														
MADERA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAÑA DE AZÚCAR	40.99	36.1	41.13	34.5	38.22	37.9	45.33	38.2	43.87	39.2	11.70	17.3	221.2	35.0
GRANO DE MAÍZ	20.32	17.9	19.92	16.7	15.10	15.0	20.16	17.0	20.58	18.4	16.81	24.8	112.9	17.9
GRANO DE SORGO	11.63	10.3	12.14	10.2	10.54	10.5	10.51	8.9	10.50	9.4	11.60	17.1	66.92	10.6
SORGO DULCE	31.54	27.8	28.65	24.0	25.56	25.4	29.91	25.2	24.32	21.8	22.96	33.9	163.0	25.8
PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL														
PALMA AFRICANA	0	0	0.009	0.4	0	0	0	0	1.78	20.5	0.71	12.5	2.50	11.2
JATROPHA	2.66	76.2	1.44	67.0	0.52	42.4	0	0.0	2.78	32.0	3.48	61.3	10.88	48.7
GIRASOL	0.83	23.8	0.70	32.6	0.70	57.6	1.09	100.0	4.14	47.5	1.49	26.2	8.94	40.1

La Figura 4.5 presenta los resultados para la demanda de bioetanol en los diferentes mercados, donde 41 % de la demanda es satisfecha en el consumidor localizado en la región sur y 60.5 % para el consumidor de la región este. Es importante notar que la demanda del consumidor en la región este es el triple que la demanda en el consumidor sur, lo cual ilustra que la configuración óptima de la cadena de suministro se enfoca en satisfacer los lugares con un alto valor de demanda requerida. Además, la demanda satisfecha toma su mayor valor al principio y al final del horizonte del tiempo (coincide con los valores más altos de la demanda requerida).

Adicionalmente, el nivel de inventario de etanol en las plantas de procesamiento y centros de distribución se muestran en la Figura 4.6. El caso de las plantas de procesamiento se presenta

en la Figura 4.6a, donde se observa que el comportamiento es muy similar en todas las plantas de procesamiento y los niveles de inventario toman su valor máximo al principio y al final del horizonte de tiempo. Estos valores coinciden con los valores máximos para la demanda satisfecha, en otras palabras, la disponibilidad de etanol para las plantas de procesamiento es alta porque la producción de etanol es suficiente para satisfacer la mayoría de la demanda requerida para los consumidores. Sin embargo, este comportamiento es limitado por el tiempo de respuesta de la cadena de suministro. Similarmente, el nivel de inventario de etanol para los centros de distribución son dados en la Figura 4.6b. Cabe destacar que el nivel de etanol almacenado en el centro de distribución en la región este presenta un alto valor a partir de la semana 31 a la semana 49. Esto indica que la demanda de etanol para la región este es casi satisfecha en este periodo del tiempo, aunque este valor disminuye para satisfacer la demanda hasta el final del año.

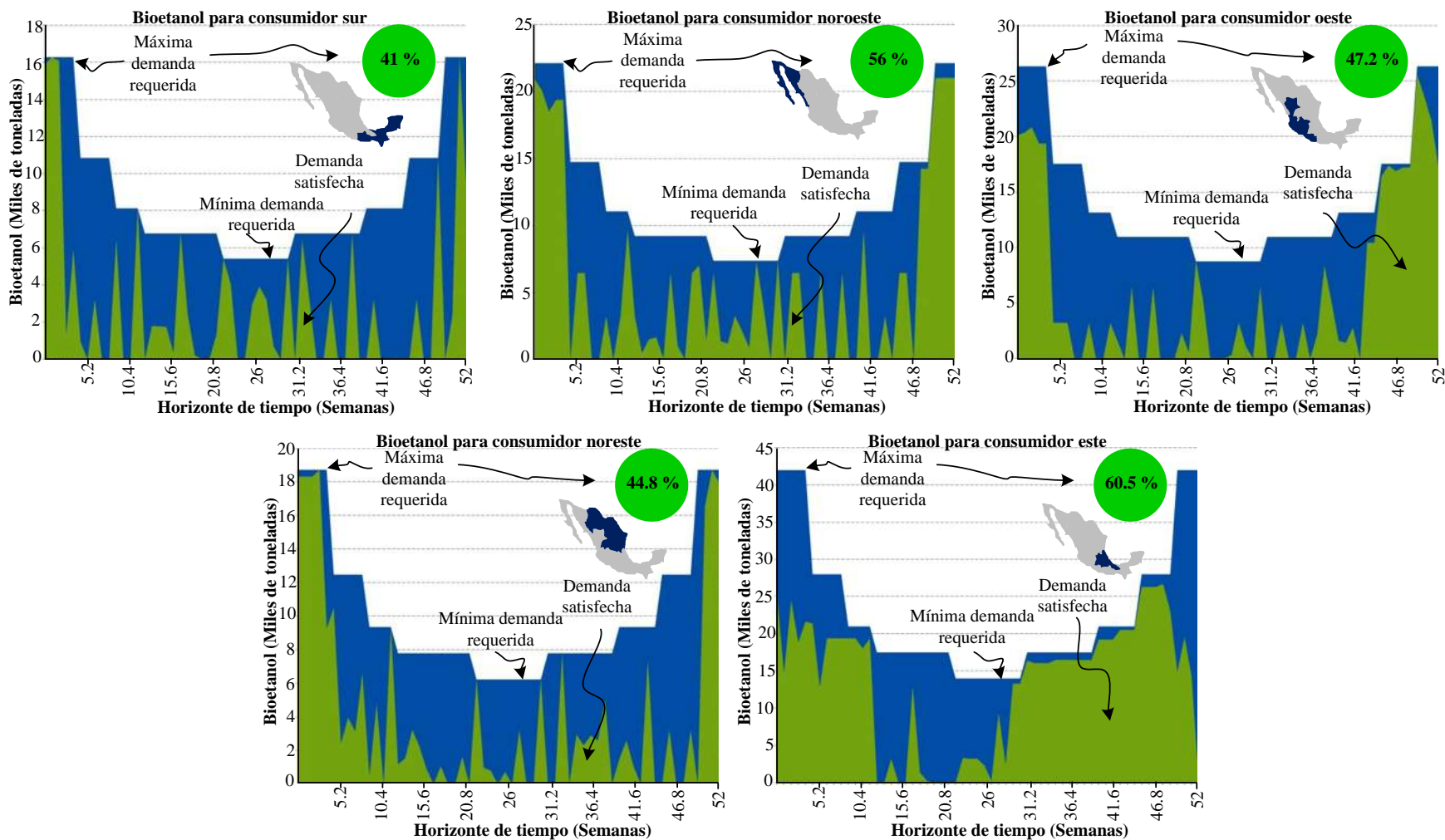


Figura 4.5 Demandas satisfecha y requerida de bioetanol en los centros de consumo

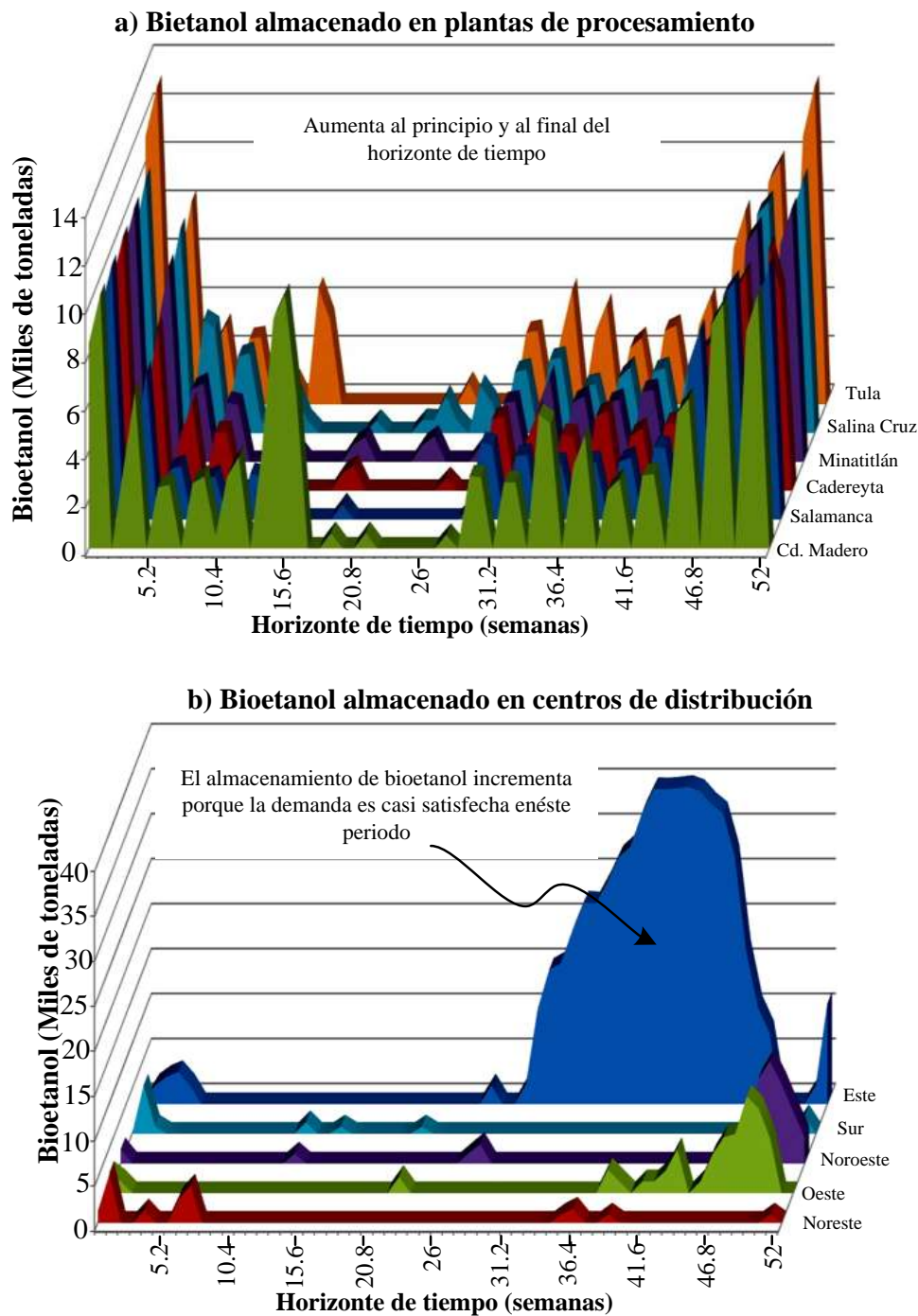


Figura 4.6 Nivel de inventario para el etanol en: a) Plantas de procesamiento. b) Centros de distribución.

Para el caso del biodiésel, la Figura 4.7 presenta la demanda satisfecha para todas las regiones de consumo. Como puede ser visto, el máximo porcentaje de demanda satisfecha de biodiésel es 79.9 % para la región noreste, mientras el menor porcentaje de demanda satisfecha de biodiésel es 56.6 % para la región este. Sin embargo, la zona este tiene la máxima demanda requerida y la región noreste requiere la mínima cantidad de biodiésel. Entonces, la topología óptima de la cadena de suministro distribuye uniformemente el biodiésel en todos los consumidores. En otras palabras, la cantidad de biodiésel que es distribuido a los consumidores es similar, aunque la demanda requerida de biodiésel es diferente para todas las regiones de consumo.

Finalmente, el biodiésel almacenado en las plantas de procesamiento es presentado en la Figura 4.8a, mientras la Figura 4.8b ilustra el nivel de inventario de biodiésel para los centros de distribución. La cantidad de biodiésel almacenado es muy intermitente, mientras en los centros de distribución existe una alta cantidad al principio del horizonte del tiempo principalmente porque la máxima cantidad de demandas satisfecha y requerida coinciden con dicho periodo.

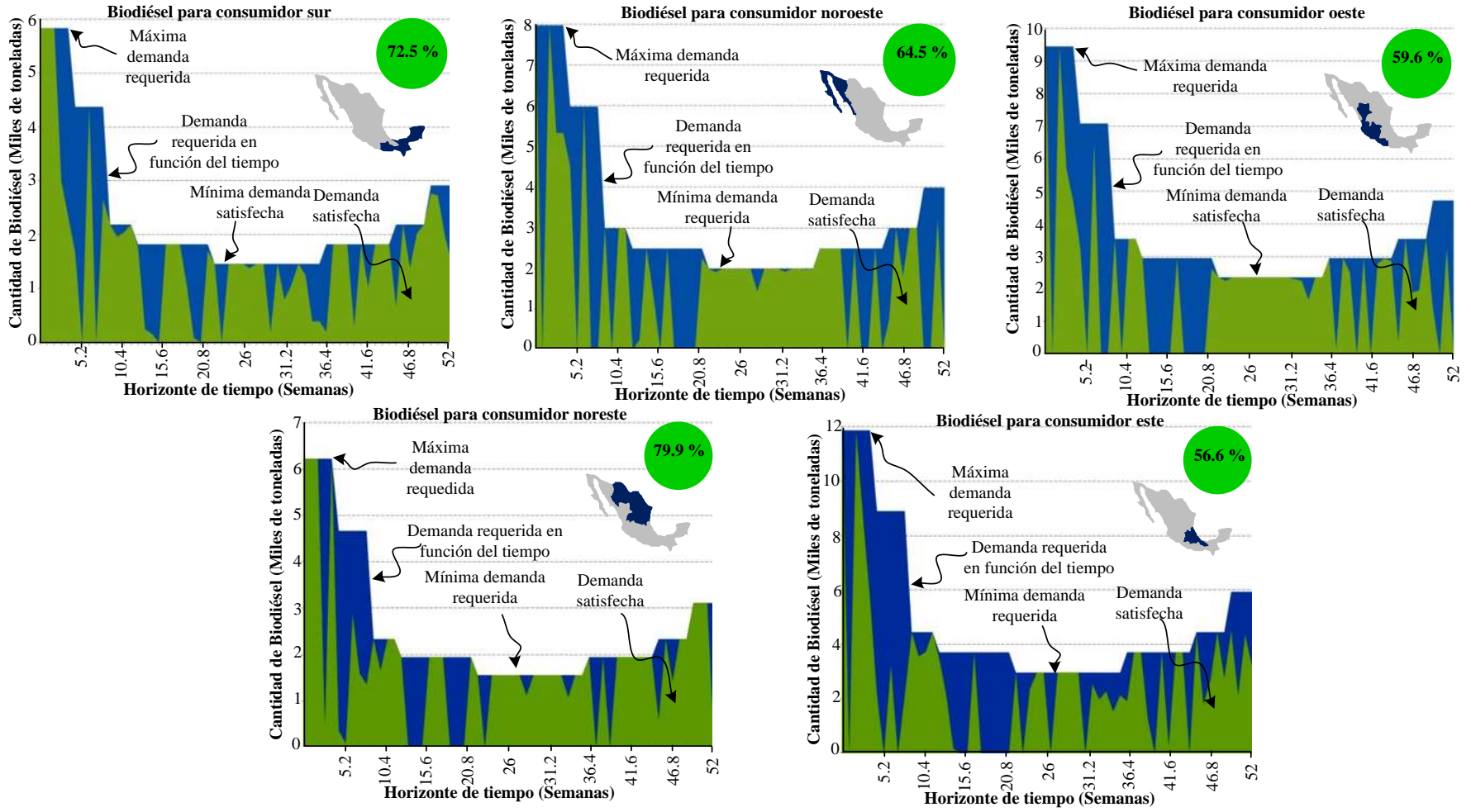


Figura 4.7 Demandas satisfecha y requerida de biodiésel en los centros de consumo.

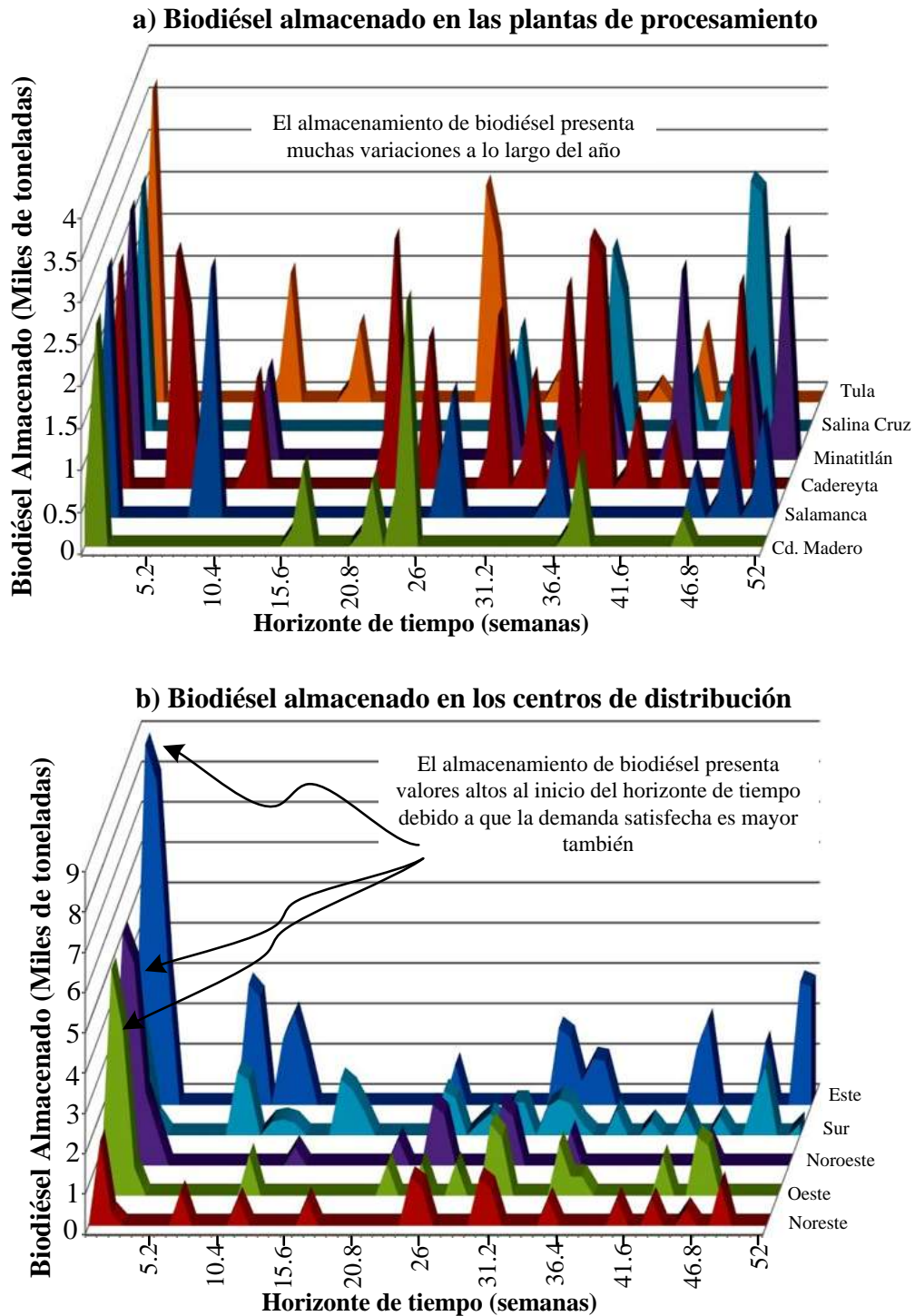


Figura 4.8 Nivel de inventario para el biodiésel en: a) Plantas de procesamiento. b) Centros de distribución.

4.2 Planificación bajo incertidumbre considerando aspectos económicos y ambientales

Primeramente, es necesario definir el caso de estudio utilizado con el fin de probar la metodología descrita en la sección 3.2. En este caso, se ha propuesto un caso de estudio para una cadena de suministro para procesamiento de biomasa en un contexto Nacional considerando la incertidumbre asociada al precio de la materia prima. El caso de estudio consiste de 6 centros de abastecimiento, 6 plantas de procesamiento, y 5 centros de consumo. También, 9 materias primas, 5 productos, 13 tecnologías de procesamiento para la primera etapa de procesamiento y 10 rutas de procesamiento para la segunda etapa de procesamiento, las cuales son opciones potenciales que la metodología propuesta puede seleccionar y son resumidas en la Tabla 4.3.

Así mismo, los valores para de conversión para las tecnologías de producción de biodiésel y etanol han sido reportadas por Santibañez-Aguilar y col. (2014); mientras los datos para las tecnologías de producción de xilitol fueron reportados en muchos otros trabajos; por ejemplo, los datos para la producción de xilitol a partir de glucosa vía fermentación fue reportado por Granström y col. (2007), mientras que mediante el uso de *C.moggi* se encuentran en Tochampa y col. (2005). También, datos a partir de revisiones bibliográficas extensas a partir de diversos microorganismos para obtener xilitol vía fermentación han sido expuestos por Chen y col. (2010). Los datos para producir biobutanol con celular inmovilizadas de *clostridium acetobutylicum* están reportados en Chen y col. (2013), y los datos para obtener biobutanol a través fermentación tipo ABE se encuentran en el trabajo de Jones y Woods (1986), en este caso Sukumaran y col. (2011) reportó información mejorada. Finalmente, los datos para la obtención ácido láctico por medio de lactobacilos fueron obtenidos a partir de Saha y Nakamura (2003).

Por otro lado, como se mencionó anteriormente, los parámetros inciertos son los precios de materia prima. Por lo tanto, la Tabla 4.4 muestra los precios de materia prima durante el periodo de 2002 a 2012. Además se presentan los límites superiores e inferiores para las distribuciones así como la desviación con respecto al valor base (dato para el año 2012); la cual es la desviación estándar para todos los periodos de tiempo dividido por el valor de referencia, con lo cual se generaron 100 escenarios por medio de Latin Hypercube Sampling

Tabla 4.3 Descripción para el caso de estudio












Localizaciones potenciales para los nodos de la cadena de suministro					
Abastecedores		Plantas de procesamiento		Consumidores	
Noroeste		Salamanca		Centro	
Sur		Cadereyta		Noreste	
Centro Oeste		Cd. Madero		Centro Oeste	
Noreste		Minatitlán		Noroeste	
Este		Salina Cruz		Sur	
Centro		Tula			
Materiales					
Materias Primas			Productos		
Astillas	Madera	Caña de azúcar	Bioetanol	Xilitol	Butanol
Maíz grano	Sorgo grano	Sorgo dulce	Biodiésel	Ácido láctico	
Palma africana	Jatropha	Cártamo			
Rutas de procesamiento para la primera etapa					
Pretratamiento, hidrólisis y fermentación		Pretratamiento, gasificación y biosíntesis		Pretratamiento, extracción y transesterificación	
Fermentación con acetobutylicum inmovilizado		Fermentación con acetobutylicum suspendido		Fermentación ABE	
Lactobacilos NRRL B-3693					
Rutas de procesamiento para la segunda etapa					
Fermentación con acetobutylicum inmovilizado		Fermentación con acetobutylicum suspendido		Fermentación ABE	
Lactobacilos-intermedius		Fermentación ácida			
NRRL B-3693					

Tabla 4.4 Datos históricos para los precios de materia prima, \$US/tonelada métrica

Año	Astillas de madera	Madera	Caña de azúcar	Maíz grano	Sorgo grano	Sorgo dulce	Palma africana	Jatropha	Cártamo
2002	28.59	57.19	50.57	240.63	123.52	27.78	21.89	43.43	184.21
2003	44.62	89.24	42.36	197.53	120.18	25.07	34.16	67.76	210.53
2004	36.59	73.19	38.29	190.60	117.74	25.73	28.02	55.58	208.61
2005	32.79	65.57	33.36	237.31	109.83	27.14	25.11	49.80	207.12
2006	38.54	77.09	47.24	199.92	143.55	28.53	29.51	58.54	214.40
2007	70.09	140.18	34.90	242.58	176.09	30.80	53.67	106.45	216.10
2008	53.97	107.93	57.95	261.30	207.36	37.98	41.32	81.96	332.57
2009	53.40	106.79	38.97	211.26	159.96	29.17	40.89	81.10	310.91
2010	80.06	160.13	52.36	245.90	179.73	34.81	61.31	121.60	343.97
2011	88.87	177.74	47.79	295.01	277.60	40.08	68.05	134.97	449.91
2012	86.60	173.20	58.23	357.57	259.12	39.84	66.31	131.52	459.59
%Desv Valor base	25.58	25.58	14.99	13.67	22.12	14.16	25.58	25.58	21.91
Límite superior	108.75	217.50	66.96	406.44	316.43	45.48	83.27	165.16	560.30
Límite inferior	64.45	128.90	49.50	308.70	201.81	34.20	49.35	97.88	358.88

La Figura 4.9 ilustra que los escenarios son distribuidos uniformemente en un intervalo dado para los precios de la materia prima. Esta afirmación es reforzada por medio de la diagonal de dicha figura, ya que se presentan los histogramas para los precios de las distintas materias primas. Es importante mencionar que la distribución uniforme permite observar el efecto de la incertidumbre en el precio de materia prima en un espacio de búsqueda más representativo aunque es posible obtener combinaciones con una baja probabilidad de ocurrencia. Finalmente, es posible observar que el número de escenarios ha sido adecuado para las materias primas propuestas y no ha sido incluida ninguna correlación para la generación de los escenarios.

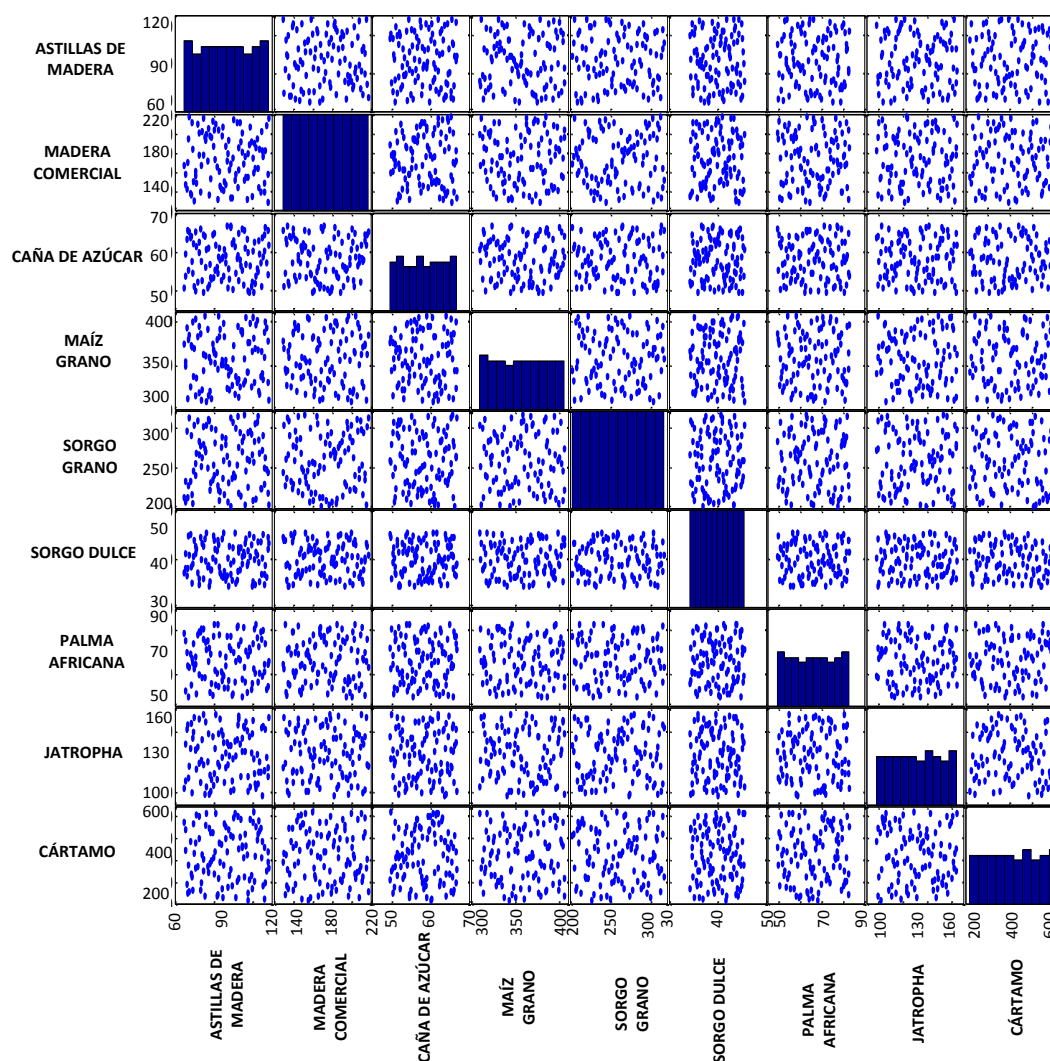


Figura 4.9 Distribución de los precios de la materia prima para el caso descrito en la sección 3.2

Ahora bien, el modelo para la planificación bajo incertidumbre fue resuelto usando una computadora con un procesador Intel Core i7-4700MQ a 2.40 GHz con 24 GB de RAM. Cada escenario genera un problema de programación mixto entero lineal y el tiempo promedio para obtener la solución de cada problema mixto entero lineal fue 12 minutos. Por otro lado, el análisis estadístico de las soluciones fue de 70 minutos (considerando la solución de 100 escenarios). Cada uno de los problemas mixto entero lineales consiste de 1,152,679 restricciones, 779,791 variables continuas y 200,660 variables binarias.

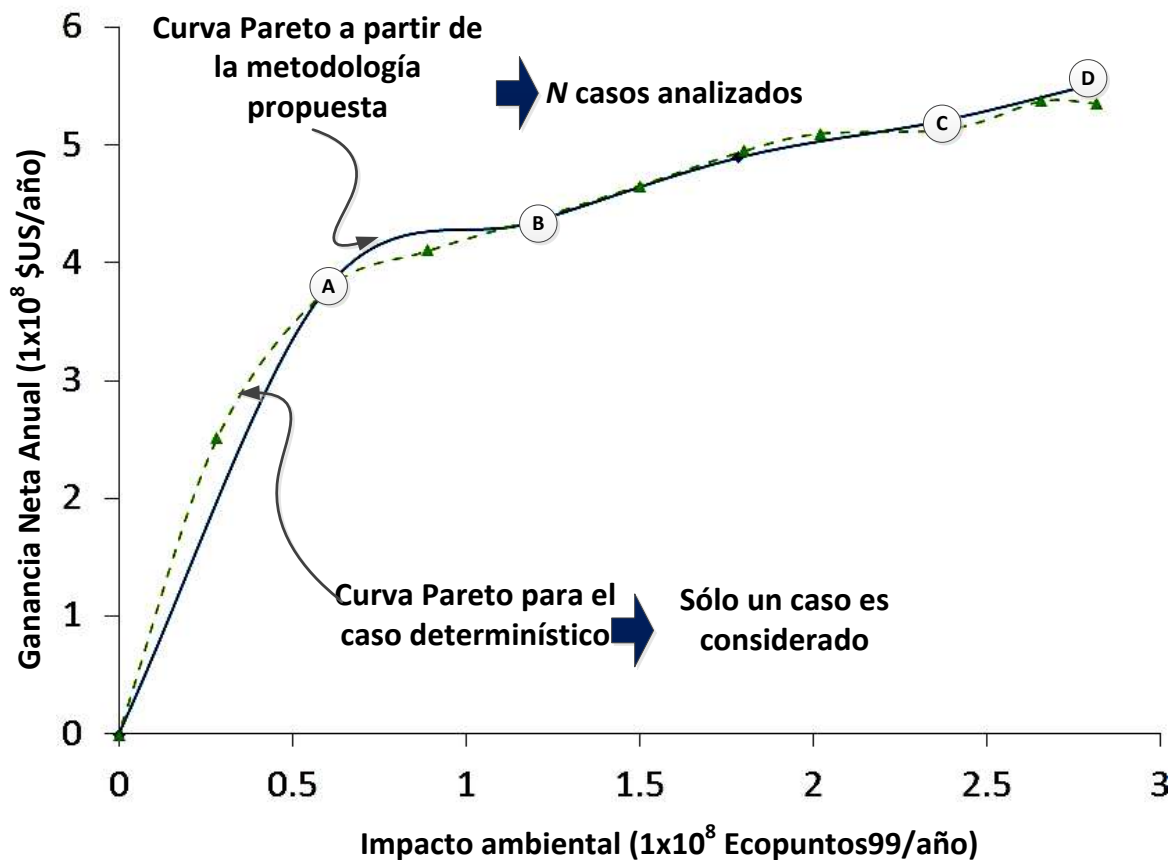


Figura 4.10 Curva Pareto entre el objetivo económico y ambiental

La curva Pareto para los objetivos económico y ambiental es mostrada en la Figura 4.10. Cabe destacar que cada punto considera la topología más flexible de la cadena de suministro con respecto a 100 escenarios; la cual es seleccionada acorde con el método propuesto. Adicionalmente, con la finalidad de explicar el comportamiento de la curva Pareto se seleccionaron varios puntos y es posible distinguir dos regiones en la curva Pareto. En la primera

región, el impacto ambiental no incrementa significativamente pero el objetivo económico aumenta desde 0 a 400 millones \$US/año. La segunda zona ilustra que el objetivo económico cambia desde 400 millones \$US/año hasta casi 600 millones \$US/año, mientras el impacto ambiental varía desde 125 Millones de eco-puntos por año hasta 275 millones de eco-puntos por año. Además, la Figura 4.10 presenta el frente de Pareto para el caso determinístico (valores medios). Es importante resaltar que el comportamiento del caso determinístico y estocástico es muy similar en ambos casos; lo cual indica que la solución determinística (línea punteada) provee una buena aproximación para los objetivos económicos y ambiental. Sin embargo, la principal ventaja de la metodología propuesta en esta sección es la evaluación de N escenarios diferentes antes de reportar una solución para las funciones objetivos ya que la topología de la cadena de suministro a partir del caso determinístico es óptimo para un conjunto de datos específicos; no obstante, la solución determinística puede proveer soluciones pobres para otro conjunto de datos.

La Figura 4.11 presenta la topología de la cadena de valor para los puntos A y C de la curva Pareto. En este caso se observa que no existe ninguna diferencia en la macro-estructura en la cadena de suministro dado que son seleccionados los mismos centros de abastecimiento, plantas de procesamiento y regiones de consumo así como sus interconexiones.

Por otro lado, las materias primas para el biodiésel y el ácido láctico no fueron seleccionadas probablemente porque las variaciones en los precios de materias primas presentan valores altos y el sistema es incapaz de soportar dichas variaciones. También, puede observarse que la demanda de xilitol es casi satisfecha porque la demanda requerida es menor que la demanda de los otros productos y la cadena de suministro contempla la posibilidad de producir xilitol a partir de corrientes residuales provenientes de otras tecnologías de procesamiento. Adicionalmente, el principal efecto en el impacto ambiental es causado por el incremento de la producción de bioetanol y biodiésel ya que la demanda satisfecha de estos productos aumenta drásticamente desde el punto A al punto C.

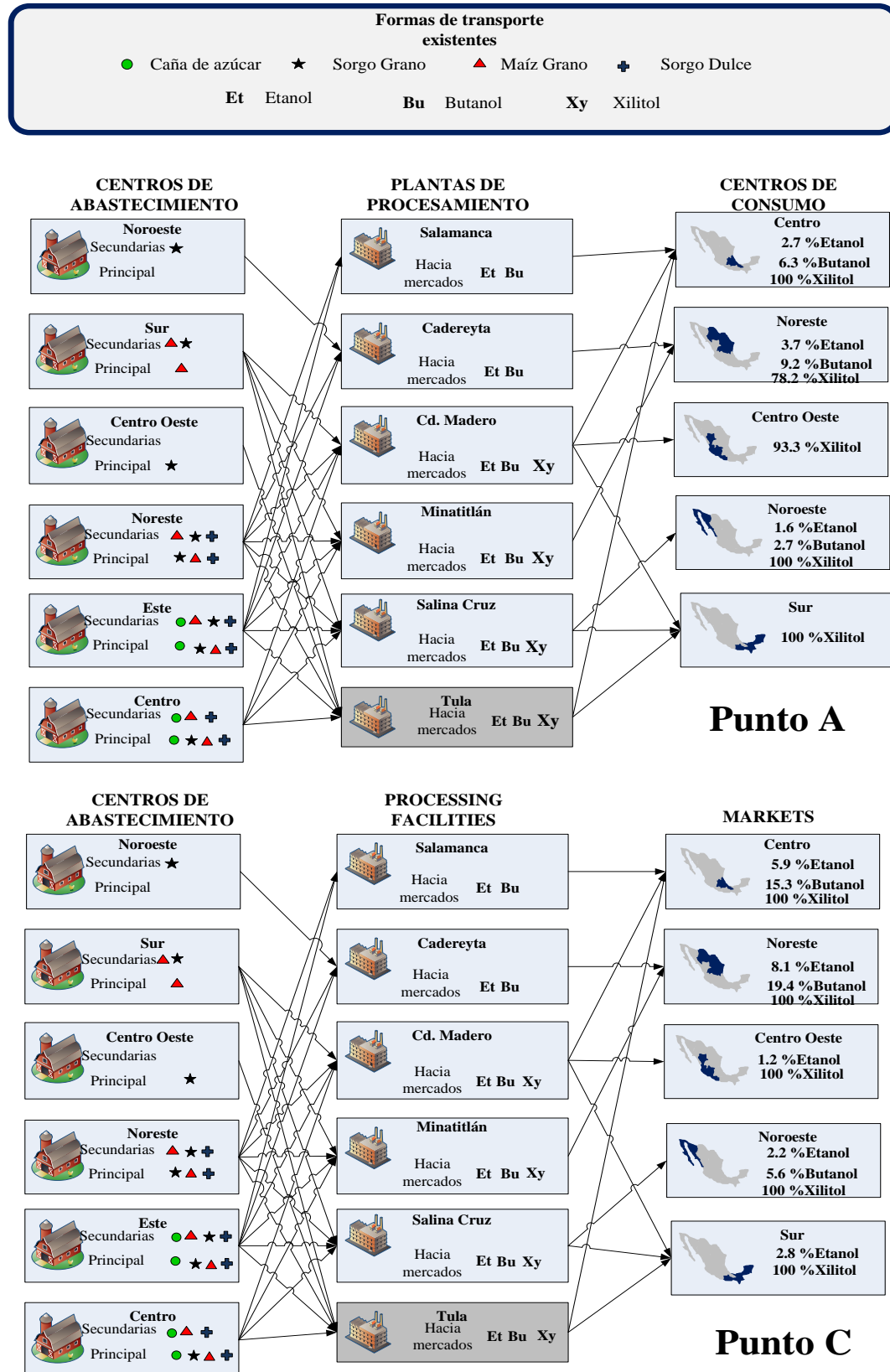


Figura 4.11 Macro estructura de la cadena de suministro para los puntos A y C de la Figura 4.10

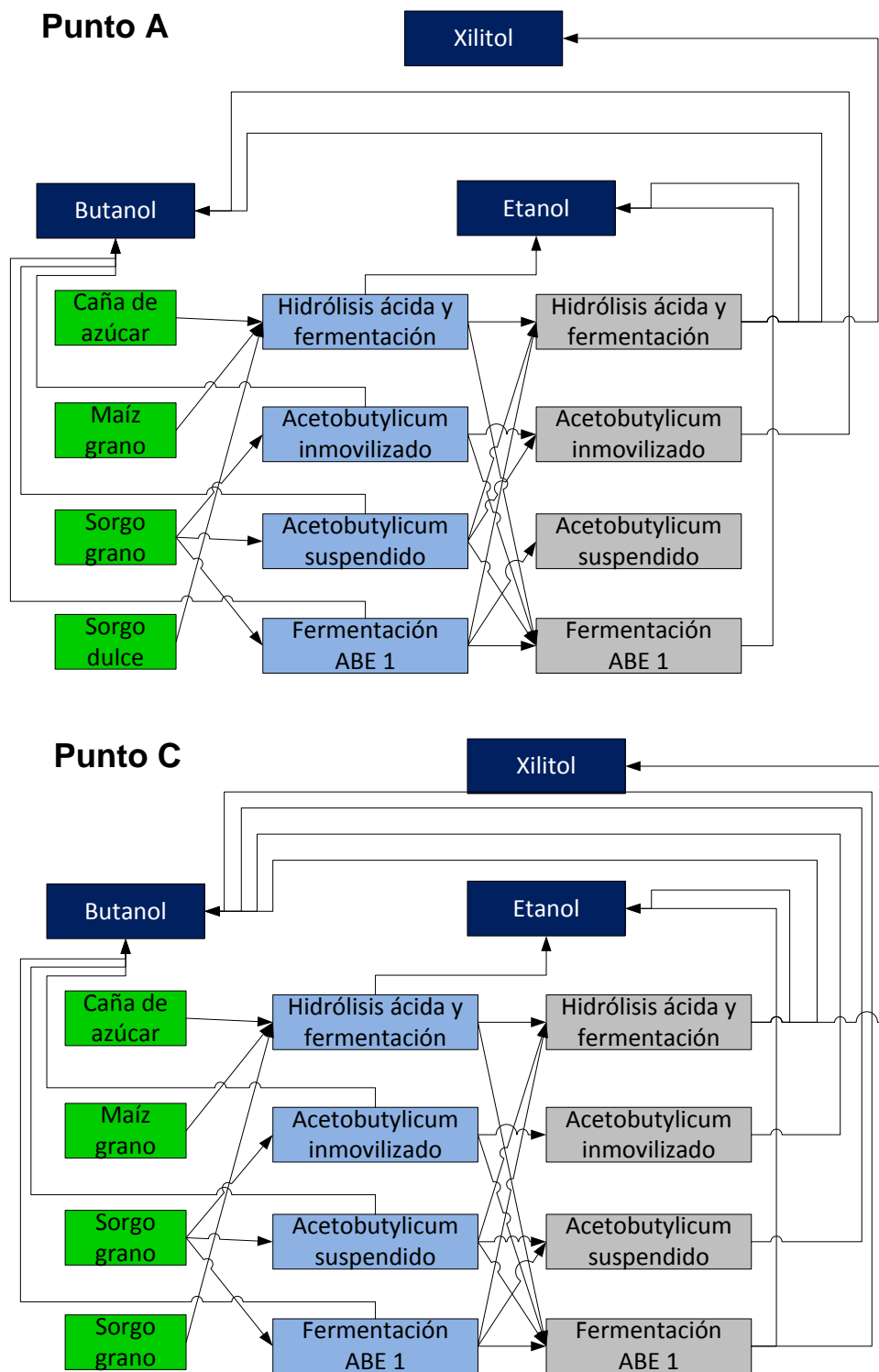


Figura 4.12 Configuración de las tecnologías de procesamiento para la planta localizada en Salamanca

En cambio, las tecnologías de procesamiento seleccionadas en el punto A y punto C presentan cambios importantes. En este sentido, la Figura 4.12 muestra la configuración de las tecnologías de procesamiento para la planta localizada en Salamanca. Esta figura ejemplifica que en el punto A, el butanol es producido vía tres tecnologías en la primera etapa y solo dos rutas en la segunda etapa, mientras la producción de butanol en el punto C es llevada a cabo a través de tres tecnologías en la primera etapa y cuatro en la segunda etapa. Asimismo, el etanol es obtenido a partir de una ruta en la primera etapa y dos rutas en la segunda etapa de procesamiento para ambos puntos. Esto indica que los cambios en las interconexiones entre las diferentes etapas de procesamiento provoca un incremento en las ganancias así como en el impacto ambiental.

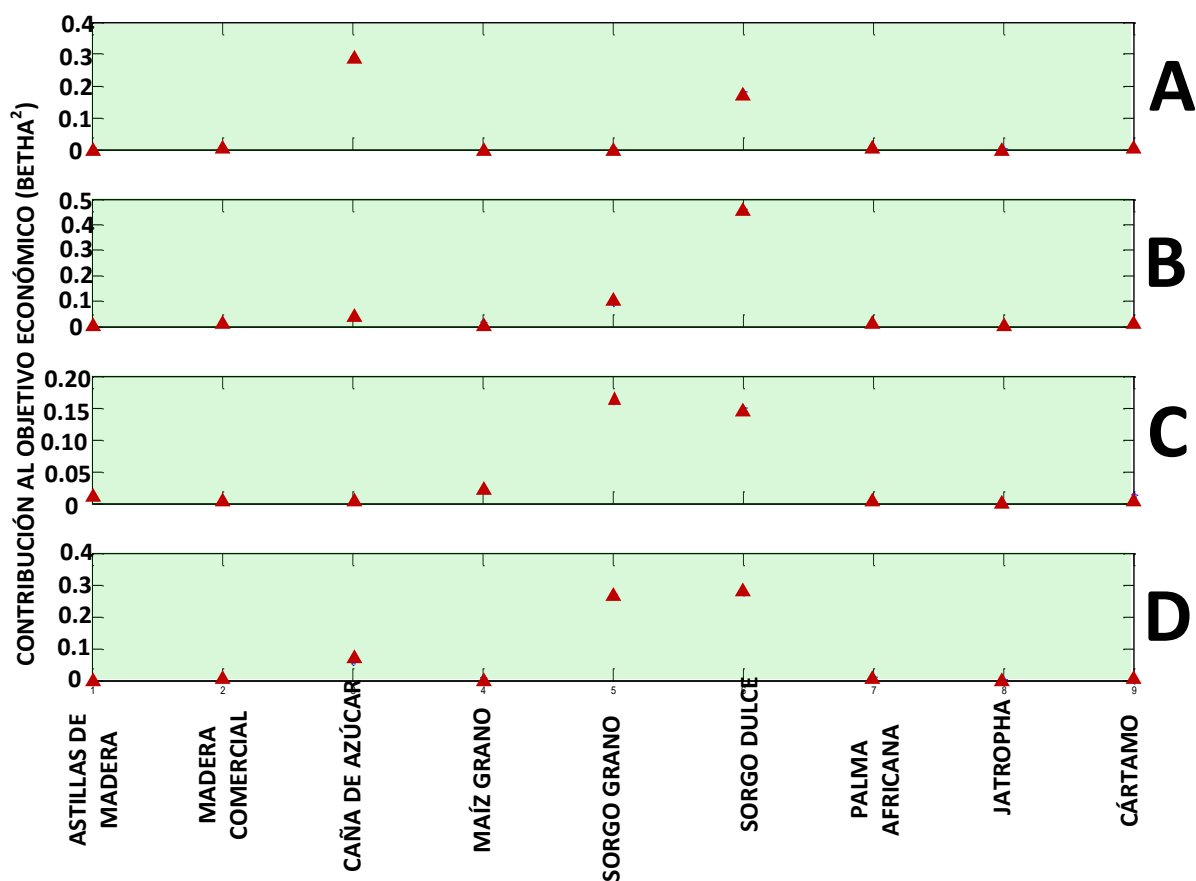


Figura 4.13 Dependencia del objetivo económico con respecto a los parámetros inciertos

La Figura 4.13 presenta la contribución de los diferentes precios inciertos de las materias primas a la función objetivo económica para los diversos puntos de la curva Pareto. El punto A

representa un punto con un bajo impacto ambiental y la principal contribución a la ganancia fueron los precios de la caña de azúcar y el sorgo dulce. Esto significa que las variaciones en el precio de estas materias primas afectan significativamente la función objetivo económica. Por tal razón, la selección de dichas materias primas en la cadena de suministro indica un mayor riesgo por la incertidumbre de estos parámetros. Igualmente, se observa que en los otros puntos, el precio del sorgo dulce tiene una contribución importante, aunque esta materia prima tiene un alto valor de conversión y es una de las más importantes materias primas en trabajos previos como los presentados por Santibañez-Aguilar y col. (2011) y (2014), las soluciones con este biorecurso representa un mayor riesgo ya que el sorgo dulce introduce una mayor incertidumbre al sistema. Es importante mencionar que, para todos los casos, el valor del factor es menor que 0.7, por lo que la ganancia neta anual no depende fuertemente de uno o dos tipos de materias primas; sin embargo, las materias primas si pueden cambiar el valor de la ganancia neta anual.

4.3 Evaluación del riesgo financiero en una cadena de suministro para la conversión de biomasa

En este caso, el modelo matemático fue aplicado a dos casos de estudios para un sistema de producción de biocombustibles en México. Ambos casos contemplan la incertidumbre asociada al precio de materias primas. Sin embargo, en el primero el precio de la materia prima es modelado por medio de una distribución basada en movimiento Browniano que asume que los parámetros están correlacionados. En el segundo caso, los parámetros inciertos siguen una distribución log-normal multi-variable correlacionada. Las dos distribuciones son basadas en información histórica tomada de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2014), con dichos datos se obtuvo el valor de la media y la varianza. Los casos de estudio suponen 9 materias primas, las cuales son producidas en 6 diferentes centros de abastecimiento, 4 rutas de procesamiento, 5 plantas de procesamiento secundarias y una planta de procesamiento central. Los productos contemplados son biodiésel y etanol con el fin de distribuirlos en 5 regiones de consumo; finalmente, al igual que los casos anteriores, se tiene un horizonte de 1 año.

4.3.1 Distribución de precio de materia prima sin correlación

La Figura 4.14 muestra la distribución para los precios de materia prima determinados por medio de movimiento Browniano. En este caso, no se considera ninguna correlación entre los diferentes parámetros.

La Tabla 4.5 presenta los valores del valor medio y desviación estándar suponiendo una distribución log-normal, para el precio de la materia prima a partir de información histórica. Dicha información es dada en la Tabla 4.4. También, se proporciona una predicción para el costo de materia prima para el año 2014 usado como año de referencia.

Tabla 4.5 Información estadística para distribución basada en movimiento Browniano

Variable	Astillas de madera	Madera comercial	Caña de azúcar	Maíz grano	Sorgo grano	Sorgo dulce	Palma africana	Jatropha	Cártamo
Media log normal	0.192	0.142	0.096	0.066	0.070	0.059	0.242	0.092	0.062
Desv log normal	0.290	0.290	0.302	0.177	0.202	0.139	0.290	0.290	0.152
2014	98.95	252.85	50.01	372.83	214.41	31.54	95.32	151.61	315.29

Igualmente a los casos anteriores, el modelo fue implementado en el lenguaje GAMS como un problema de programación mixto entero lineal y fue resuelto con el resolutor CPLEX. La formulación consta de 53,194 variables continuas, 18,320 variables binarias y 67,268 restricciones. El tiempo de solución fue aproximadamente de 17 a 29 segundos en una computadora con un procesador Intel Core i7-4700MQ a 2.4 GHz con 24 GB de RAM dependiendo del problema a ser resuelto.

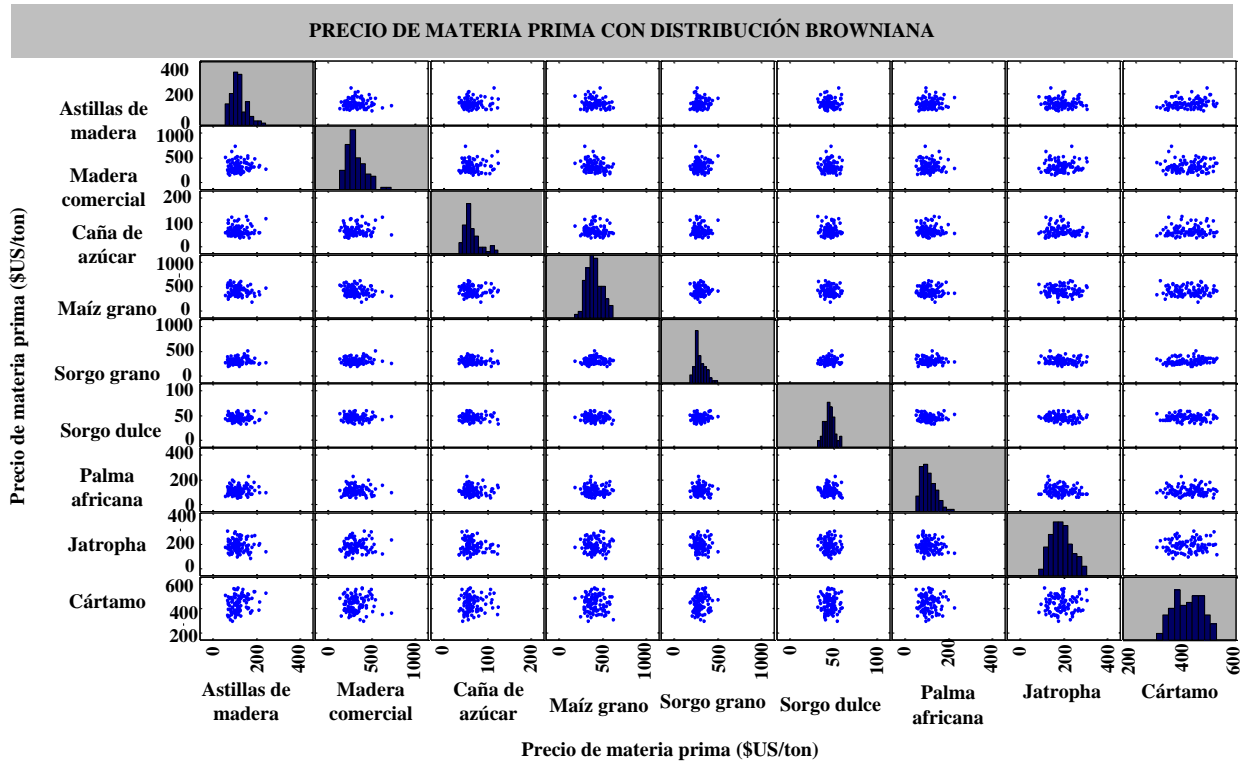


Figura 4.14 Distribución para el precio de materia prima vía movimiento Browniano

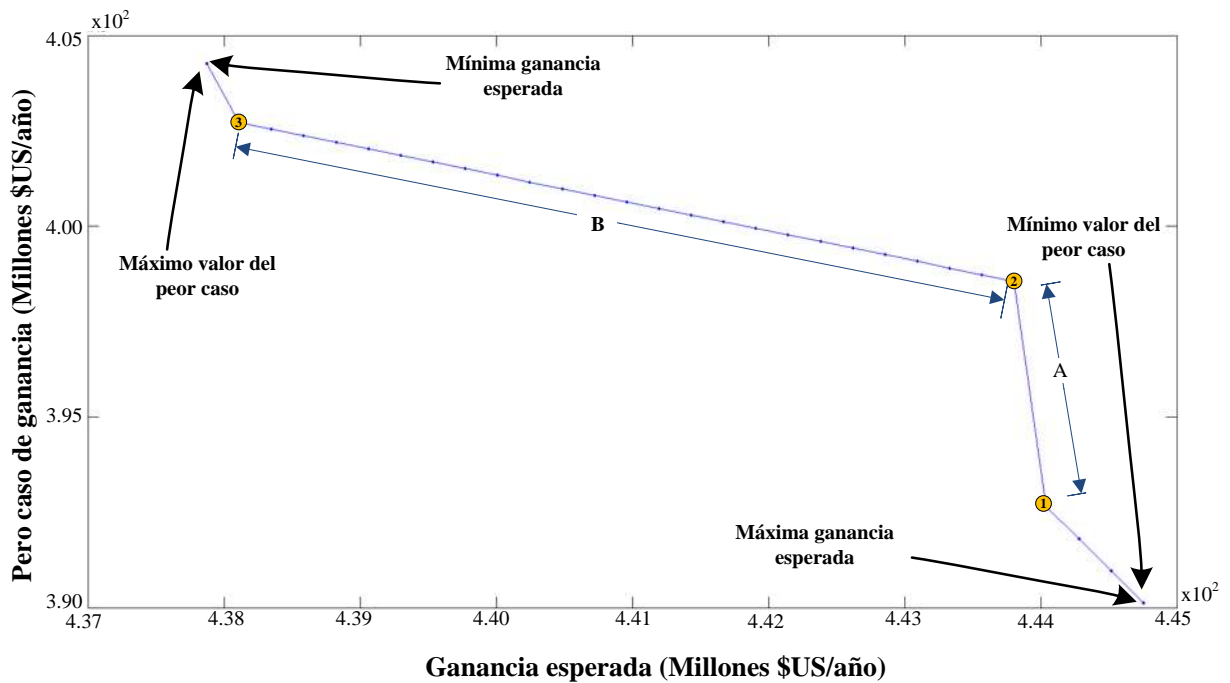


Figura 4.15 Curva Pareto para el riesgo económico asociado a la implementación de una cadena de suministro (distribución no correlacionada)

La Figura 4.15 muestra la curva Pareto formada por la contradicción entre la ganancia esperada y el peor valor de la ganancia. En esta figura se observa que los peores casos pueden ser mejorados a expensas de sacrificar el valor de la ganancia esperada. En la curva Pareto se identifican varias secciones. Cada punto de la Figura 4.15 representa una configuración diferente de la cadena de suministro y está asociado a una curva de riesgo (descrita más adelante en la presente sección).

Por otro lado, la Figura 4.16 exhibe las curvas de probabilidad acumulada para la distribución no correlacionada asociada a la solución con la máxima ganancia esperada, a la solución con el máximo peor caso para la ganancia. Además, la Figura 4.16 presenta una curva adicional como límite superior siendo construida para los puntos de máxima ganancia obtenida en cada uno de los escenarios al resolverlos separadamente. Cabe destacar que el límite superior no refleja una solución realista, no obstante es un caso ideal para una estrategia de este tipo de problemas y nos indica el máximo riesgo teórico. Por otro lado, es posible observar que la probabilidad de obtener al menos un valor específico de ganancia es diferente para cada solución. Para efectos de comparación, se han tomado tres valores objetivo de ganancias: 4.05×10^2 , 4.4×10^2 y 4.65×10^2 millones de \$US/año, para los cuales las probabilidades de conseguir una ganancia por debajo de estos valores son 5 %, 38 % y 90 % de acuerdo a la curva que representa el mayor riesgo, mientras las probabilidades cambian a 3 %, 54 % y 99 % para la curva con el menor riesgo, respectivamente. En otras palabras, existe una probabilidad mayor de obtener una alta ganancia con la solución más riesgosa; pero la probabilidad de obtener un bajo valor de ganancia con la solución de mayor riesgo es más alta también.

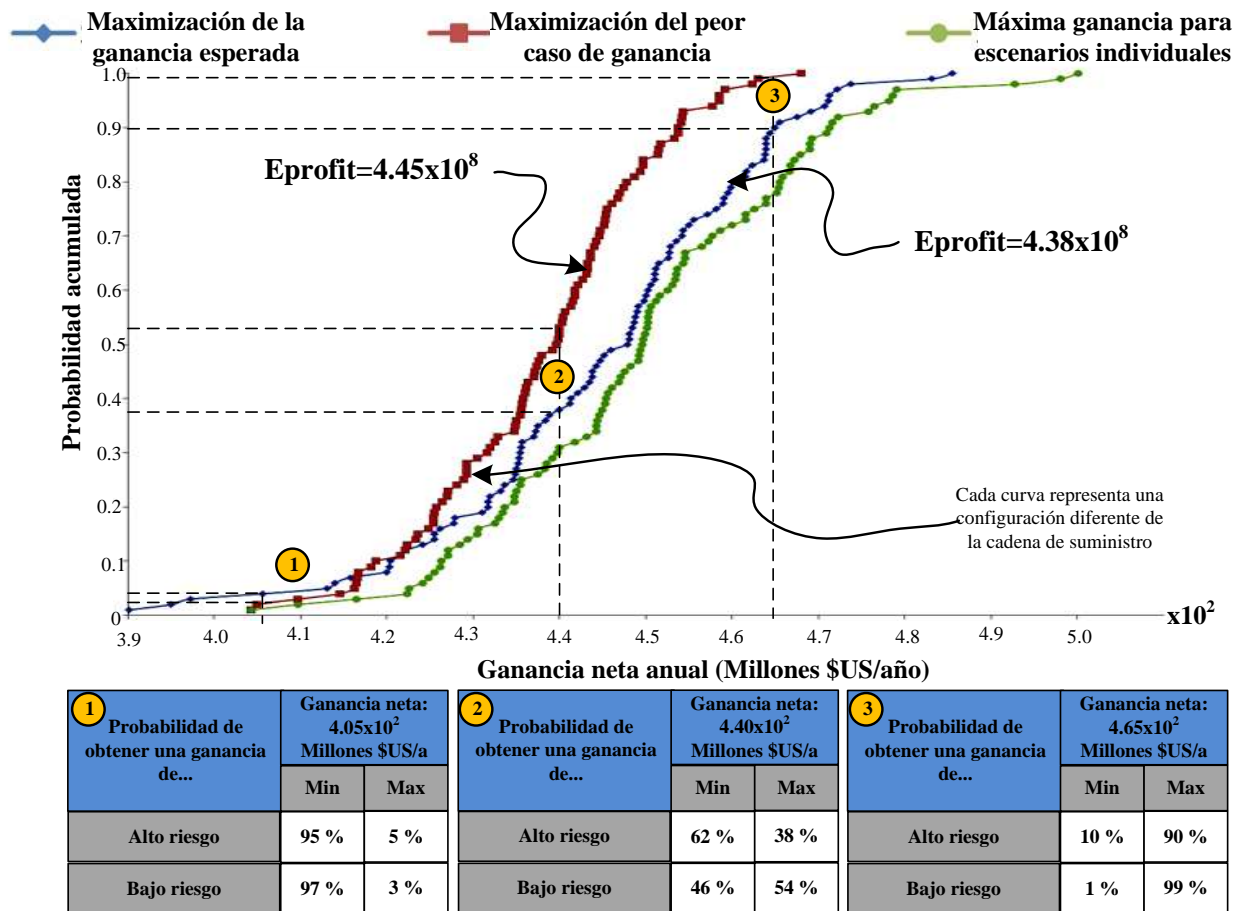


Figure 4.16 Curvas de probabilidad acumulada para la distribución no correlacionada

La Figura 4.17 presenta los valores para ganancia neta anual para cada escenario para las soluciones con mayor y menor riesgo. Es posible observar que los valores máximos de la ganancia son dados en el escenario 97, mientras las mínimas ganancias son dados en el escenario 77 para ambos casos (mayor y menor riesgo). Para la solución con más alto riesgo, el valor de la máxima ganancia es igual a 4.86×10^2 Millones de \$US/año, el peor valor de ganancia es igual a 3.90×10^2 Millones de \$US/año y la ganancia esperada es igual a 4.45×10^2 Millones de \$US/año; mientras la solución para el mínimo riesgo presenta una máxima ganancia igual a 4.68×10^2 Millones de \$US/año, el peor caso para la ganancia es igual a 4.04×10^2 Millones de \$US/año y la ganancia esperada es igual a 4.38×10^2 Millones de \$US/año. Cabe destacar que las Figuras 4.17a y 4.17b muestran que el mejor valor de la ganancia en la maximización de la ganancia esperada es superior al mejor valor de la ganancia en la maximización del peor caso; sin embargo, el peor valor de ganancia en la Figura 4.17a es menor que el peor valor de la ganancia en la Figura 4.17b.

Por otro lado, la Figura 4.18 provee los histogramas de frecuencia para la ganancia neta anual para los diferentes casos analizados.

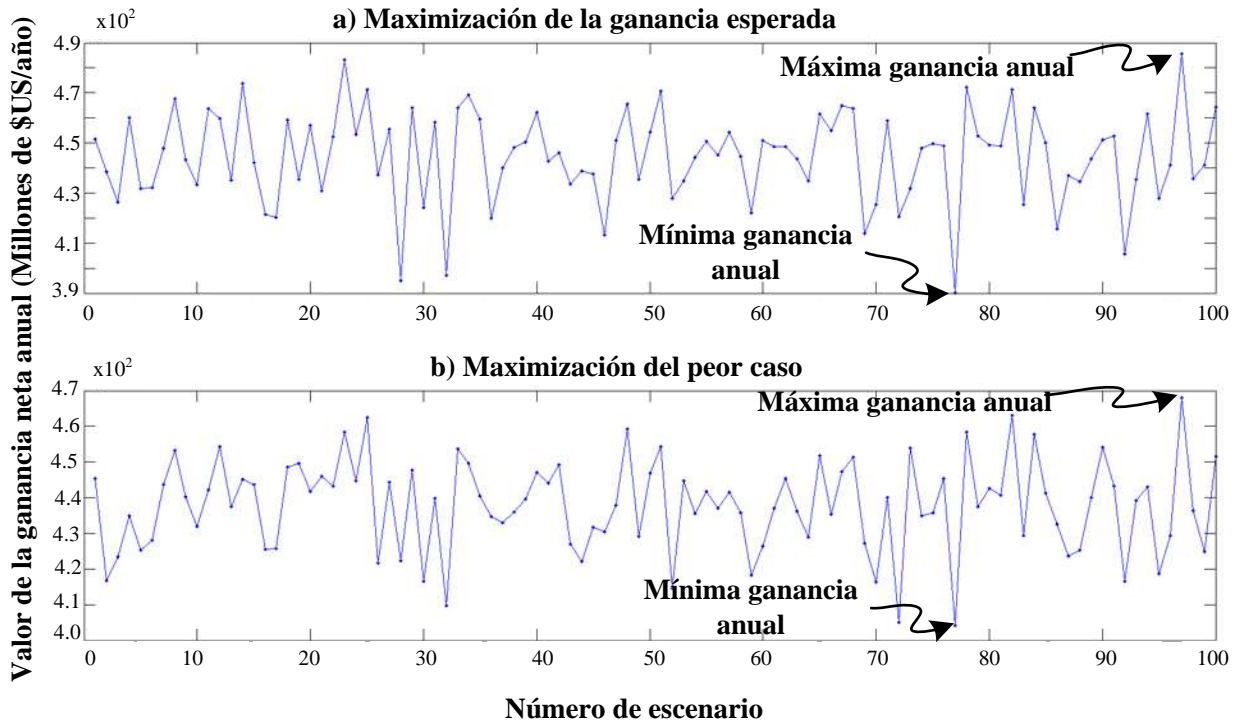


Figura 4.17 Ganancia neta anual para cada escenario para las soluciones con mayor y menor riesgo para la distribución no correlacionada

La Tabla 4.6 proporciona los precios de materia prima para los dos escenarios clave (77 y 97) así como información respecto a los valores mínimo, máximo y medio para dichos precios. En este sentido, el escenario 97 tiene un precio de caña de azúcar significativamente superior que el valor medio. Por otro lado, el escenario 77 presenta un precio de caña muy por debajo del valor medio, además, el precio de la jatopha es cercano al valor medio y el precio de sorgo dulce se encuentra por encima del valor medio. Es importante mencionar, que las soluciones producidas por el modelo selecciona estas materias primas dentro de la configuración (ver Figuras 4.19 y 4.20) probablemente porque el precio de la jatopha es menor que el valor medio en el escenario 97 y sólo 5.05 % superior mayor en el escenario 77; mientras las otras materias primas usadas para producir biodiésel son desde 22.77 % (cártamo) a 63.39 % (palma africana) superiores a los valores medios. El mismo comportamiento ocurre con la caña de azúcar.

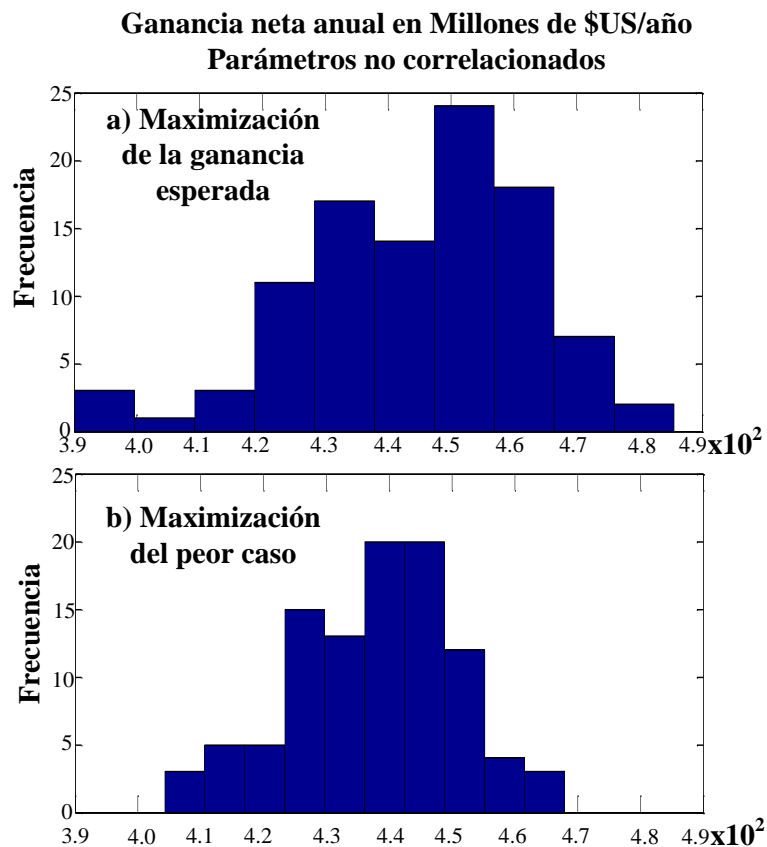


Figure 4.18 Histograma de frecuencia para la ganancia neta anual para las soluciones con el mayor y menor riesgo para la distribución no correlacionada

Adicionalmente, la Figura 4.194 muestra la configuración de la cadena de suministro para las soluciones con las máximas ganancias esperadas. Es importante observar que el centro de abastecimiento de la región noroeste no es seleccionado en ningún caso debido a que dicha región se encuentra localizada a una distancia muy grande de los otros centros de suministro y puede incrementar los costos de transporte significativamente. También, se debe notar que el biodiésel es producido mayoritariamente con *jatropha* y sólo en las plantas localizadas en Salamanca y Tula, principalmente porque estas plantas de procesamiento están ubicadas en la región centro del país y por tanto el biodiésel puede ser distribuido fácilmente a las diferentes consumidores. En cuanto a las materias primas para la producción de etanol son la caña de azúcar y sorgo dulce.

Tabla 4.6 Precio de materias primas para los escenarios con las soluciones de mayor y menor riesgo con la mayor y menor ganancia para la distribución no correlacionada

	Escenario 77		Escenario 97		Valor mínimo \$US/t	Valor medio \$US/t	Valor máximo \$US/t
	Valor \$US/t	% desv a media	Valor \$US/t	% desv a media			
Astillas de madera	189.91	60.01	71.18	-40.03	58.73	118.69	244.09
Madera comercial	307.70	-4.26	430.97	34.10	138.80	321.38	730.49
Caña de azúcar	52.66	-18.96	97.03	49.33	34.76	64.98	125.28
Maíz grano	356.73	-12.16	378.79	-6.73	179.16	406.13	620.77
Sorgo grano	265.75	-10.74	303.12	1.81	184.79	297.73	500.20
Sorgo dulce	59.10	29.17	50.37	10.10	32.11	45.75	60.04
Palma africana	179.74	63.39	71.88	-34.66	50.46	110.01	228.73
Jatropha	199.28	5.05	164.25	-13.42	86.70	189.70	308.06
Cártamo	539.31	22.77	497.16	13.18	296.24	439.28	570.67

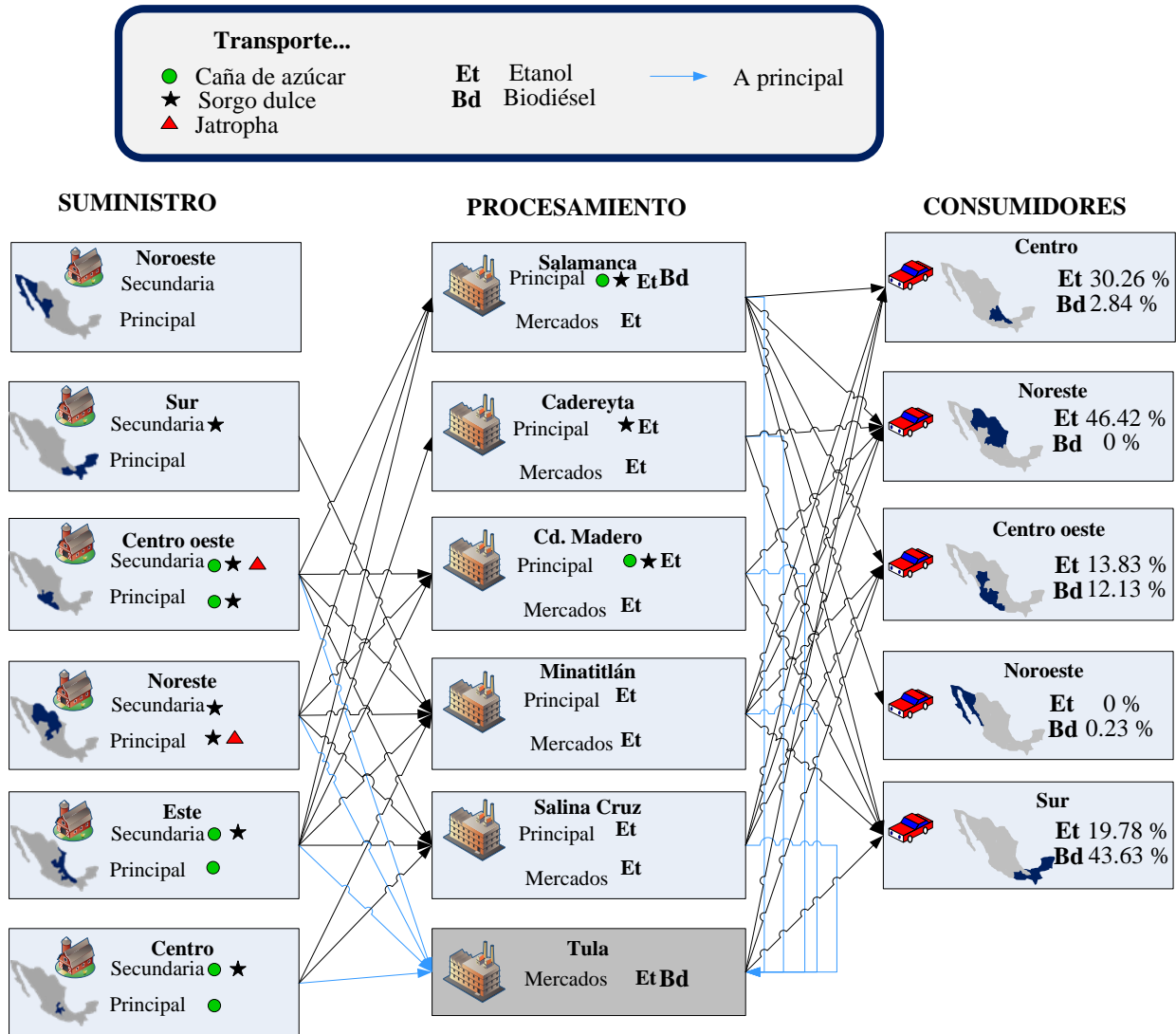


Figure 4.19 Configuración de la cadena de suministro para la solución con mayor riesgo para los parámetros no correlacionados

Por otro lado, la configuración para la cadena de suministro para la solución con el máximo valor del peor caso es dada en la Figura 4.20. Similarmente, el centro de abastecimiento de la región noroeste no es seleccionado. Una de las principales diferencias es que no existe producción de biodiésel en ninguna planta de procesamiento. Adicionalmente, algunas de las interconexiones de la cadena de valor cambian. Por ejemplo, en la configuración de la Figura 4.20 no existe transporte de caña de azúcar a partir de la región noreste, y la planta localizada en Salina Cruz no distribuye ningún producto a los consumidores de la región sur.

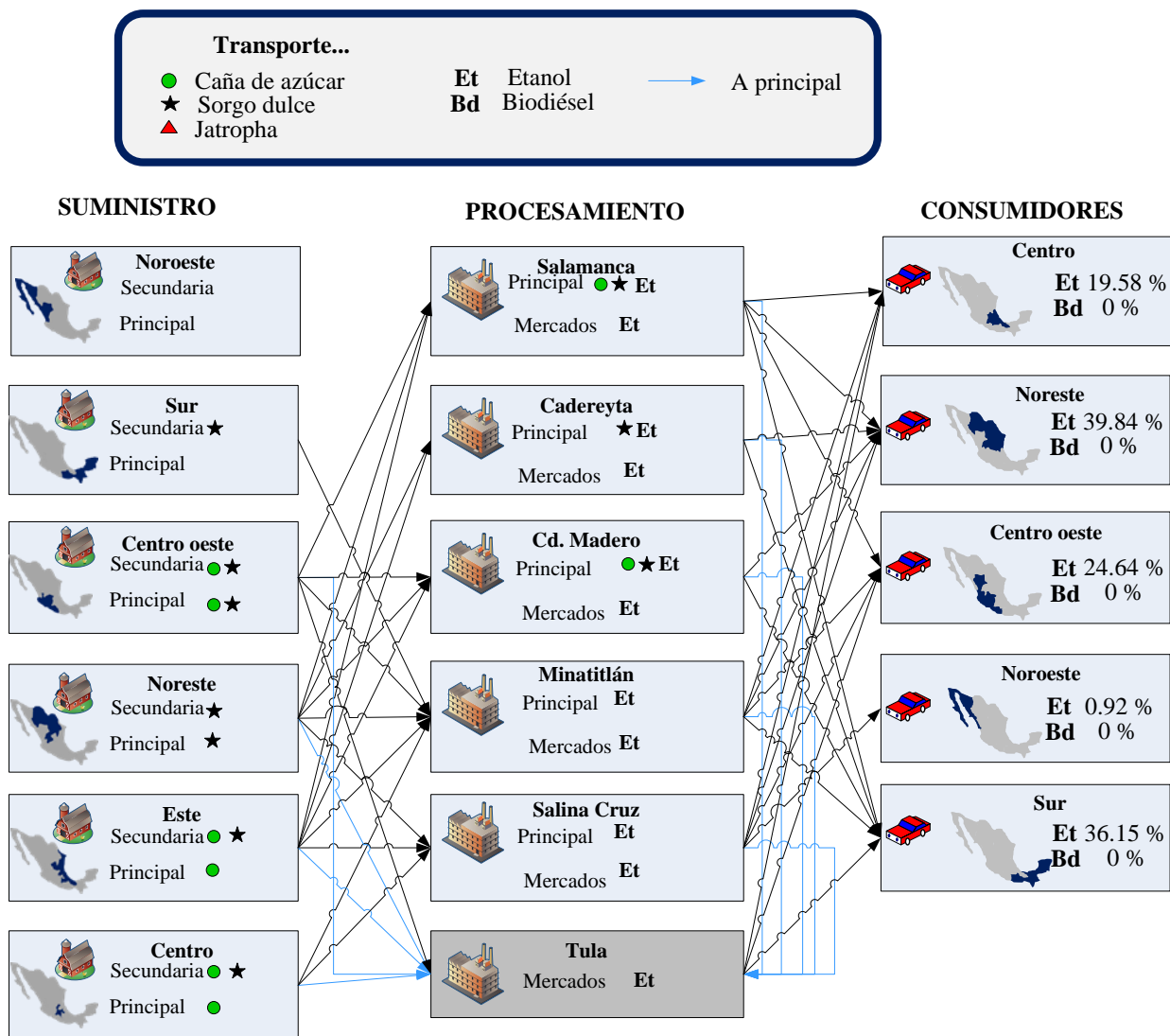


Figura 4.20 Configuración de la cadena de suministro para la solución con el menor riesgo para los parámetros no correlacionados

La Tabla 4.7 reporta los datos para la demanda satisfecha en las regiones de consumo, con lo cual se observa que la demanda satisfecha cambia drásticamente entre las soluciones extremas. En este sentido, es posible notar el caso donde el riesgo es minimizado no existe producción de biodiésel y por lo tanto la demanda satisfecha de dicho producto es 0 %. Conjuntamente, la cantidad de etanol producida disminuye para las zonas de consumo centro y noreste; las cuales contienen dos de las tres ciudades más grandes en México. Por otro lado, la cantidad de etanol distribuida a los mercados centro occidente, noroeste y sur es mayor en la solución con el mayor riesgo.

Tabla 4.7 Porcentaje de demanda satisfecha de los productos para distribución no correlacionada para las soluciones con mayor y menor riesgo

Producto	Consumidor	Demanda	Alto riesgo	Bajo riesgo
		requerida x10 ⁶ Ton	% Satisfecha	% Satisfecha
Etanol	Centro	1.21	30.26	19.58
	Noreste	0.54	46.42	39.84
	Centro oeste	0.76	13.83	24.64
	Noroeste	0.64	0.00	0.92
	Sur	0.47	19.78	36.15
Biodiésel	Centro	0.26	2.84	0.00
	Noreste	0.13	0.00	0.00
	Centro oeste	0.20	12.14	0.00
	Noroeste	0.17	0.23	0.00
	Sur	0.13	43.63	0.00

Respecto a la cantidad utilizada de materia prima, la Tabla 4.8 muestra las cantidades y porcentajes para la máxima disponibilidad de materia prima usada en la cadena de suministro para ambos casos. Es importante destacar que la principal materia prima para producir etanol es el sorgo dulce, debido a que su precio es casi constante y es más económico respecto a las otras materias primas. Asimismo, la jatropha es usada para producir biodiésel, no obstante que esta materia prima tiene alta variabilidad, porque ésta es más barata que la palma africana o el sorgo.

Tabla 4.8 Cantidad de biomasa utilizada para las soluciones con el mayor y el menor riesgo

(Caso no correlacionado)

	Materias primas	Abastecimiento	Cantidad usada (x10⁶ ton)	Máxima disponible (x10⁶ ton)	% Utilizada
Solución con mayor riesgo	Caña de azúcar	Centro oeste	0.02	8.39	0.29
	Caña de azúcar	Este	0.40	27.12	1.46
	Caña de azúcar	Centro	0.21	1.87	11.23
	Sorgo dulce	Sur	0.01	0.01	100.00
	Sorgo dulce	Centro oeste	0.36	1.00	36.33
	Sorgo dulce	Noreste	0.35	1.65	21.38
	Sorgo dulce	Este	0.05	0.05	100.00
	Sorgo dulce	Centro	0.02	0.02	100.00
	Jatropha	Centro oeste	0.12	0.53	22.50
	Jatropha	Noreste	0.15	0.53	28.12
Solución con menor riesgo	Caña de azúcar	Centro oeste	0.02	8.39	0.29
	Caña de azúcar	Este	0.40	27.12	1.46
	Caña de azúcar	Centro	0.21	1.87	11.23
	Sorgo dulce	Sur	0.01	0.01	100.00
	Sorgo dulce	Centro oeste	0.36	1.00	36.33
	Sorgo dulce	Noreste	0.35	1.65	21.38
	Sorgo dulce	Este	0.05	0.05	100.00
	Sorgo dulce	Centro	0.02	0.02	100.00

4.3.2 Distribución de precio de materia prima con correlación

En cuanto al uso de una distribución correlacionada para el segundo caso de estudio, la Figura 4.21 ilustra la distribución para los distintos precios de la materia prima, en este caso se observa una correlación, donde los factores de correlación fueron determinados con los datos históricos de la Tabla 4.4. En este caso, es importante mencionar que el movimiento Browniano

sigue una distribución log-normal para la razón del precio de materia prima en dos periodos diferentes de tiempo, donde uno de ellos se toma como periodo de referencia. Por esta razón, la correlación fue basada en la razón del precio de materia prima para dos periodos de tiempo considerando un precio de referencia con el fin de comparar ambas distribuciones. En este sentido, la Tabla 4.9 presenta la matriz de correlación utilizada para obtener la distribución correlacionada. Cabe notar que existen factores de correlación positivos y negativos, lo cual indica que las correlaciones entre precios de materia prima son directa e inversamente proporcionales.

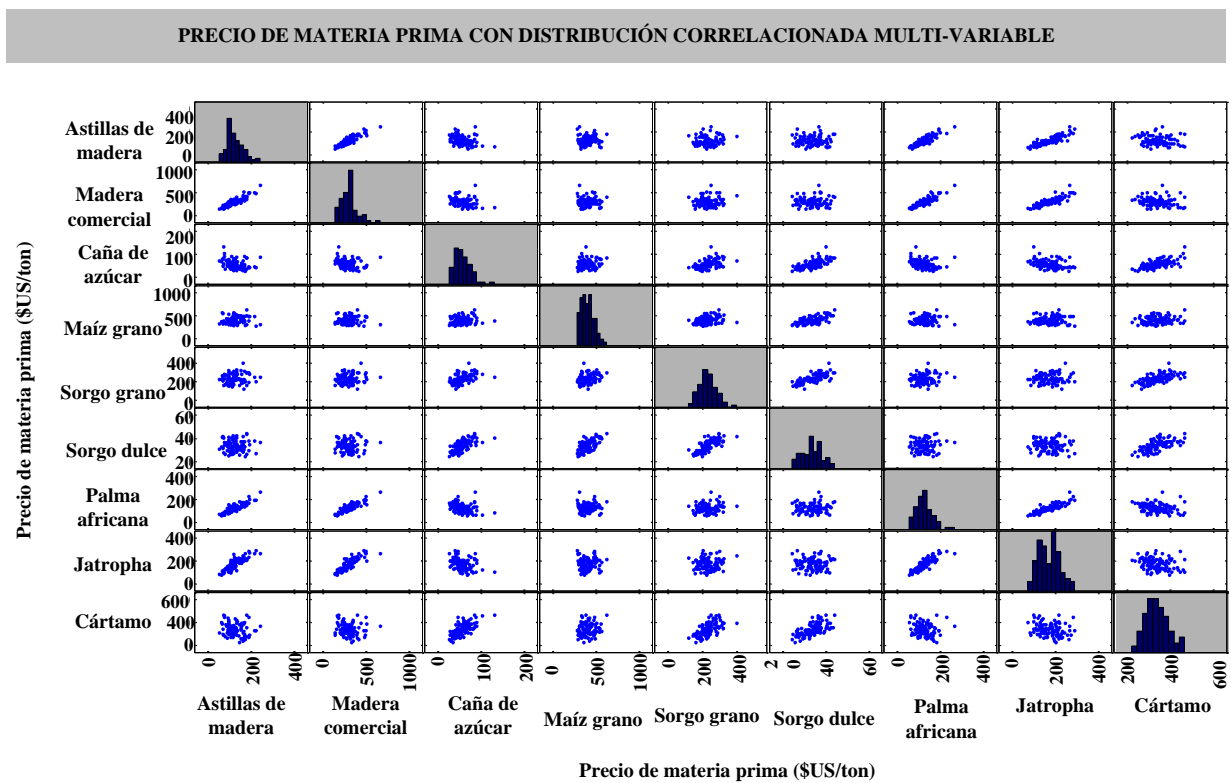


Figura 4.21 Distribución del precio de materia prima a través de una distribución log-normal correlacionada

Tabla 4.9 Matriz de correlación para la distribución correlaciona

	Astillas de madera	Madera	Caña de azúcar	Maíz grano	Sorgo grano	Sorgo dulce	Palma africana	Jatropha	Cártamo
1	1.00	0.90	-0.27	0.04	0.23	-0.01	0.90	0.90	-0.20
2	0.90	1.00	-0.27	0.04	0.23	-0.01	0.90	0.90	-0.20
3	-0.27	-0.27	1.00	0.09	0.30	0.64	-0.27	-0.27	0.59
4	0.04	0.04	0.09	1.00	0.30	0.62	0.04	0.04	0.16
5	0.23	0.23	0.30	0.30	1.00	0.68	0.23	0.23	0.52
6	-0.01	-0.01	0.64	0.62	0.68	1.00	-0.01	-0.01	0.64
7	0.90	0.90	-0.27	0.04	0.23	-0.01	1.00	0.90	-0.20
8	0.90	0.90	-0.27	0.04	0.23	-0.01	0.90	1.00	-0.20
9	-0.20	-0.20	0.59	0.16	0.52	0.64	-0.20	-0.20	1.00

Similarmente al caso de parámetros no correlacionados, el modelo fue implementado en GAMS como un problema de programación mixto entero lineal y fue resuelto con el resolvidor CPLEX. Sin embargo, en este caso, el rango para el tiempo de solución oscila entre 90 a 150 segundos en una computadora con las mismas características que la utilizada en el caso de la distribución no correlacionada.

La curva Pareto asociada al peor valor de ganancia y la ganancia esperada para el caso de datos correlacionados es presentada en la Figura 4.22. Igualmente, es posible identificar varias secciones a lo largo de la curva Pareto. La sección A es ubicada entre los puntos 1 y 2; la principal diferencia entre estos puntos es que las interconexiones entre las plantas de procesamiento y mercados para el etanol cambia drásticamente en ésta sección; asimismo la producción de biodiésel disminuye en el punto 2 respecto al punto 1. Por otro lado, la sección C es caracterizada por un incremento en la producción de etanol en las plantas secundarias de procesamiento, mientras se observa un decremento de la misma en la planta de procesamiento principal, es importante mencionar que no existe producción de biodiésel en el punto 4 aunque se usan más tipos de materia prima para producir el etanol.

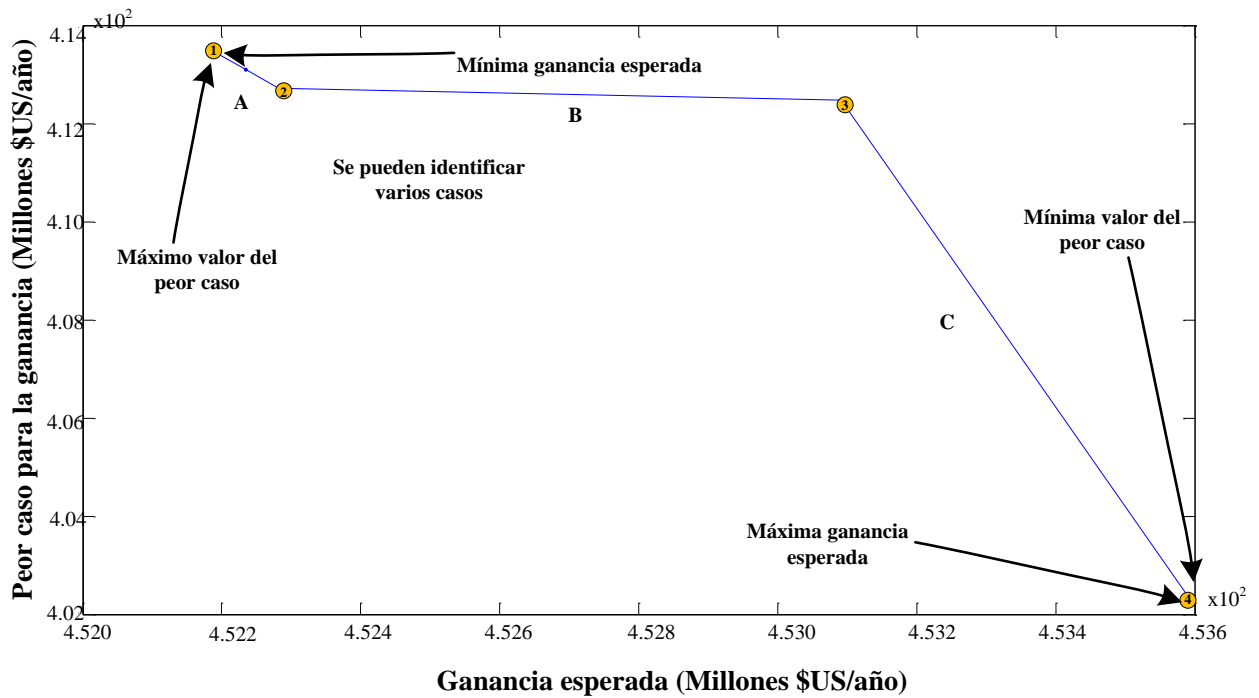


Figura 4.22 Curva Pareto para el riesgo económico asociado a la implementación de una cadena de suministro (distribución correlacionada)

La Figura 4.23 corresponde a las curvas de probabilidad acumulada y la ganancia neta anual cuando se maximiza la ganancia esperada y se maximiza el peor valor de ganancia, de la misma manera se incluye una curva generada con las ganancias óptimas de cada uno de los escenarios

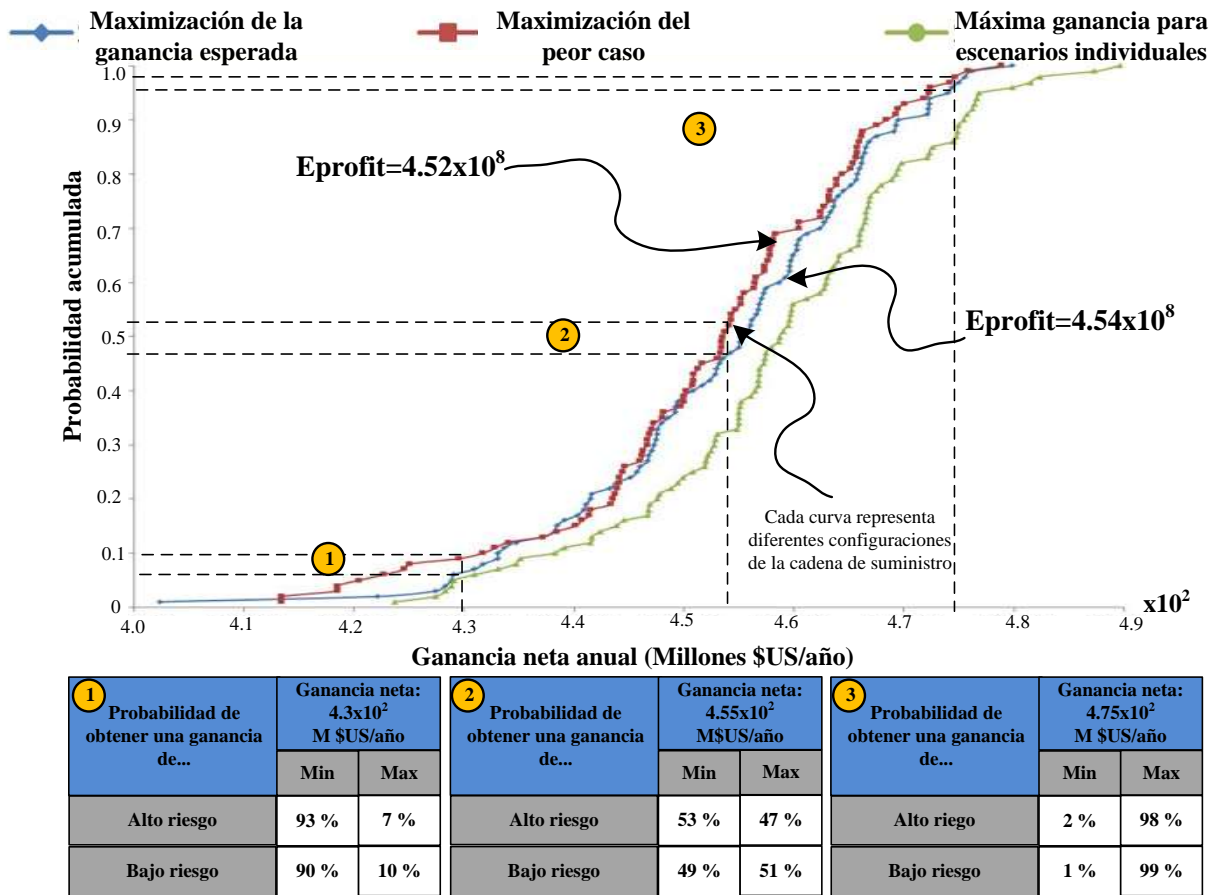


Figura 4.23 Curvas de probabilidad acumulada para la distribución correlacionada

Igualmente a la Figura 4.16, se seleccionaron tres valores objetivo para la ganancia anual, estos valores corresponden a: 4.3×10^2 Millones \$US/año, 4.55×10^2 Millones de \$US/año y 4.75×10^2 Millones de \$US/año. En este caso, la probabilidad de obtener valores por debajo de dichos objetivos son 7 %, 47 % y 98 % para la solución con mayor riesgo y 10 %, 51 % y 99 % para la solución más conservadora.

Ahora bien, los valores de ganancia para los diferentes escenarios para las soluciones con mayor y menor riesgo son presentados en la Figura 4.24. En este sentido, es posible observar que las máximas ganancias con obtenidas en los escenarios 9 y 88, mientras que las mínimas ganancias se dan en el escenario 85 en ambos casos. Para la solución más optimista, la ganancia neta anual es igual a 4.8×10^2 Millones de \$US/año, la mínima ganancia es 4.03×10^2 Millones \$US/año y la ganancia esperada corresponde a 4.54×10^2 Millones de \$US/año. En contraste, la alternativa más conservadora produce valores máximo, mínimo y esperado de 4.79×10^2 Millones de \$US/año, 4.13×10^2 Millones de \$US/año y 4.52×10^2 Millones de \$US/año, respectivamente.

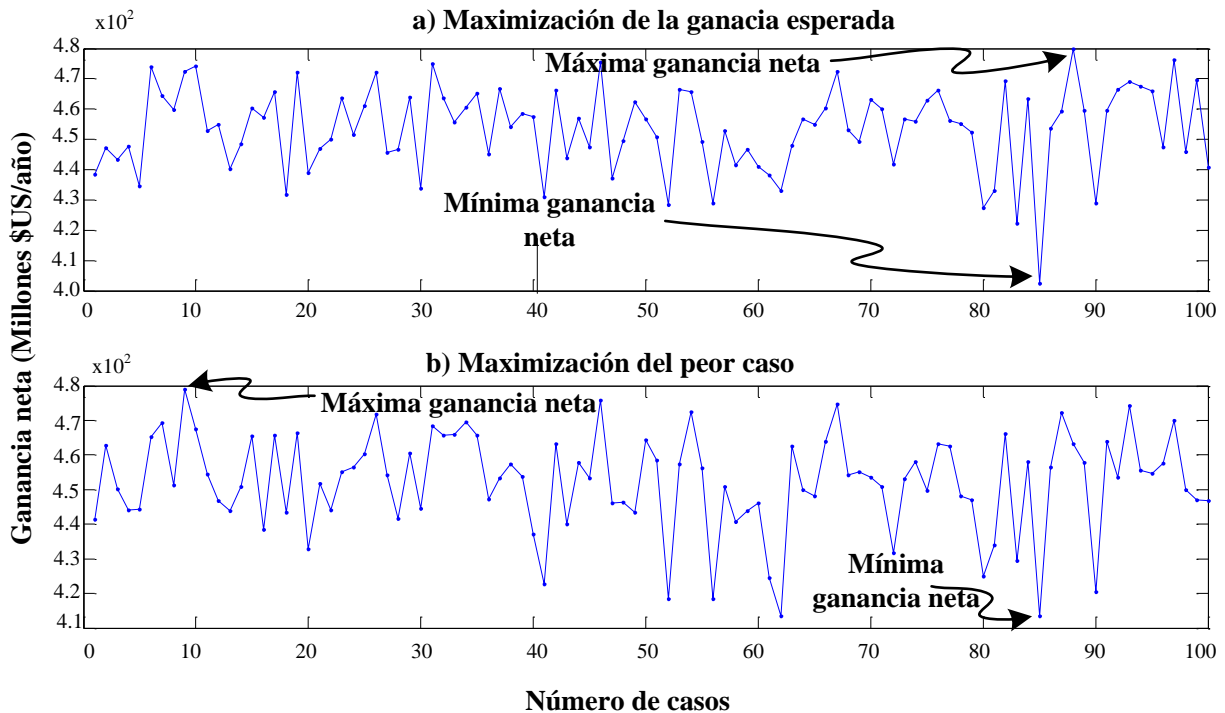


Figura 4.24 Ganancia neta anual para cada escenario para las soluciones con mayor y menor riesgo para la distribución correlacionada

La Tabla 4.10 muestra los valores del precio de materia prima para los escenarios críticos de la Figura 4.24 (9, 88 y 85) correspondientes a la distribución correlacionada así como la comparación con los valores máximo, mínimo y medio. Cabe destacar que las materias primas seleccionadas en la solución con más riesgo son sorgo dulce y caña de azúcar, porque los precios de estas materias primas son menores comparados con los de otras materias primas. Por otra parte, las astillas de madera son agregadas en la lista de las materias seleccionadas cuando se minimiza el riesgo debido a que la caña de azúcar presenta un incremento en su costo mientras las astillas de madera disminuyen su precio; es decir, la relación entre estas dos materias primas es negativa acorde a la correlación. (ver Tabla 4.9 y Figura 4.21).

Tabla 4.10 Precios de la materia prima para los escenarios críticos para los parámetros correlacionados

	Escenario 85		Escenario 9		Escenario 88		Valor Mín \$US/t	Valor Medio \$US/t	Valor Max \$US/t
	Valor \$US/t	% desv media	Valor \$US/t	% desv media	Valor \$US/t	% desv media			
Astillas de madera	74.39	-40.45	80.77	-35.34	174.38	39.59	53.75	124.92	241.74
Madera	181.59	-40.20	243.86	-19.69	416.22	37.07	140.97	303.64	664.94
Caña de azúcar	130.86	127.31	37.40	-35.04	27.74	-51.82	27.74	57.57	130.86
Maíz grano	382.60	-5.41	348.70	-13.79	296.80	-26.62	280.75	404.46	621.05
Sorgo grano	253.34	7.97	172.82	-26.35	202.30	-13.79	121.62	234.64	402.19
Sorgo dulce	40.13	18.73	26.19	-22.52	24.52	-27.46	24.52	33.80	44.18
Palma africana	87.62	-30.71	96.40	-23.76	167.16	32.20	58.03	126.45	265.37
Jatropha	101.76	-41.17	131.30	-24.10	261.97	51.45	74.93	172.98	289.58
Cártamo	466.76	37.61	276.23	-18.56	251.74	-25.78	224.50	339.19	466.76

La Figura 4.25 presenta los histogramas de frecuencia para la ganancia anual para las soluciones obtenidas a partir de la maximización de la ganancia esperada y la maximización del

peor caso para la distribución correlacionada de los parámetros inciertos. Es importante mencionar que la ganancia anual para el caso de la distribución correlacionada está distribuida en un rango menor que los valores de la ganancia en el caso no correlacionada. Una de las razones de tal comportamiento se debe a que las materias primas seleccionadas para el caso correlacionado tienen correlaciones negativas, lo cual causa un comportamiento restringido para los valores de ganancias.

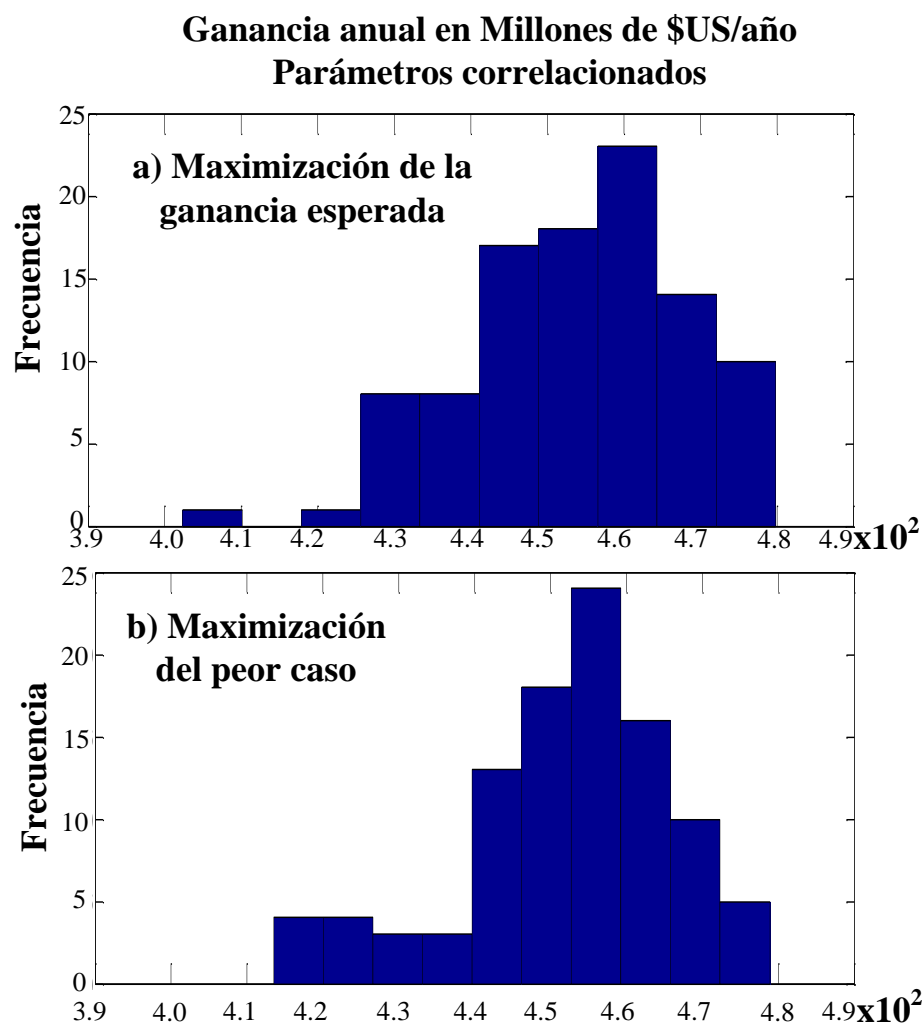


Figure 4.25 Histograma de frecuencia para la ganancia neta anual para las soluciones con el mayor y menor riesgo para la distribución correlacionada

La Figura 4.26 representa la configuración de la cadena productiva cuando se maximiza la ganancia esperada. Cabe destacar que la topología del sistema presenta algunas diferencias importantes entre los casos correlacionados y sin correlacionar. Por ejemplo, la demanda satisfecha cambia para todos los consumidores. El primer cambio importante es dado en el consumo de la región centro ya que para el caso correlacionado la demanda satisfecha de etanol es de 22.28 %, mientras que para el caso sin correlacionar la demanda satisfecha es 30.26 %. La segunda variación ocurre en la región sur ya que el caso sin correlacionar tiene una demanda satisfecha de 43.63 % y el caso correlacionado no se satisface biodiésel. Adicionalmente, para el caso correlacionado no existe distribución de producto hacia la zona noroeste.

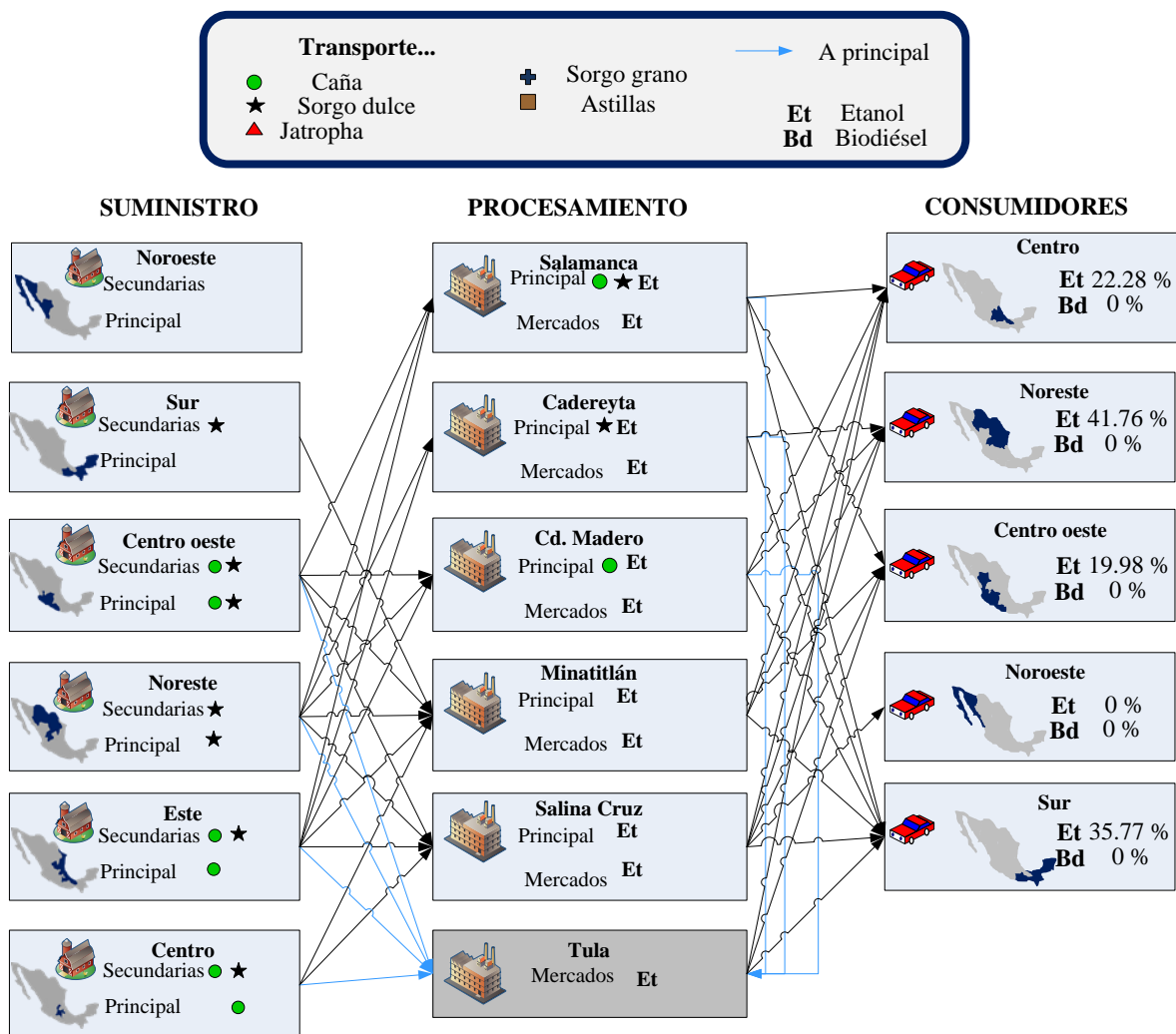


Figura 4.26 Configuración de la cadena de suministro para la solución con el mayor riesgo para los parámetros correlacionados

Finalmente, la Figura 4.27 presenta la configuración general de la cadena de suministro para la solución más conservadora. En esta Figura se puede observar que el biodiésel es producido en la planta de procesamiento principal y se seleccionan un mayor número de materias primas para producir etanol como el sorgo dulce, caña de azúcar y astillas de madera. Además, la demanda satisfecha es muy similar en todos los consumidores, no obstante la demanda satisfecha de biodiésel incrementa hasta 22.48 % en la región sur.

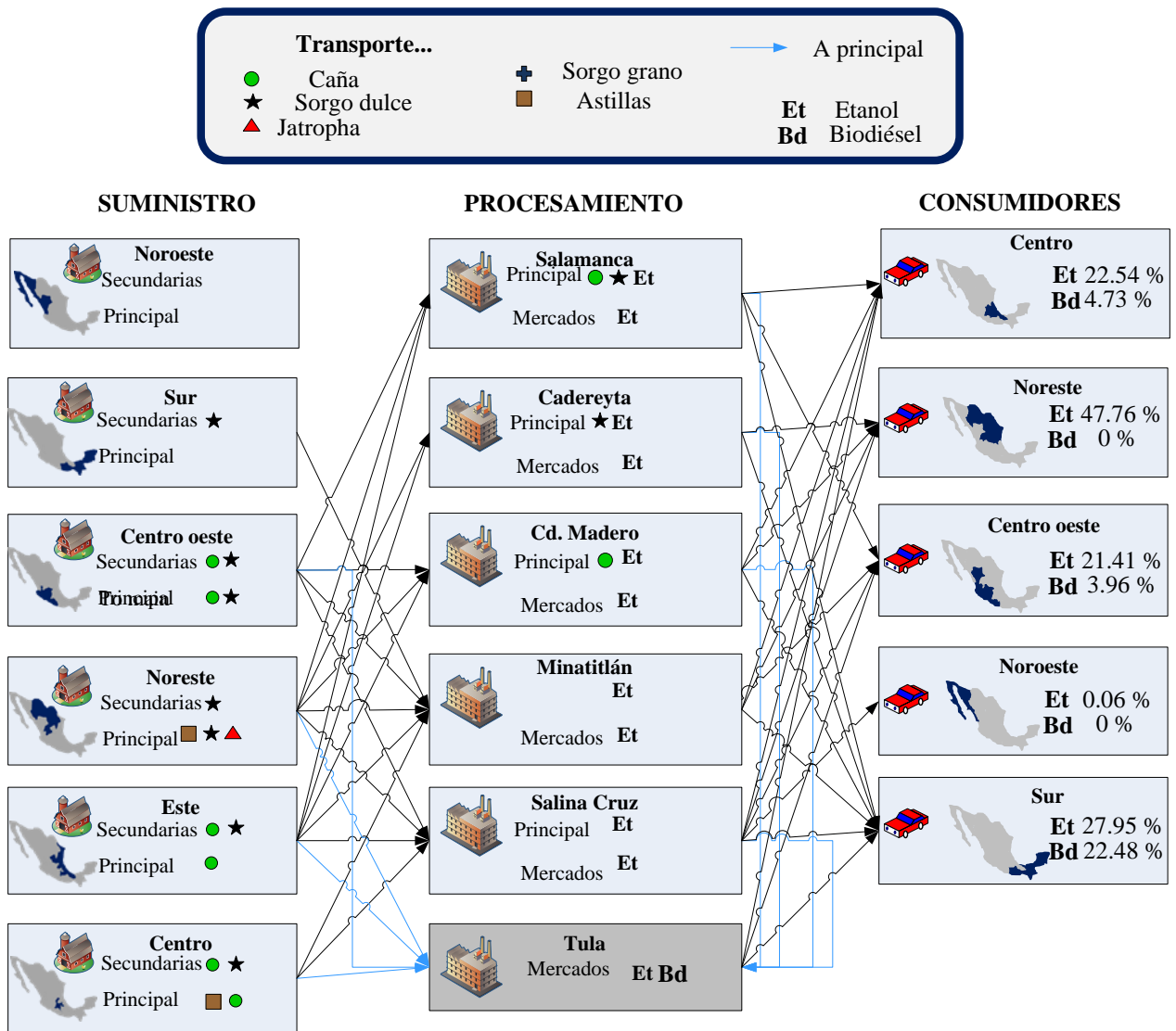


Figura 4.27 Configuración de la cadena de suministro para la solución con el menor riesgo para los parámetros correlacionados

La Tabla 4.11 proporciona el porcentaje de la demanda satisfecha para los diferentes mercados para las soluciones extremas en el caso de parámetros correlacionados. Es importante destacar que uno de los principales efectos de la distribución correlacionada es la selección de más materias primas para la solución con mayor aversión al riesgo. Otro efecto directo es el cambio en la producción de biodiésel, porque para el caso no correlacionado la producción de biodiésel es nula, mientras que la solución con mayor riesgo si existe producción de biodiésel. Finalmente, la Tabla 4.12 presenta la cantidad de materia utilizada en este caso de manera similar a la Tabla 4.8.

Tabla 4.11 Porcentaje de demanda satisfecha de los productos para distribución correlacionada para las soluciones con mayor y menor riesgo

Producto	Consumidor	Demanda	Alto riesgo	Bajo riesgo
		requerida x10 ⁶ Ton	% Satisfecha	% Satisfecha
Etanol	Centro	1.21	22.28	22.54
	Noreste	0.54	41.76	47.76
	Centro oeste	0.76	19.98	21.41
	Noroeste	0.64	0.00	0.06
	Sur	0.47	35.77	27.95
Biodiésel	Centro	0.26	0.00	4.73
	Noreste	0.13	0.00	0.00
	Centro oeste	0.20	0.00	3.96
	Noroeste	0.17	0.00	0.00
	Sur	0.13	0.00	22.48

Tabla 4.12 Cantidad de biomasa utilizada para las soluciones con el mayor y el menor riesgo
(Caso correlacionado)

	Materias primas	Abastecimiento	Cantidad usada (x10⁶ ton)	Máxima disponible (x10⁶ ton)	% Utilizada
Solución con alto riesgo	Caña de azúcar	Centro oeste	0.02	8.39	0.29
	Caña de azúcar	Este	0.40	27.12	1.46
	Caña de azúcar	Centro	0.21	1.87	11.23
	Sorgo dulce	Sur	0.01	0.01	100.00
	Sorgo dulce	Centro oeste	0.36	1.00	36.33
	Sorgo dulce	Noreste	0.35	1.65	21.38
	Sorgo dulce	Este	0.05	0.05	100.00
	Sorgo dulce	Centro	0.02	0.02	100.00
Solución con bajo riesgo	Astillas de madera	Noreste	0.03	0.06	47.16
	Astillas de madera	Centro	0.01	0.02	45.82
	Caña de azúcar	Centro oeste	0.02	8.39	0.29
	Caña de azúcar	Este	0.40	27.12	1.46
	Caña de azúcar	Centro	0.21	1.87	11.23
	Sorgo dulce	Sur	0.01	0.01	100.00
	Sorgo dulce	Centro oeste	0.36	1.00	36.33
	Sorgo dulce	Noreste	0.35	1.65	21.38
	Sorgo dulce	Este	0.05	0.05	100.00
	Sorgo dulce	Centro	0.02	0.02	100.00
	Jatropha	Noreste	0.15	0.53	28.12

CONCLUSIONES

Primeramente, se presentó un modelo mixto entero de optimización dinámica para obtener la configuración de un sistema distribuido de procesamiento de biomasa. Este modelo es adecuado para la selección de tecnologías, plantas de procesamiento, productos manufacturados y materias primas utilizadas para maximizar la demanda de productos. Este primer caso incluye importantes aspectos a tomar en cuenta en sistemas procesadores de biomasa, como diversas tecnologías de producción para producir múltiples productos a través de varios tipos de biomasa; la cual es obtenida de distintas regiones geográficas distribuidas. También, se consideraron las economías de escala. Además, se desarrolló una metodología para el control de la cadena de suministro por medio de un modelo no lineal de control predictivo. El modelo fue aplicado a un caso de estudio para un sistema distribuido de biorefinerías en México. Los resultados muestran que es posible obtener la configuración y comportamiento de la cadena de suministro, incluyendo la dinámica asociada a la cadena productiva, en una forma rigurosa. Además, las soluciones obtenidas por la resolución del modelo dinámico ilustran que las cadenas de valor basadas en biomasa son afectadas drásticamente por la disponibilidad de biorecursos porque el nivel de inventario en los diferentes nodos de la cadena de suministro es intermitente. Adicionalmente, la demanda satisfecha depende de la materia prima y productos porque la producción de bioetanol se enfoca en satisfacer la demanda.

Posteriormente, se presentó una estrategia para considerar la incertidumbre en el precio de la materia prima durante la planificación de una cadena de suministro considerando aspectos económicos y ambientales. En este caso se observó que el método de *Latin Hypercube Sampling* es adecuado para generar parámetros inciertos maximizando el espacio incierto. Los resultados de dicha sección mostraron que es posible satisfacer la demanda de biocombustibles en una forma sustentable involucrando la incertidumbre de una manera robusta. También, se pudo concluir, basado en los resultados, que el comportamiento de los valores de la ganancia para el caso estocástico no está asociado al comportamiento de los precios de la materia prima ya que el histograma de la ganancia es similar a una distribución normal mientras los histogramas de todas las materias primas presentan una distribución uniforme. Además, durante este trabajo se desarrolló la integración de diferentes herramientas asistidas por computadora para facilitar la implementación del método propuesto.

Por otro lado, acorde con los resultados durante la evaluación del riesgo financiero, es posible concluir que la distribución de los datos inciertos pueden afectar significativamente la selección de materias primas, productos e interconexiones entre los nodos de la cadena de suministro. En el caso de la distribución no correlacionada, la solución con la máxima ganancia selecciona caña de azúcar, sorgo dulce y jatopha, mientras que la solución con menor riesgo solo se selecciona caña de azúcar y sorgo dulce y no existe producción de biodiésel. Por otro lado, el caso de la distribución correlacionada, la máxima ganancia fue obtenida con la selección de caña de azúcar y sorgo dulce; mientras que la solución con el menor riesgo contempla la selección de caña de azúcar, sorgo dulce, jatopha y astillas de madera. En ambos casos, fue posible reducir el riesgo asociado durante la operación de la cadena de valor ya que se ajustan las decisiones de diseño basadas en la información de los parámetros inciertos.

Además, el desarrollo del presente trabajo muestra tres de los trabajos desarrollados durante el doctorado los cuales se encuentran publicados en diversas revistas de alto nivel. El primero de ellos se publicó en la revista *Computers and Chemical Engineering* y lleva por nombre *A mixed-integer dynamic optimization approach for the optimal planning of distributed biorefineries*. El segundo fue aceptado en la revista *Bioenergy Research* y se denomina *Financial Risk Assessment and Optimal Planning of Biofuels Supply Chains under Uncertainty*. El tercer artículo fue publicado en la revista *Journal of Cleaner Production* y lleva por nombre *Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives*. No obstante, durante la duración total de los estudios de doctorado se han desarrollado otros trabajos alternos, así como colaboraciones lo cual ha permitido la publicación de un total de doce artículos científicos durante el periodo comprendido desde el inicio hasta el final de los estudios de grado, estos trabajos son mostrados en la sección de apéndices.

Finalmente, todas las herramientas desarrolladas en este trabajo pretenden facilitar la tarea de los tomadores de decisiones considerando aspectos importantes como la dinámica robusta, el control óptimo, la flexibilidad de la cadena de valor y el riesgo financiero en la producción, distribución y uso de productos a partir de biomasa.

LISTA DE REFERENCIAS

- Ahn, Y. C., Lee, I. B., Lee, K. H., Han, J. H. (2015). Strategic planning design of microalgae biomass-to-biodiésel supply chain network: Multi-period deterministic model. *Applied Energy*, 154, 528-542.
- Akbari, A. A., Karimi, B. (2015). A new robust optimization approach for integrated multi-echelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1-4), 229-244.
- An, H., Wilhelm, W. E., Searcy, S. W. (2011). Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: a literature review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3763-3774.
- Basnet, C., Leung, J. M. (2005). Inventory lot-sizing with supplier selection. *Computers and Operations Research*, 32(1), 1-14.
- Biegler, L. T. (2010). *Nonlinear programming: Concepts, algorithms and applications to chemical engineering*. SIAM, Philadelphia.
- BP Global, (2015). The energy challenge and climate change
<http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/sustainability/group-reports/energy-challenge-climate-change-2015.pdf> (Accesado Mayo 2015).
- Camero, C., Sowlati, T., Marinescu, M., Röser, D. (2015). Strategic optimization of forest residues to bioenergy and biofuel supply chain. *International Journal of Energy Research*, 39(4), 439-452.
- Chen, Y., Zhou, T., Liu, D., Li, A., Xu, S., Liu, Q., Ying, H. (2013). Production of butanol from glucose and xylose with immobilized cells of *Clostridium acetobutylicum*. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 18(2), 234-241.
- Cristóbal, J., Guillén-Gosálbez, G., Kraslawski, A., Irabien, A. (2013). Stochastic MILP model for optimal timing of investments in CO₂ capture technologies under uncertainty in prices. *Energy*, 54, 343-351.
- D'Avino, L., Dainelli, R., Lazzeri, L., Spugnoli, P. (2015). The role of co-products in biorefinery sustainability: energy allocation versus substitution method in rapeseed and carinata biodiésel chains. *Journal of Cleaner Production*, 94, 108-115.

- Elia, J. A., Floudas, C. A. (2014). Energy supply chain optimization of hybrid feedstock processes: a review. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 5, 147-179.
- Emery, I., Dunn, J. B., Han, J., Wang, M. (2015). Biomass Storage Options Influence Net Energy and Emissions of Cellulosic Ethanol. *BioEnergy Research*, 8(2), 590-604.
- Georgiadis, M. C.; Tsiakis, P.; Longinidis, P.; Sofioglou, M. K. (2011). Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. *Omega*, 39(3), 254-272.
- Goedkoop, M., Spriensma, R. (2001). The eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report and manual for designers, Technical Report, PR e Consultants, Amersfoort, Holanda.
- Gold, S., Seuring, S. (2011). Supply chain and logistics issues of bio-energy production. *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 32-42.
- Granström, T. B., Izumori, K., Leisola, M. (2007). A rare sugar xylitol. Part I: the biochemistry and biosynthesis of xylitol. *Applied microbiology and biotechnology*, 74(2), 277-281.
- Guillén, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M. J., Espuna, A., Puigjaner, L. (2005). Multiobjective supply chain design under uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 60(6), 1535-1553.
- Guilleñ-Gosalbez, G., Grossmann, I. E. (2009). Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE Journal*, 55(1), 99-121.
- Gutiérrez-Limón, M. A., Flores-Tlacuahuac, A., Grossmann, I. E. (2014). MINLP formulation for simultaneous planning, scheduling, and control of short-period single-unit processing systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(38), 14679-14694.
- Haankuku, C., Epplin, F. M., Kakani, V. G. (2015). Industrial sugar beets to biofuel: Field to fuel production system and cost estimates. *Biomass and Bioenergy*, 80, 267-277.
- Hosseini, S. A., Shah, N. (2011). Multi-scale process and supply chain modelling: from lignocellulosic feedstock to process and products. *Interface focus*, 1(2), 255-262.
- Jones, D. T., Woods, D. R. (1986). Acetone-butanol fermentation revisited. *Microbiological reviews*, 50(4), 484.
- Kostin, A. M., Guillén-Gosalbez, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M. J., Jiménez, L. (2012). Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(3), 359-376.

- Kremer, G. E., Haapala, K., Murat, A., Chinnam, R. B., Kim, K. Y., Monplaisir, L., Lei, T. (2016). Directions for instilling economic and environmental sustainability across product supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2066-2078.
- Liew, W. H., Hassim, M. H., Ng, D. K. (2014). Review of evolution, technology and sustainability assessments of biofuel production. *Journal of Cleaner Production*, 71, 11-29.
- Mansoornejad, B., Chambost, V., Stuart, P. (2010). Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Computers and Chemical Engineering*, 34(9), 1497-1506.
- McCarty, T., Sesmero, J. (2015). Uncertainty, irreversibility, and investment in second-generation biofuels. *BioEnergy Research*, 8(2), 675-687.
- Mele, F. D., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L. (2009). Optimal planning of supply chains for bioethanol and sugar production with economic and environmental concerns. *Computer aided chemical engineering*, 26, 997-1002.
- Moncada, J., Tamayo, J., Cardona, C. A. (2014). Evolution from biofuels to integrated biorefineries: techno-economic and environmental assessment of oil palm in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 81, 51-59.
- Morales-Rodriguez, R., Meyer, A. S., Gernaey, K. V., Sin, G. (2011). A framework for model-based optimization of bioprocesses under uncertainty: Identifying critical parameters and operating variables. *Computer Aided Chemical Engineering*, 29, 1455-1459.
- Murillo-Alvarado, P. E., Guillén-Gosálbez, G., Ponce-Ortega, J. M., Castro-Montoya, A. J., Serna-González, M., Jiménez, L. (2015). Multi-objective optimization of the supply chain of biofuels from residues of the tequila industry in Mexico. *Journal of Cleaner Production*, 108, 422-441.
- Ng, R. T., Ng, D. K., Tan, R. R. (2015). Optimal planning, design and synthesis of symbiotic bioenergy parks. *Journal of Cleaner Production*, 87, 291-302.
- Quaglia, A., Sarup, B., Sin, G., Gani, R. (2013). A systematic framework for enterprise-wide optimization: Synthesis and design of processing networks under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 59, 47-62.

- SAGARPA-SIAP. (2014). Almanac for the sowing 2008_2009. SENER, Bioenergetics production program
http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350
(Accesado Feb 2016)
- Saha, B. C., Nakamura, L. K. (2003). Production of mannitol and lactic acid by fermentation with *Lactobacillus intermedius* NRRL B-3693. *Biotechnology and bioengineering*, 82(7), 864-871.
- Sahinidis, N. V. (2004). Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers Chemical Engineering*, 28(6), 971-983.
- Sahling, F., Kayser, A. (2016). Strategic supply network planning with vendor selection under consideration of risk and demand uncertainty. *Omega*, 59, 201-214.
- Sammons, N., Eden, M., Yuan, W., Cullinan, H., Aksoy, B. (2007). A flexible framework for optimal biorefinery product allocation. *Environmental Progress*, 26(4), 349-354.
- Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2011). Optimal planning of a biomass conversion system considering economic and environmental aspects. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(14), 8558-8570.
- Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*, 65, 270-294.
- Shabani, N., Sowlati, T. (2013). A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant. *Applied Energy*, 104, 353-361.
- Sin, G., Gernaey, K. V., Lantz, A. E. (2009). Good modeling practice for PAT applications: Propagation of input uncertainty and sensitivity analysis. *Biotechnology progress*, 25(4), 1043-1053.
- Sukumaran, R. K., Gottumukkala, L. D., Rajasree, K., Alex, D., Pandey, A. (2011). Butanol fuel from biomass: Revisiting ABE fermentation. *Biofuels: Alternative feedstocks and conversion processes*, Academic Press, Amsterdam, 571-586.

- Terrazas-Moreno, S., Flores-Tlacuachuac, A., Grossmann, I.E. (2008). A Lagrangean Heuristic for the Scheduling and Control of Polymerization Reactors. *AIChE Journal*, 54(1), 163-182.
- Tochampa, W., Sirisansaneeyakul, S., Vanichsriratana, W., Srinophakun, P., Bakker, H. H., Chisti, Y. (2005). A model of xylitol production by the yeast *Candida mogii*. *Bioprocess and biosystems engineering*, 28(3), 175-183.
- Torjai, L., Nagy, J., Bai, A. (2015). Decision hierarchy, competitive priorities and indicators in large-scale ‘herbaceous biomass to energy’ supply chains. *Biomass and Bioenergy*, 80, 321-329.
- Trapp, A. C., Sarkis, J. (2016). Identifying Robust portfolios of suppliers: a sustainability selection and development perspective. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2088-2100.
- You, F., Tao, L., Graziano, D. J., Snyder, S. W. (2012). Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. *AIChE Journal*, 58(4), 1157-1180.
- Yue, D., You, F., Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers and Chemical Engineering*, 66, 36-56.
- Yue, D.; You, F. (2014). Fair profit allocation in supply chain optimization with transfer price and revenue sharing: MINLP model and algorithm for cellulosic biofuel supply chains. *AIChE Journal*, 60(9), 3211-3229.
- Zhang, Q., Shah, N., Wassick, J., Helling, R., Van Egenschot, P. (2014). Sustainable supply chain optimisation: An industrial case study. *Computers and Industrial Engineering*, 74, 68-83.

APÉNDICE. ARTÍCULOS PUBLICADOS DURANTE EL DOCTORADO

A.1.- Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste

Waste Management 33 (2013) 2607–2622



Contents lists available at ScienceDirect

Waste Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/wasman



Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste



José Ezequiel Santibañez-Aguilar^a, José María Ponce-Ortega^{a,*}, J. Betzabe González-Campos^b, Medardo Serna-González^a, Mahmoud M. El-Halwagi^{c,d}

^a Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^b Institute of Chemical and Biological Researches, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^c Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA

^d Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, P.O. Box 80204, Jeddah 21589, Saudi Arabia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 May 2013

Accepted 3 August 2013

Available online 10 September 2013

Keywords:

Supply chain

Sustainable development

Municipal solid waste

Optimization

Distributed system

Superstructure

Waste management

ABSTRACT

The increasing generation of municipal solid waste (MSW) is a major problem particularly for large urban areas with insufficient landfill capacities and inefficient waste management systems. Several options associated to the supply chain for implementing a MSW management system are available, however to determine the optimal solution several technical, economic, environmental and social aspects must be considered. Therefore, this paper proposes a mathematical programming model for the optimal planning of the supply chain associated to the MSW management system to maximize the economic benefit while accounting for technical and environmental issues. The optimization model simultaneously selects the processing technologies and their location, the distribution of wastes from cities as well as the distribution of products to markets. The problem was formulated as a multi-objective mixed-integer linear programming problem to maximize the profit of the supply chain and the amount of recycled wastes, where the results are showed through Pareto curves that tradeoff economic and environmental aspects. The proposed approach is applied to a case study for the west-central part of Mexico to consider the integration of MSW from several cities to yield useful products. The results show that an integrated utilization of MSW can provide economic, environmental and social benefits.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Waste is defined as any residual material from industrial and human activities that has no residual value (Ortiz et al., 2010). Nowadays, there is much interest in waste production, management and disposal. This is attributed to the observation that waste generation is a side effect of consumption and production and it tends to increase with the economic development of the society (Beolchini et al., 2012). Furthermore, there is an increasing awareness of the environmental, health, economic, and social problems associated with waste disposal. Particular attention should be given to the treatment and management of municipal solid waste because of its abundance and impact on the environment (Vasudevan et al., 2012).

In Malaysia the average amount of municipal solid waste generated is about 0.5 kg/person/day; but it can be up to 1.7 kg/person/day in other cities of the world (Ramayah et al., 2012). This creates problems in some countries because of the lack of sufficient landfills and an adequate MSW management system. For example, in several countries of Central and South American (like the specific

case of Mexico), the waste management is not adequate; also, one important problem is that the MSW is mixed (i.e. different types of materials are mixed and they require to be separated for further treatment), which increases the separation costs, makes more difficult and expensive the treatment process and even yields insalubrious conditions. This is very common in Mexico, where most of the people do not separate the solid wastes, which results in a very significant increase of total wastes volume and weight, besides the fact that the facilities are not adequate to store these residues. In these cases the application of proper environmental, institutional, financial, economic and social tools to guarantee a sustainable waste management is required (Ghinea et al., 2012). There are also negative impacts on water, land, and air resulting from inadequate treatment and management of the municipal solid waste (Krüger et al., 2012).

It is important to note that the actions that have been implemented to solve this problem are focused only on one particular type of waste, without taking into account the interaction between the waste composition and distribution, and without considering the entire supply chain optimization as well as the economies of scale. The distribution of wastes, products and the design and selection of the processing facilities are crucial in yielding an adequate solution for the entire problem. Therefore, this paper

* Corresponding author. Tel./fax: +52 443 3273584.

E-mail address: jponce@umich.mx (J.M. Ponce-Ortega).

A.2.- Optimal Planning of Supply Chains for Multi-Product Generation from Municipal Solid Waste

55



VOL. 42, 2014

Guest Editors: Petar Sabevar Varbanov, Neven Dučić
Copyright © 2014, AIDIC Servizi S.r.l.,
ISBN 978-88-95608-33-4; ISSN 2283-9216



DOI:10.3303/CET1442010

Optimal Planning of Supply Chains for Multi-Product Generation from Municipal Solid Waste

José Ezequiel Santibañez-Aguilar^a, José María Ponce-Ortega^{*a}, Janett Betzabe González-Campos^b, Medardo Serna-González^a, Mahmoud M. El-Halwagi^c

^aChemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

^bChemical-Biological Research Institute, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México

^cChemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, Texas, USA
jponce@umich.mx

In recent years there has been increased the amount of generated municipal solid waste in most of the developing countries, where the waste management systems are not adequate because of lack of organization and infrastructure. A special case is Mexico, where the municipal solid waste management is responsibility for the government; however, the waste management in Mexico is not adequate due to the lack of landfills and culture about of waste separation.

In this regard, this work proposes a mathematical model for the optimal planning of supply chains based on municipal solid waste, where several processing technologies for different waste as well as the total costs for the entire waste management network are considered. This planning problem is mathematically formulated as a multi-objective optimization problem that seeks to maximize the net annual profit (economic objective) and minimize the environmental impact, which is measured through the percentage of the total utilized waste respect to the waste that can be used as raw material.

The proposed optimization approach was applied to a case study in Mexico. The results show that it is possible to implement a supply chain for using municipal solid waste that maximizes the net profit of the network reducing significantly the impact to the environment. Furthermore, the results are shown through a Pareto curve that can be used by decision makers to implement a network for waste processing to obtain multiple products in places where there is not any waste management system at all.

1. Introduction

Municipal solid waste management is a challenge for authorities of cities in developing countries, mainly due to the increasing of waste generation (Abarca-Guerrero et al., 2013). This is a serious problem in countries like Mexico because the size of landfills is not sufficient, the waste disposition is not adequate, and the garbage is mixed with several recyclable and non-recyclable materials, which increases the separation costs and makes the waste recycling process more difficult. In this way, several alternatives have been proposed to solve the waste management problem from different points of view. For example, Antonioni et al. (2012) simulated a two-stage dry flue gas cleaning process for a municipal solid waste incinerator and Kropáč et al. (2013) developed a simulation model for waste-to-energy production. Furthermore, a waste management system can be addressed as a supply chain design problem; in this context, Young et al. (2013) presented an approach for evaluating and designing sustainable supply chains based on waste. Furthermore, Čuček et al. (2012a) presented an approach to reduce the number of objectives in multi-objective optimization, and then Čuček et al. (2012b) applied this approach for biomass-to-energy supply chains. Varbanov et al. (2012) analyzed the energy generation from waste. Šomplák et al. (2013) introduced an interesting approach for facility planning in the field of waste management, where the goal was to obtain the minimum cost for the municipal solid waste treatment in municipalities. In this way, the supply chains focused on the waste management should consider the waste generation, collection, separation, transportation, conversion, distribution, and waste disposal for the

Please cite this article as: Santibañez-Aguilar J.E., Ponce-Ortega J.M., González-Campos J.B., Serna-González M., El-Halwagi M.M., 2014, Optimal planning of supply chains for multi-product generation from municipal solid waste, Chemical Engineering Transactions, 42, 55-60 DOI:10.3303/CET1442010

A.3.- Optimization of the Supply Chain Associated to the Production of Bioethanol from Residues of Agave from Tequila Process in Mexico



Article

pubs.acs.org/ECR

Optimization of the Supply Chain Associated to the Production of Bioethanol from Residues of Agave from the Tequila Process in Mexico

Pascual Eduardo Murillo-Alvarado,[†] José Ezequiel Santibañez-Aguilar,[†] José María Ponce-Ortega,^{*†} Agustín Jaime Castro-Montoya,[†] Medardo Serna-González,[†] and Mahmoud M. El-Halwagi^{‡,§}

[†]Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México 58060

[‡]Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, Texas, United States 77843-3122

[§]Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

Supporting Information

ABSTRACT: The Mexican economy is highly dependent on the tequila industry, where there are associated several residues of agave (i.e., the plant used to make tequila), which is lignocellulosic matter that can be used as feedstock for bioethanol production. The residues of agave are obtained in the harvesting sites located in several states of Mexico and from the tequila factories that are mainly located in two places in Mexico. This paper presents an optimization framework for designing a supply chain for the bioethanol production from residues of agave bagasse obtained in the tequila processing in Mexico, where central and distributed bioethanol processing plants are considered. The bioethanol production process in the central and distributed plants is modeled according to conversion factors for the different processing steps obtained from experimental data. The proposed optimization formulation also considers the total available agave and the bioethanol demand in Mexico. Several scenarios are analyzed for the bioethanol production from agave bagasse in Mexico, where positive results are obtained from the reuse of residues of agave bagasse for bioethanol production, obtaining considerable profits and satisfying a significant demand of the gasoline required in the area.

1. INTRODUCTION

The agave is a perennial arid plant that consists of thin sheets around a pineapple (or plant head), whose main elements are fibers, sugars, minerals, and water. Juice with high concentration of fructose and other vitamin properties is naturally produced in the center of the pineapple; also, agave has some fat particles that yield its distinctive taste and smell. This way, a large number of products can be obtained from agave as honey water, paper, textiles, *mezcal* (i.e., a fermented beverage similar to tequila), and tequila. Mexico is one of the areas with the greatest diversity of species of agave in the world. For this reason, agave is one of the most important industries associated to tequila and *mezcal* production, where the agave plant is used as source of fermentable sugars. The agave is mainly cultivated in the central-western part of Mexico (in the states of Jalisco, Guanajuato, and Michoacán), and most of the factories associated to the tequila industry are located in this region. During the processing of agave to yield tequila, several lignocellulosic residues from the agave are produced. These residues correspond to the stalks that are obtained in the cultivation areas because these are not used for the tequila process, and also, there are other lignocellulosic residues obtained in the factories associated to the tequila processing from the plant heads after the fermentation process. Nowadays, the residues from the agave generated in this region represent a considerable pollution problem because these residues are not used at all. However, these lignocellulosic residues can be used as raw material to produce several value-added products, including bioethanol and solid fuel. Furthermore, satisfying the

fuel requirements is a serious problem due to the reduction of oil reserves around the world and the associated greenhouse gas emissions. In this regard, biofuels are expected to decrease the negative environmental impact for energy use. These biofuels are produced from biomass and organic wastes with high carbon content; for example, bioethanol is one of the most accepted biofuels that can be used as substitution of gasoline. Furthermore, there are several routes to produce bioethanol, most of them through fermentation. Huang et al.¹ studied the effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol. Dutta et al.² presented an economic comparison of different fermentation configurations to obtain ethanol using various microorganisms to observe the advantages with respect to the configuration of the production process. Also, a techno-economic analysis comparing several routes for bioethanol production from corn stover and lignocellulosic materials was reported by Kazi et al.³ In addition, several chemical and biochemical routes have been proposed for the bioethanol production from lignocellulosic materials such as wheat straw, wood chips, different bagasse, and others. Kaparaju et al.⁴ proposed the utilization of wheat straw to obtain different biofuels as ethanol, hydrogen, and biogas via hydrothermal pretreatment. Cardona et al.⁵ discussed the profitability of bioethanol production from lignocellulosic materials consider-

Received: September 24, 2013

Revised: February 17, 2014

Accepted: March 5, 2014

Published: March 5, 2014

A.4.- Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives

Journal of Cleaner Production 65 (2014) 270–294



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro



Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives



José Ezequiel Santibañez-Aguilar^a, J. Betzabe González-Campos^b,
José María Ponce-Ortega^{a,*}, Medardo Serna-González^a, Mahmoud M. El-Halwagi^{c,d}

^aChemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^bInstitute for Chemical and Biological Research, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^cChemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA

^dAdjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 June 2012

Received in revised form

19 June 2013

Accepted 1 August 2013

Available online 14 August 2013

Keywords:

Biorefinery supply chain

Multiple processing and harvesting sites

Multi-objective optimization

Planning

Sustainability

Environmental and social assessment

ABSTRACT

Biorefineries appear to be a viable solution to replace traditional fossil fuel refineries, but their implementation requires the exploration of several aspects, including feedstock selection, processing routes, products, harvesting sites, processing and markets, as well as numerous other sustainability criteria. The optimal solution to these problems is not immediately obvious. Therefore, this study presents an optimization model to design and plan sustainable biorefinery supply chains that considers numerous relevant issues. These issues include the multiple available biomass feedstocks at various harvesting sites, the availability and seasonality of biomass resources, different potential geographical locations for processing plants that produce multiple products using diverse production technologies, economies of scale for the production technologies, demands and prices of multiple products in each market, locations of storage facilities and a number of transportation modes between the supply chain components. Sustainability considerations are incorporated into the proposed model by including simultaneous economic, environmental and social performance data in the evaluation of the supply chain designs. The problem was formulated as a multi-objective, multi-period, mixed-integer linear program that seeks to maximize the profit of the supply chain, minimize its environmental impact and maximize the number of jobs generated by its implementation. The environmental impact was measured by the Eco-indicator99 according to the life-cycle assessment technique, and the social objective was quantified by the number of jobs generated. The Pareto-optimal solutions were obtained using the ϵ -constraint method. To illustrate the capabilities of the proposed multi-site system model, a case study was presented that addresses the optimal design and planning of a biorefinery supply chain to fulfill the expected ethanol and biodiesel demands in Mexico. The results indicate that cost-effective and sustainable solutions can be obtained that satisfy Mexican demand by choosing feedstocks that are available year-round and do not significantly adversely impact the environment. Furthermore, the number of jobs generated by implementing the biorefinery supply chain would have a significant social impact.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

During the last three decades, several authors have developed diverse assessment frameworks that integrate a number of dimensions required for sustainable development, which is defined as “development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs” (WCED, 1987). In this context, Jansen (2003) identified three

relevant dimensions for sustainable development: the interactions between culture, structure and technology, the optimization/improvement/renewal approaches and the parts involved. Vachon and Mao (2008) assessed the linkage between supply chain characteristics and three suggested dimensions of sustainability, namely, environmental performance, corporate environmental practices and social sustainability. An overview of environmental, social, and economic footprints indicators that can be used to measure sustainability was presented by Cucek et al. (2012). Recently, Lozano (2008) proposed the concept of two-tiered sustainability equilibria for depicting sustainability. This concept centers on the interaction between economic, environmental and

* Corresponding author. Tel./fax: +52 443 3273584.

E-mail addresses: jmponce@umich.mx, jose_maria_ponce@yahoo.com (J.M. Ponce-Ortega).

A.5.- Optimal Planning for the Reuse of Municipal Solid Waste Considering Economic, Environmental, and Safety Objectives

AIChE

Optimal Planning for the Reuse of Municipal Solid Waste Considering Economic, Environmental, and Safety Objectives

José Ezequiel Santibañez-Aguilar, Juan Martínez-Gómez, José María Ponce-Ortega,
Fabricio Nápoles-Rivera, and Medardo Serna-González
Chemical Engineering Dept, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán,
Mexico 58060

Janett Betzabe González-Campos
Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio B1,
Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México 58030

Mahmoud M. El-Halwagi
Chemical Engineering Dept, Texas A&M University, College Station, TX 77843
Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Dept., Faculty of Engineering,
King Abdulaziz University, Jeddah 21589, Saudi Arabia

DOI 10.1002/aic.14785

Published online March 25, 2015 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com)

A mathematical programming model is presented for the optimal planning of the reuse of municipal solid waste (MSW) to maximize the economic benefit while simultaneously considering sustainability and safety criteria. The proposed methodology considers several phases of the supply chain including waste separation, distribution to processing facilities, processing to obtain useful products, and distribution of products to consumers. Additionally, the safety criteria are based on the potential fatalities associated with waste management. The proposed optimization model is formulated as a multiobjective optimization problem, which considers three different objectives including the maximization of the net annual profit, the maximization of the amount of reused MSW, and the minimization of the social risk associated with the supply chain. The proposed model is applied to a case study in the central-west region of Mexico. The results show the tradeoff between the social risk and the economic and environmental criteria. © 2015 American Institute of Chemical Engineers AIChE J. 61: 1881–1899, 2015

Keywords: supply chain, waste management, social risk assessment, optimal planning, multiobjective optimization

Introduction

Nowadays, municipal solid waste (MSW) management is an important practice that addresses critical societal needs. The enormous generation of MSW is directly related to the current human lifestyle. Over the past decade, MSW disposal has increased drastically from 0.5 kg/person day) to 1.7 kg/(person day).¹ This has represented a serious problem particularly for countries where effective strategies for MSW management are not well established.² Inappropriate waste disposal may lead to serious side effects including ground-water pollution, health risks, and serious safety issues such as fire and explosion that may lead to fatalities.³ As such, a sustainable and efficient waste management strategy is needed to balance the need for the development of the quality of human life and the protection of the environment.⁴ For the optimal planning of MSW management, it is necessary to consider the entire supply chain of the system including

tasks like MSW recollection, transportation, treatment, production of value added products, and distribution of products.⁵ In this context, Varbanov et al.⁶ introduced a new indicator, called waste energy potential utilization, to measure the impact of logistics and energy distribution from MSW. Hokkanen and Salminen⁷ reported a methodology to take into account several criteria for the selection of a MSW management system. Hung et al.⁸ presented a review of models to support the decision making in MSW management. In addition, a classification for the models utilized in the area of MSW management was reported by Morrissey and Brown⁹ and Karmperis et al.¹⁰ Santibañez-Aguilar et al.¹¹ proposed a mathematical programming model for the optimal planning of a supply chain for MSW management considering economic and environmental aspects. Also, Tan et al.⁴ reported an optimization model for synthesizing MSW processing networks to produce energy and value-added products achieving economic and environmental issues. Bowling et al.¹² developed an approach to determine optimal locations and sizes of biomass-management facilities. Furthermore, Minoglou and Komilis¹³ presented a simplified methodology to optimize an integrated MSW management

Correspondence concerning this article should be addressed to J. M. Ponce-Ortega at jponceo@umich.mx.

© 2015 American Institute of Chemical Engineers

A.6.- Sustainable Multi-objective Planning of Biomass Conversion Systems under Uncertainty



CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS

VOL. 45, 2015

Guest Editors: Petar Sabev Varbanov, Jiří Jaromír Klemesš, Sharifah Rafidah Wan Alwi, Jun Yow Yong, Xia Liu
Copyright © 2015, AIDIC Servizi S.r.l.,
ISBN 978-88-95608-36-5; ISSN 2283-9216

367



DOI: 10.3303/CET1545062

Sustainable Multi-objective Planning of Biomass Conversion Systems under Uncertainty

José E. Santibañez-Aguilar^a, Ricardo Morales-Rodríguez^b,
Janett B. González-Campos^a, José M. Ponce-Ortega^{a*}

^aUniversidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México, 58060

^bUniversidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato, México, 36050

jmponce@umich.mx

Recently, the biomass has gained considerable attention as a feedstock for energy production because of its attractive characteristics, including its availability as a renewable resource. However, the biomass can be subjected to several uncertain factors such as the availability, market cost and composition; thus, it is worth noting that the uncertainty in the raw material can affect drastically the final supply chain configuration of the product. Therefore, this work presents a new approach for the optimal planning under uncertainty for a biomass conversion system involving simultaneously economic and environmental issues. In this context, the EcoIndicator99 method was used to assess the overall environmental impact in the entire supply chain. Additionally, the economic aspect takes into account all the costs associated to the different activities as well as the costs for raw materials and the sale of products. The proposed method considers the uncertainty involved in the supply chain through the raw material price by the stochastic generation of scenarios using the Latin Hypercube method followed by the implementation of the Monte-Carlo method for determining the optimal structure for each sample. Furthermore, with the proposed approach is possible to select the more robust structure for the supply chain based on statistical data. On the other hand, the proposed approach incorporates an analysis based on the standardized regression of the uncertain coefficients within the supply chain to determine the magnitude in which the uncertain data affect the value of the considered objectives. The proposed approach was applied to a case study for a distributed biorefinery system in Mexico, considering 6 suppliers, 6 processing facilities as well as 5 distribution centres. Besides, 9 raw materials were contemplated to obtain 5 different products through 2 processing routes.

1. Introduction

Biomass appears to be a viable raw material to replace oil for the production of several valued-added products, especially biofuels through biorefineries. However, its implementation requires the exploration of several aspects, including the selection of feedstocks, processing routes, products, harvesting sites, processing and markets, as well as numerous other sustainability criteria. Recently, the optimization of supply chains (SC) associated to biorefineries and the multi-objective optimization of SC based on biomass conversion that include environmental and sustainability implications have gained the attention of the industry and academia. With respect to the consideration of the environmental issue in applications for supply chains, Czarnowska et al. (2014) analysed several methods to measure the environmental impact such as the methods based on life cycle assessment. Also, with respect to the multi-objective optimization, Kravanja and Čuček (2013) presented two multi-objective approaches for synthesizing sustainable systems for biogas production, both approaches considered a single product and the change over time was not taken into account. El-Halwagi et al. (2013) introduced a new approach for the incorporation of safety criteria into the selection, location, and sizing of a biorefinery.

More specifically, for the optimal planning of supply chains, Koltsaklis et al. (2013) presented a mixed integer linear programming model for the optimal planning of a national power generation system. In addition, a mathematical model able to incorporate economic, environmental and social aspects was

Please cite this article as: Santibañez-Aguilar J.E., Morales-Rodríguez R., González-Campos J.B., Ponce-Ortega J.M., 2015. Sustainable multi-objective planning of biomass conversion systems under uncertainty. Chemical Engineering Transactions, 45, 367-372 DOI:10.3303/CET1545062

A.7.- Optimal design of domestic water-heating solar systems

Clean Techn Environ Policy (2015) 17:637–656
 DOI 10.1007/s10098-014-0818-4

ORIGINAL PAPER

Optimal design of domestic water-heating solar systems

Aurora de Fátima Sánchez-Bautista · José Ezequiel Santibañez-Aguilar ·
 José María Ponce-Ortega · Fabricio Nápoles-Rivera · Medardo Serna-González ·
 Mahmoud M. El-Halwagi

Received: 31 March 2014 / Accepted: 8 July 2014 / Published online: 5 August 2014
 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract This paper presents a multi-criteria optimization formulation for the optimal design of a water-heating system for homes. The proposed model accounts for the available solar radiation in the specific place where the solar collector is installed and the hot water demands. The goal is to target economic and environmental objectives by optimizing the design and operating conditions including the optimal hot water storage and distribution. The proposed model is applied to several scenarios for homes with different inhabitants and in various cities in Mexico. The results show that the location has significant effects on the optimal design and operation of the water-heating solar system.

Keywords Solar energy · Solar collector · Domestic heating water · Design · Optimization · Greenhouse gas emissions

List of symbols

A. F. Sánchez-Bautista · J. E. Santibañez-Aguilar ·
 J. M. Ponce-Ortega (✉) · F. Nápoles-Rivera ·
 M. Serna-González
 Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de
 San Nicolás de Hidalgo, Morelia 58060, Michoacán, México
 e-mail: jmponce@umich.mx

M. M. El-Halwagi
 Chemical Engineering Department, Texas A&M University,
 College Station, TX 77843, USA

M. M. El-Halwagi
 Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering
 Department, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University,
 80204, Jeddah 21589, Saudi Arabia

Parameters

α^{Boil}	Exponent for the capital cost for the boiler
α^{SC}	Exponent for the capital cost for the solar collector
α^{Tank}	Exponent for the capital cost for the hot water tank
β^{THW}	Design factor for the diameter associated to the hot water storage tank
ρ^{W}	Water density
τ^{aislant}	Thickness for the insulation associated to the tank
τ^{s}	Thickness for the iron associated to the hot water storage tank
$ASR_{t,m}^{\text{ava}}$	Available solar radiation
CF^{Boil}	Unit fixed cost associated to the boiler
CF^{SC}	Unit fixed cost associated to the solar collector
CF^{Tank}	Unit fixed cost for the hot water storage tank
C_p^{W}	Heat capacity for water
CV^{Boil}	Unit variable cost for the boiler
CV^{Fuel}	Unit cost for the fossil fuel
CV^{SC}	Unit variable cost for the solar collector
CV^{Tank}	Unit variable cost for hot water storage tank
D_m	Days per month
$F_{u,t,m}^{\text{Final}}$	Hot water demand for the different uses considered
FG	Conversion factor for the dimension of the devices
$F^{\text{TCW-max}}$	Maximum water flow rate for the storage tank for cold water

A.8.- A mixed-integer dynamic optimization approach for the optimal planning of distributed biorefineries

Computers and Chemical Engineering 80 (2015) 37–62



Contents lists available at ScienceDirect

Computers and Chemical Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compchemeng

A mixed-integer dynamic optimization approach for the optimal planning of distributed biorefineries



José Ezequiel Santibañez-Aguilar^a, Martín Rivera-Toledo^b, Antonio Flores-Tlacuahuac^{b,*},
José María Ponce-Ortega^a

^a Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^b Engineering and Chemical Sciences Department, Universidad Iberoamericana, Mexico City 01210, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 September 2014

Received in revised form 6 May 2015

Accepted 10 May 2015

Available online 17 May 2015

Keywords:

Biorefinery supply chain
Model predictive control
Dynamic optimization
Optimal planning

ABSTRACT

The implementation of supply chains based on biomass conversion requires the exploration of various aspects, including the selection of processing technologies, configuration of the supply chain, portfolio of products as well as the feedstock selection. One important feature of this system is that the composition of the available biomass changes drastically through the year because this depends significantly on the climatic conditions; this way, the dynamic behavior of this process is an important issue that must be considered. This study presents a dynamic optimization model for the optimal planning of a distributed biorefinery system taking into account the time dependence of the involved variables and parameters. In addition, this paper incorporates a model predictive control methodology to obtain the behavior of the storages and orders of the supply chain; where the objective function is the difference between the required and satisfied demands in the markets. Therefore, this study considers relevant issues, which include the multiple available biomass feedstocks at various harvesting sites, the availability and seasonality of biomass resources, potential geographical locations for processing plants that produce multiple products using diverse production technologies, economies of scale for the production technologies, demands and prices of multiple products in each consumer, locations of storage facilities and a number of transportation modes between the supply chain components. The model was applied to a case study for a distributed biorefinery system in Mexico. Results show that is possible to get the configuration and the behavior of the supply chain considering its dynamic behavior in a rigorous way; furthermore, the solutions obtained by the model illustrate that the supply chains based on biomass conversion are seriously affected by the availability of bioresources over the time.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Currently, the increasing demand of energy around the world and the problems related to the climate change caused by greenhouse gas emissions (GHGE) from burning fossil fuels have promoted the use of alternative energy sources such as biofuels (Clark et al., 2006). Biomass has gained considerable attention as feedstock for energy production because of its attractive characteristics, including its availability as a renewable resource, reduction of GHGE, creation of new infrastructure and the inherent flexibility of biomass to produce several products (biofuels, polymers, specialty chemicals, etc.). These reasons have motivated the research for synthesizing novel processing pathways or technologies associated to biorefineries.

Recently, the optimization of supply chains (SC) associated to biorefineries has gained a lot of attention (Shah, 2005). This way, Hosseini and Shah (2011) and Yue et al. (2014) described the key challenges and opportunities in modeling and optimization of biomass-to-bioenergy supply chains; they demonstrated that multi-scale modeling and optimization play an important role to address these challenges. Hosseini and Shah (2011) concluded that one of the key challenges in the field is to integrate the different components of supply chains without any prior assumption about the fundamental structure of the network.

* Corresponding author. Tel.: +52 55 59504074; fax: +52 55 59504074.
E-mail address: antonio.flores@ibero.mx (A. Flores-Tlacuahuac).

A.9.- Financial Risk Assessment and Optimal Planning of Biofuels Supply Chains under Uncertainty

Bioenerg. Res.
DOI 10.1007/s12155-016-9743-1



Financial Risk Assessment and Optimal Planning of Biofuels Supply Chains under Uncertainty

José Ezequiel Santibañez-Aguilar¹ · Gonzalo Guillen-Gosálbez^{2,3} ·
Ricardo Morales-Rodríguez⁴ · Laureano Jiménez-Esteller³ ·
Agustín Jaime Castro-Montoya¹ · José María Ponce-Ortega¹

© Springer Science+Business Media New York 2016

Abstract Biofuels provide an attractive alternative for satisfying energy demands in a more sustainable way than fossil fuels. To establish a biorefinery, an optimal plan must be implemented for the entire associated supply chain, covering such aspects as selection of feedstocks, location, and capacity of biorefineries, selection of processing technologies, production amounts and transportation flows. In this context, there are several parameters, including the availability of biomass, product demand, and product prices, which are difficult to predict because they might change drastically over the different seasons of the year as well as across years. To address this challenge, this work presents a mathematical programming model for the optimal planning of a distributed system of biorefineries that considers explicitly the uncertainty associated with the supply chain operation as well as the associated risk. The potential of the proposed approach is demonstrated through its application to the production of biofuels in Mexico, considering multiple raw materials and products.

Electronic supplementary material The online version of this article (doi:10.1007/s12155-016-9743-1) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ José María Ponce-Ortega
jnponce@umich.mx

¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

² Centre for Process System Engineering (CPSE), Imperial College London, London SW7 7AZ, UK

³ Departament d'Enginyeria Química, Universitat Rovira i Virgili, Av. Països Catalans 26, Tarragona 43007, Spain

⁴ Universidad de Guanajuato, Guanajuato 36050, Mexico

Keywords Biorefineries · Biofuels · Optimization · Supply chains · Financial risk · Uncertainty

Introduction

In the recent past, biomass has gained considerable attention as feedstock for the production of several products, especially for energy production through biorefineries [1]. Biofuels can be produced from selected agricultural biomass, proving a sustainable and eco-friendly energy option [2]. The implementation of biorefineries requires the analysis of several aspects, especially the biomass yield on the farm and the fuel production in the biorefinery because these two factors are the most powerful in determining the efficacy of a biofuel production system [3]. Other important factors include feedstock selection, processing routes, products, harvesting sites, processing facilities, and markets, which can be addressed through the optimization of the corresponding supply chain [4]. According to Georgiadis et al. [5], most of the reported approaches for designing supply chains have addressed decisions about the location of new facilities, selection of technologies, feedstocks, products, and distribution of feedstocks and products. In the context of biorefineries, several works on supply chain design have been developed. This way, Van Dyken et al. [6] presented a mixed-integer linear programming model (MILP) for designing biomass-based supply chains. Natarajan et al. [7] developed a model to determine the optimal locations of processing plants for methanol production. Shabani and Sowlati [8] studied the supply chain configuration of a forest biomass power plant. Lin et al. [9] presented a supply chain optimization model to minimize the annual bioethanol production cost, simultaneously considering

Published online: 12 May 2016



A.10.- Optimal design of residential cogeneration systems under uncertainty

Computers and Chemical Engineering 88 (2016) 86–102



Contents lists available at ScienceDirect

Computers and Chemical Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compchemeng

Optimal design of residential cogeneration systems under uncertainty



Luis Fabián Fuentes-Cortés, José Ezequiel Santibañez-Aguilar, José María Ponce-Ortega*

Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 23 June 2015

Received in revised form 27 January 2016

Accepted 8 February 2016

Available online 21 February 2016

Keywords:

CHP

Cogeneration

Housing complex

Uncertainty, Optimal design

ABSTRACT

This paper presents a multi-objective optimization method for designing cogeneration systems in residential complexes and accounting for the involved uncertainty. The model accounts for satisfying the hot water and electric energy demands in a residential complex, while minimizing the total annual cost and the associated greenhouse gas emissions. The proposed model incorporates uncertain data for the ambient temperature, energy demands and prices of the local energy market, which are predicted through forecasting methods for determining the financial and environmental risks. Furthermore, the model accounts for determining the type and size of the central cogeneration unit, thermal storage unit, the needed auxiliary units, as well as the operating conditions. A housing complex in central Mexico is presented as case study. The results show significant economic and environmental benefits for the implementation of the proposed scheme as well as the importance of accounting for the involved uncertainty.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The economic and environmental benefits yielded through the proper use of resources in the industrial sector have motivated the extension to residential complexes (Cucek et al., 2011; Terrazas-Moreno and Grossmann, 2011; Martin and Grossmann, 2012; Ahmetovic et al., 2014; Ibric et al., 2014; Abdelhady et al., 2015). This way, combined heat and power (CHP) systems have become an efficient alternative for supplying the needed power and heat in residential complexes. This is because CHP systems offer several advantages in terms of efficiency (Maghanki et al., 2013), environmental impact (Peacock and Newborough, 2005) and economic cost (De Paepe et al., 2006; Cravioto et al., 2014) compared with conventional systems. The design of cogeneration systems is determined by several factors, as the availability of natural resources that can feed the system (Tchanche et al., 2014), weather conditions (Lazos et al., 2014), energy demands (Alanne and Saari, 2004), available technologies (González et al., 2015) and the conditions and policies of the local energy market (Streimikiene and Baležentis, 2013). In this context, Collazos et al. (2009) proposed a method for management polygeneration systems. Zhou et al. (2013a) presented an economic assessment for distributing energy in a new residential area in China, and Zhou et al. (2013b) incorporated the impacts of the equipment size in designing cogeneration

systems. Fazlollahi et al. (2014) presented a multi-objective optimization approach for designing district energy systems. Recently, Fuentes-Cortés et al. (2015a,b) reported an optimization formulation for designing CHP systems for the residential sector; however, this approach did not account for the involved uncertainty in the system. It should be noticed that there are several uncertain factors involved in the design of CHP systems (Jradi and Riffat, 2014; Li and Ierapetritou, 2008). But, usually designing CHP systems is based on overage values of the parameters that represent significant uncertainty (Gamarra and Guerrero, 2015). Nevertheless, this approach is not the best way to account for the involved uncertainty, since the ambient temperature, the energy market prices and the energy demands are factors that have involved significant uncertainty in designing residential CHP systems (Houwing et al., 2008). These variables have been addressed separately for analyzing CHP systems in the residential sector. In this context, Barbieri et al. (2012) proposed a model to adjust the design of CHP systems to variable energy demands in dwellings. Fubara et al. (2014) studied the seasonal changes in energy demands. Rezvan et al. (2013) used Monte Carlo-based models for determining uncertain energy demands, and Al-Mansour and Kozuh (2007) analyzed the uncertain energy prices in the market. Ren and Gao (2010) presented an analysis for the variations of electricity price through a year. Rysanek and Choudhary (2013) accounted for the installation costs and annual electricity demand. Arnold and Yildiz (2015) incorporated Monte Carlo models for the prediction of energy prices in distributed generation systems. Carvalho et al. (2011) proposed a model to take into account the influence

* Corresponding author. Tel.: +52 443 3223500x1277.
E-mail address: jmponce@umich.mx (J.M. Ponce-Ortega).

A.11.- Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives



Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives

José Ezequiel Santibañez-Aguilar^a, Ricardo Morales-Rodríguez^b,
Janett Betzabe González-Campos^c, José María Ponce-Ortega^{a,*}

^a Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, 58060, Mexico

^b Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, Guanajuato, 36050, Mexico

^c Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio B1, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, 58030, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:
Received 17 December 2015
Received in revised form
29 March 2016
Accepted 29 March 2016
Available online xxx

Keywords:
Biorefinery
Supply chain
Optimization
Uncertainty
Biofuels

ABSTRACT

Biomass is a renewable resource that has attractive characteristics for energy production, but the corresponding supply chain could be subject of several uncertain factors that can affect drastically the optimal configuration, and those have not been properly accounted in previous publications. Therefore, this work presents a new approach for the optimal planning under uncertainty for a biomass conversion system involving simultaneously economic and environmental issues. The environmental impact was measured via the Eco-indicator99 method and the economic aspect was determined through the net annual profit. The proposed method considered the uncertainty involved in the raw material price by the stochastic generation of scenarios using the Latin Hypercube method followed by the implementation of the Monte-Carlo method, where a deterministic optimization problem was solved for each single scenario to select the structure of the more robust supply chain relying on statistical data. The proposed approach was applied to a case study for a distributed biorefinery system in Mexico. The results showed that the behavior of the profit values for the stochastic case is not associated to the behavior of the raw material price; also, it is possible to observe that the supply chain topology could be affected for the uncertainty in the raw material price; however, the environmental and economic objectives did not present significant changes.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

In recent years, biomass has been identified as a potential renewable energy source for production of biofuels, chemicals and other high value-added products using diverse processing technologies (Ng et al., 2015). Torjai et al. (2015) have stated that a serious discussion of the use of biomass for energy production should include the entire supply chain, and Liew et al. (2014) concluded that the use of biofuels has increased in the recent years, but it is still necessary to assess their potential impact on the economy, human health and environment before they could be implemented to replace the fossil fuels. Additionally, Akbari and Karimi (2015) indicated the importance of analyzing the entire supply chain for any process. For the specific case of supply chains

based on biomass, Shabani and Sowlati (2013) presented a study for a supply chain configuration based on forest biomass for producing power. Haankuku et al. (2015) proposed a mixed-integer programming model for determining the adequate price of the ethanol produced in a biorefinery, as well as the size and location of the processing plant. Moreover, a mathematical approach for the optimization of the operational decisions in the supply chain design was proposed by Yue and You (2014), and Ahn et al. (2015) developed a deterministic mathematical programming model for the strategic planning of a supply chain based on biodiesel production from microalgae.

The previous studies have considered that the biomass processing is accomplished through biorefinery systems; in this context, several works based on the biomass processing via biorefineries were discussed in a paper review published by Eskandarpour et al. (2015). It should be noted that the interest in the processing of biomass has been focused on its attractive characteristics from the social, environmental and economic points of

* Corresponding author. Tel.: +52 443 3223500x1277.
E-mail address: jmponce@umich.mx (J.M. Ponce-Ortega).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.168>
0959-6526/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Please cite this article in press as: Santibañez-Aguilar, J.E., et al., Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives, Journal of Cleaner Production (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.168>

A.12.- Mathematical optimization of a supply chain for the Production of fuel pellets from residual biomass

Clean Techn Environ Policy
DOI 10.1007/s10098-016-1257-1



ORIGINAL PAPER

Mathematical optimization of a supply chain for the production of fuel pellets from residual biomass

Manuel Alejandro Méndez-Vázquez¹ · Fernando Israel Gómez-Castro¹ · José María Ponce-Ortega² · Alma Hortensia Serafín-Muñoz³ · José Ezequiel Santibañez-Aguilar² · Mahmoud M. El-Halwagi⁴

Received: 8 April 2016 / Accepted: 14 July 2016
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract One of the main concerns of humankind in the last years is the availability of energy sources. Research has been focused on finding clean and renewable ways to satisfy the energy demand worldwide. In the particular case of the state of Guanajuato, Mexico, clay industry burns each year about 15,000 m³ of fuel oil and residual oils, and 96,000 t of wood derivatives. As a way to reduce the environmental impact of clay industry, the use of solid fuel pellets, obtained from vegetable residual material, is proposed. The raw material for the pellets is obtained from agribusiness and from the cities of the state. The solid biofuel has high density, low content of humidity, a homogeneous shape and high energy density. Nevertheless, special care must be taken about the location of the production facility and hubs, in order to make the production of the biofuel economically feasible. Furthermore, to have an environmentally friendly fuel, the supply chain and the production process must minimize the global

environmental impact. In this work, a mathematical programming model is proposed to determinate the optimal location of the production facilities, the hubs, and the best distribution logistics. The problem is modelled using a general disjunctive programming approach, and then relaxed into a mixed-integer non-linear programming (MINLP) problem. It has been determined that the main plant should be located in the city of Irapuato, while secondary plants must be established in the cities of León, Irapuato, Abasolo and Salamanca. Moreover, it has been estimated that, when the residual biomass is converted into pellets, about 72,548 t/year of equivalent CO₂ are avoided in the main plant, together with 24,182 of equivalent CO₂ avoided per secondary facility.

Keywords Solid biofuel · Pellet · Supply chain optimization · Mathematical programming

List of symbols

Variables

Absorbed _w [t year ⁻¹]	Carbon dioxide absorbed by trees
COST _{RM} [USD]	Cost of raw material
COST _{TRANS} [USD]	Cost of transport of raw material
COST _{PROC} [USD]	Cost of processing raw material
C _C [USD year ⁻¹]	Capital cost
C _{OP} [USD year ⁻¹]	Operational cost
G _P [kg h ⁻¹]	Production rate
C _{eq} [USD]	Cost of equipment
CO _{2, Base} [t year ⁻¹]	Emissions of carbon dioxide for the base case
CO _{2, scenario} [t year ⁻¹]	Emissions of carbon dioxide when using pellets

✉ Fernando Israel Gómez-Castro
fgomez@ugto.mx

¹ Campus Guanajuato, División de Ciencias Naturales y Exactas, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta S/N Col. Noria Alta, 36050 Guanajuato, GTO, Mexico

² División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Múgica S/N, 58060 Morelia, MICH, Mexico

³ Campus Guanajuato, División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Guanajuato, Av. Juárez No. 77, 36000 Guanajuato, GTO, Mexico

⁴ The Artie McFerrin Department of Chemical Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3122, USA

Published online: 23 July 2016

