



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



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

**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE BIOREFINERÍAS  
SUSTENTABLES**

**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:**

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EN  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**ASESOR: DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA**

**Morelia, Michoacán**

**Febrero de 2013**



Asunto: Aprobación de Impresión de Tesis

Ing. Roberto Chávez Pérez  
Jefe del Departamento de Titulación de la  
U.M.S.N.H.  
P r e s e n t e.-

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 ÓPTIMA DE BIOREFINERÍAS SUSTENTABLES”** después de haber revisado el manuscrito que presentó el Ingeniero **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.

**A t e n t a m e n t e.**

**Morelia, Michoacán a 06 de Febrero de 2013.**

Presidente o Asesor: Dr. José María Ponce Ortega 03002829

Vocales:

Dr. Agustín Jaime Castro Montoya 01000179

Dr. Medardo Serna González 89000676

Dr. Luis Ignacio Salcedo Estrada 90001567

Dra. Janett Betzabe González Campos 11000015

c.c.p.



**DEPARTAMENTO DE POSGRADO**

Facultad de Ingeniería Química / Universidad San Nicolás de Hidalgo  
Francisco J. Mujica S/N / Col. Felicitas del Río / C.P. 58060 / Morelia, Michoacán / Tel. y Fax: 443- 327 3584  
<http://posgrado.fiq.umich.mx/>

**RESUMEN**  
**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA DE BIOREFINERÍAS SUSTENTABLES**

Por

José Ezequiel Santibañez Aguilar

Febrero del 2013

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

El presente trabajo aborda la planificación óptima de biorefinerías enfocado a sistemas distribuidos considerando diferentes criterios de sustentabilidad. En un primer caso de estudio se aborda la planificación y calendarización de un sistema distribuido de biorefinerías basado en múltiples alimentaciones, tomando como objetivos el impacto ambiental global, el número de empleos generados y la ganancia neta anual, interactuando en un horizonte de tiempo establecido. Los resultados muestran que es posible generar información para la toma de decisiones a partir de curvas Pareto resaltando la relación entre los diferentes objetivos. Además, se muestra que es posible obtener de manera óptima la configuración de la cadena de suministro como la localización de lugares de suministro, plantas de procesamiento y mercados, así como, la selección de materias primas, tecnologías de procesamiento y productos. Por otro lado, se aborda la remoción del lirio acuático de los cuerpos de agua ya que éste provoca un gran daño al ecosistema. En este sentido, se propone un sistema distribuido de biorefinerías en donde se puede obtener una gama de productos provenientes de la biomasa y el aprovechamiento del agua procedente del lirio, los objetivos considerados son una función objetivo económica, el porcentaje de lirio acuático removido o la cantidad de agua limpia producida a partir del lirio, en este caso la sustentabilidad es considerada por la obtención de beneficios económicos, ambientales y sociales por la eliminación de agentes dañinos en los cuerpos de agua y la posibilidad de realizar actividades humanas en los cuerpos de agua afectados generando empleos en los sitios de cosecha, los resultados muestran que es posible realizar la limpieza de los cuerpos de agua infestados con lirio de una manera económicamente atractiva por la consideración de un sistema distribuido con la capacidad de producir un conjunto de productos propios de la biomasa además de la producción de agua limpia que ayudan a satisfacer demandas dadas en sitios de consumo específicos. La solución del problema selecciona los sitios de procesamiento, cosecha, distribución y consumo de la cadena de suministro así como, las cantidades de materia prima y productos junto con sus rutas de procesamiento.

## ÍNDICE

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Resumen .....</b>  | <b>iii</b>  |
| <b>Lista de tablas .....</b>  | <b>vi</b>   |
| <b>Lista de figuras .....</b>   | <b>viii</b> |
| <b>Agradecimientos .....</b>  | <b>xii</b>  |
| <b>Capítulo 1.- Introducción.....</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1 Generalidades .....   | 1           |
| 1.2 Justificación .....   | 8           |
| 1.3 Hipótesis .....   | 10          |
| 1.4 Objetivo general.....   | 10          |
| 1.5 Objetivos específicos .....   | 10          |
| <b>Capítulo 2.- Marco Teórico .....</b>   | <b>11</b>   |
| 2.1 Antecedentes.....   | 15          |
| <b>Capítulo 3.- Metodología.....</b>  | <b>17</b>   |
| 3.1 Planeación óptima de sistemas distribuidos de biorefinerías considerando aspectos<br>ambientales, económicos y sociales ..... | 17          |
| 3.2 Sistema distribuido de biorefinerías basado en el aprovechamiento de lirio acuático .....                                     | 34          |
| <b>Capítulo 4.- Resultados .....</b>  | <b>54</b>   |
| 4.1 Definición del primer caso de estudio y discusión de resultados .....   | 54          |
| 4.2 Definición del segundo caso de estudio y discusión de resultados.....   | 72          |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Conclusiones.....</b>  | <b>88</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>  | <b>90</b> |
| <b>Apéndices .....</b>  | <b>96</b> |
| A.1 Código en lenguaje gams del modelo para la planeación óptima<br>de sistemas distribuidos de biorefinerías considerando aspectos<br>ambientales, económicos y sociales ..... | 96        |
| A.2 Código en lenguaje gams del modelo para un sistema distribuido<br>de biorefinerías basado en el aprovechamiento de lirio acuático.....                                      | 114       |

## LISTA DE TABLAS

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Tabla 4.1</b>  | Factores de conversión de material prima a producto para las diferentes rutas de procesamiento .....                  | 55 |
| <b>Tabla 4.2</b>  | Costo, Eco-indicador <sup>99</sup> unitario y empleos generados por unidad de biomasa producida.....                  | 56 |
| <b>Tabla 4.3</b>  | Disponibilidad de las materias primas a lo largo del año para los diferentes lugares de suministro considerados ..... | 57 |
| <b>Tabla 4.4</b>  | Demanda de etanol en cada Mercado a lo largo del año para el escenario considerado (Ton/año) para el año 2012.....    | 59 |
| <b>Tabla 4.5</b>  | Demanda de biodiesel en cada Mercado a lo largo del año para el escenario considerado (Ton/año) para el año 2012..... | 60 |
| <b>Tabla 4.6</b>  | Eco-indicador <sup>99</sup> para el uso de los productos considerados .....   | 60 |
| <b>Tabla 4.7</b>  | Parámetros para el transporte de productos desde las plantas de procesamiento a los mercados.....                     | 61 |
| <b>Tabla 4.8</b>  | Datos para el transporte de productos desde la planta principal a las plantas de procesamiento secundarias.....       | 62 |
| <b>Tabla 4.9</b>  | Biomasa disponible en cada cuerpo de agua a partir del lirio acuático .....   | 73 |
| <b>Tabla 4.10</b> | Demanda para cada producto en cada lugar de consumo .....   | 74 |

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Tabla 4.11</b> | Demanda de agua para los consumidores de agua y máxima concentración de contaminante.....  | 74 |
| <b>Tabla 4.12</b> | Eficiencia para remover contaminantes para cada tecnología considerada .....   | 75 |
| <b>Tabla 4.13</b> | Eficiencias para tecnologías de procesamiento.....   | 75 |
| <b>Tabla 4.14</b> | Costos de transporte para la biomasa desde las fuentes de lirio acuático hasta las plantas de procesamiento. (Basado en un costo constante de transporte de \$US 0.079/ (ton km) para transportar biomasa por carretera..... | 76 |

## LISTA DE FIGURAS

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <b>Figura 1.1</b> | Panorama de la utilización de formas alternas de energía combinadas con combustibles fósiles .....   | 1  |
| <b>Figura 1.2</b> | Representación de la velocidad de emisión de CO <sub>2</sub> por la producción de químicos y combustibles a partir de petróleo y biomasa.....    | 2  |
| <b>Figura 1.3</b> | Representación de las diferencias entre una biorefinería y una refinería basada en petróleo .....  | 3  |
| <b>Figura 1.4</b> | Consideración de múltiples tipos de biomasa y conjunto de factores para realizar una evaluación .....  | 4  |
| <b>Figura 1.5</b> | Representación de la consideración de caja negra en un proceso químico específico asociando un factor global de eficiencia.....                  | 5  |
| <b>Figura 1.6</b> | Representación general de un sistema de producción distribuido para el procesamiento de la biomasa .....   | 6  |
| <b>Figura 2.1</b> | Cuatro dimensiones de la sustentabilidad.....  | 11 |
| <b>Figura 2.2</b> | Cambio de un problema de optimización multi-objetivo a un problema de un objetivo para la utilización del método “constraint”.....               | 13 |
| <b>Figura 2.3</b> | Representación general de la generación de una curva Pareto .....  | 14 |
| <b>Figura 3.1</b> | Representación esquemática del problema abordado para un sistema distribuido de biorefinerías considerando variabilidad a través del tiempo..... | 18 |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| <b>Figura 3.2</b> | Representación de la calendarización por la metodología de redes de tareas y estados, con evaluación económica, ambiental y social .....                          | 19 |
| <b>Figura 3.3</b> | Representación general de los balances de masa realizados en las diferentes localidades consideradas .....  | 21 |
| <b>Figura 3.4</b> | Representación del uso potencial del lirio acuático a partir de los cuerpos de agua .....   | 35 |
| <b>Figura 3.5</b> | Superestructura para una cadena de suministro distribuida basada en lirio acuático .....  | 36 |
| <b>Figura 3.6</b> | Representación para una cadena de suministro distribuida basada en lirio acuático .....   | 37 |
| <b>Figura 3.7</b> | Proceso general para la obtención de etanol a partir de lirio acuático .....  | 40 |
| <b>Figura 3.8</b> | Proceso MixAlco a partir de lirio acuático .....  | 40 |
| <b>Figura 3.9</b> | Proceso general para digestión anaerobia a partir de lirio acuático para producir biogás.....   | 41 |
| <b>Figura 4.1</b> | Definición de lugares para el caso de estudio propuesto: <b>a)</b> Lugares de suministro, <b>b)</b> Mercados, <b>c)</b> Plantas de procesamiento .....            | 54 |
| <b>Figura 4.2</b> | Representación general de la variabilidad de la disponibilidad de biorecursos y demanda de productos a lo largo de la época del año para un lugar específico .... | 56 |
| <b>Figura 4.3</b> | Curvas Pareto para la maximización de la ganancia neta anual y la minimización del impacto ambiental global .....   | 63 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <b>Figura 4.4</b>  | Análisis de la proporción del número de empleos generados considerando diferentes ganancias mínimas .....  | 64 |
| <b>Figura 4.5</b>  | Curvas Pareto para la maximización del número de empleos generados y la Minimización del impacto ambiental global.....   | 65 |
| <b>Figura 4.6</b>  | Curvas Pareto para la maximización del número de empleos generados y la Maximización de la ganancia neta anual .....   | 66 |
| <b>Figura 4.7</b>  | Curvas Pareto para la maximización del número de empleos asociados y la minimización del impacto ambiental considerando varias penalizaciones por demanda insatisfecha ..... | 67 |
| <b>Figura 4.8</b>  | Representación para la cadena de suministro seleccionada en la solución del Punto A de la Figura 4.5 .....   | 68 |
| <b>Figura 4.9</b>  | Alimentaciones utilizadas para producción de etanol en las diferentes plantas de procesamiento para la solución del punto A. a) Vista general, b) Zoom de la figura. ....    | 69 |
| <b>Figura 4.10</b> | Alimentaciones utilizadas para la producción de biodiesel en las diferentes plantas de procesamiento para la solución A. ....  | 70 |
| <b>Figura 4.11</b> | Distribución de etanol para la solución del punto A.....   | 71 |
| <b>Figura 4.12</b> | Distribución de biodiesel para la solución del punto A .....   | 71 |
| <b>Figura 4.13</b> | Representación esquemática del caso de estudio propuesto .....   | 72 |
| <b>Figura 4.14</b> | Procedimiento general de solución para resolver el problema MINLP generado .   | 78 |

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| <b>Figura 4.15</b> | Curvas Pareto para la alternativa 1 .....   | 79 |
| <b>Figura 4.16</b> | Curvas Pareto para la alternativa 2 .....   | 80 |
| <b>Figura 4.17</b> | Representación de la eliminación individual de lirio acuático en cada cuerpo de agua .....  | 81 |
| <b>Figura 4.18</b> | Distribución de las demandas satisfechas de productos en diferentes lugares de consumo para lo puntos de las Figuras 4.15 y 4.16 .....                    | 83 |
| <b>Figura 4.19</b> | Curvas Pareto para una alta cantidad de agua extraída proveniente del lirio acuático .....  | 84 |
| <b>Figura 4.20</b> | Curvas Pareto para una baja cantidad de agua extraída proveniente del lirio acuático .....  | 85 |
| <b>Figura 4.21</b> | Distribución de los cuerpos de agua y consumidores de agua seleccionados para los diferentes puntos en las curvas Pareto de las Figuras 4.19 y 4.20 ..... | 86 |

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a **Dios** por brindarme la oportunidad de realizar el logro de concluir una Maestría en Ciencias, el cual me proporcionó ayuda de múltiples formas y a través de múltiples personas a las cuales es un placer agradecer.

Quiero agradecer a mi padre el **Sr. Reynaldo Santibañez Velázquez**, el cual muchas veces me ha dicho que no sabe lo que hago, pero me apoya en mis decisiones, además, aunque no ha podido estar presente en muchos momentos importantes, siempre lo ha estado en espíritu y con apoyo en las situaciones que lo he necesitado.

También quiero agradecer a mi madre la **Sra. Gloria Aguilar Dueñas**, la cual no ha estado de acuerdo, en muchos de los viajes que he realizado, y en mi estadía ciudad de Morelia, pues he sacrificado tiempo valioso de convivencia con ella, aunque siempre ha deseado lo mejor para mí.

Una de mis inspiraciones más importantes son mis amigos: **Idelfonso, Cuauhtémoc y Jarol**, los cuales me han inspirado para superarme pues siempre han creído en mí y me han animado en tantas charlas que hemos tenido. Ellos me han brindado, techo y alimento en momentos difíciles, pero sobre todo su apoyo incondicional. Hemos concretados tantos proyectos juntos, aunque nos falta uno y ellos saben de qué se trata.

Como olvidar a mis amigos de la licenciatura que se han mantenido hasta la Maestría **Uriel, Arianna y Maru**, con los cuales he pasado momentos agradables y los cuales me han ayudado cuando se los he pedido.

A mi novia **Aurora** le agradezco por su apoyo y entendimiento por el tiempo sacrificado y ayuda en la realización del trabajo, ella nunca me negó ayuda y aunque hemos pasado momentos difíciles los hemos superado juntos.

A mi asesor el **Dr. José María Ponce Ortega** el cual me ha brindado su confianza y apoyo en la realización de mi tesis de licenciatura y ahora en mi tesis de maestría, él me ha forjado en mis inicios en la investigación y me ha dirigido para la elaboración de frutos palpables de mi trabajo.

Al **Dr. Medardo Serna González**, el cual me ha apoyado siempre que le he pedido su apoyo y se ha preocupado por mi desempeño, gracias a él conocí a mi actual asesor. A mis sinodales, la **Dra. Betzabe González Campos**, el **Dr. Agustín Castro Montoya** y el **Dr. Luis Ignacio Salcedo** por sus correcciones que ayudaron a pulir este trabajo mejorando su contenido y calidad.

Un agradecimiento especial al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por el apoyo otorgado para la realización de estudios de Maestría, así mismo, a la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo** y la **Universidad de Texas A&M** por ser instituciones que me abrieron sus puertas para mi preparación académica y como investigador.

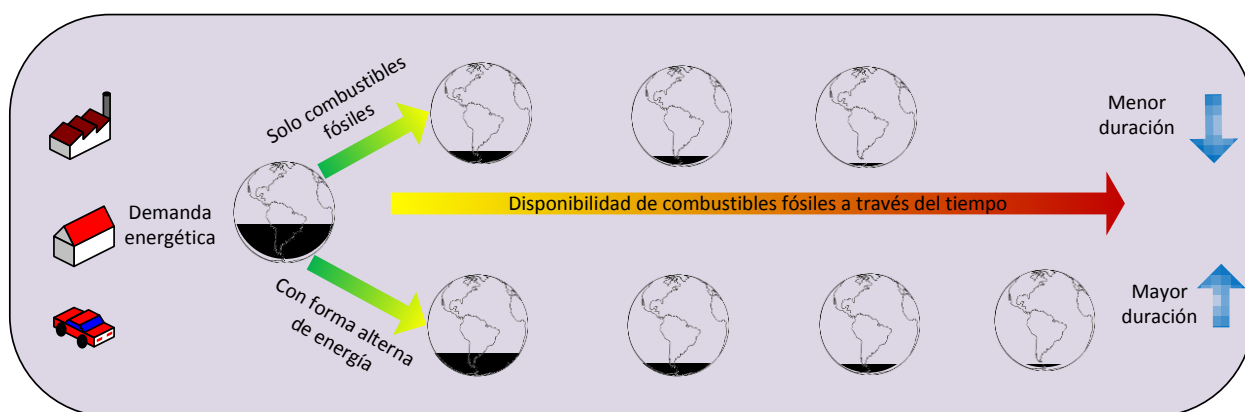
**JOSÉ EZEQUIEL SANTIBAÑEZ AGUILAR**

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se abordan las generalidades del proyecto, como lo son las diferencias entre una biorefinería y una refinería convencional. Además, se contextualiza el problema del uso de los combustibles fósiles, las metodologías utilizadas, y la evaluación de cadenas de suministro. Por otro lado, se incluye de manera general una pequeña descripción de cada apartado del presente trabajo de investigación.

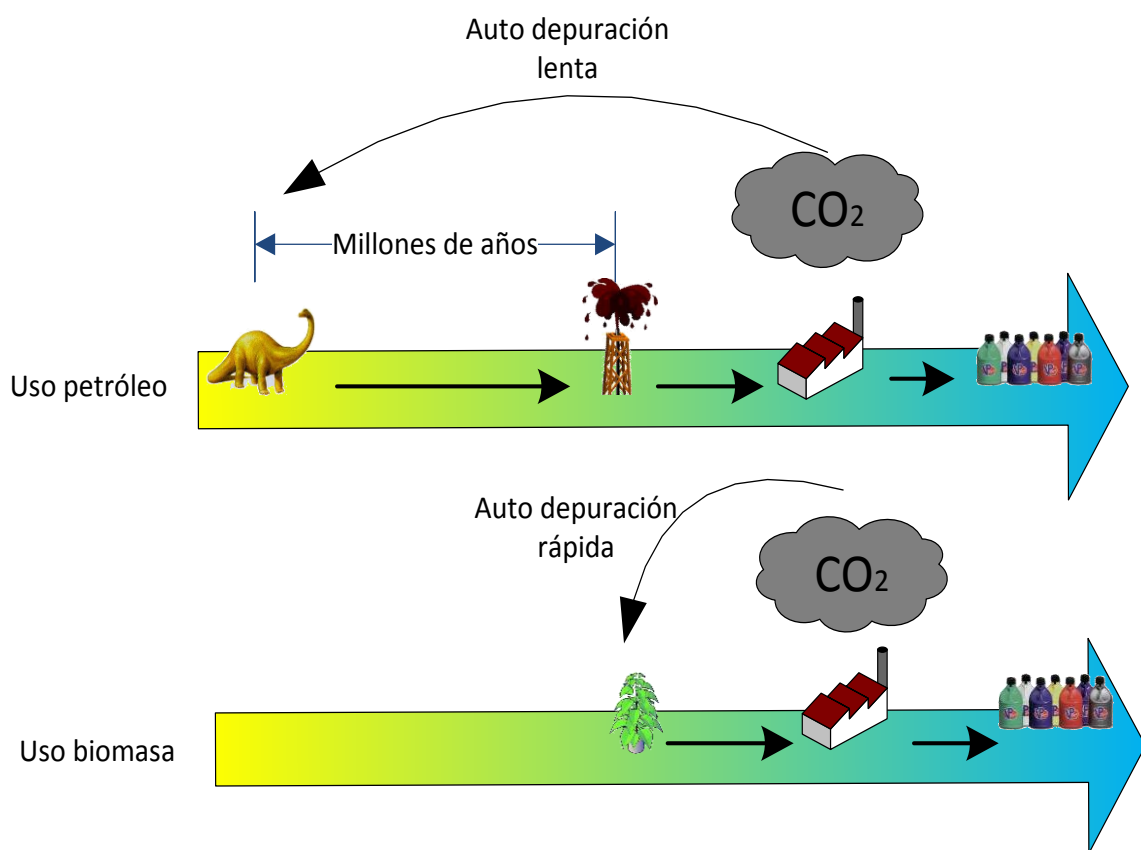
## 1.1 Generalidades

En la actualidad, el costo de los combustibles fósiles ha aumentado conforme el precio del petróleo y a su vez, no se conoce su disponibilidad para los próximos años. Es por ello que se han investigado formas alternas de producción de energía, para poder solventar la necesidad en el abastecimiento de la misma, ya que actualmente se sigue dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles. El uso de formas alternas de energía se ha enfocado en complementar la demanda energética, es decir, el uso simultáneo de combustibles fósiles y otra forma de producción de energía, con ello se busca prolongar el tiempo de vida de los combustibles provenientes del petróleo como se muestra en la Figura 1.1 y a largo plazo tratar de sustituirlos completamente.



**Figura 1.1 Panorama de la utilización de formas alternas de energía combinadas con combustibles fósiles**

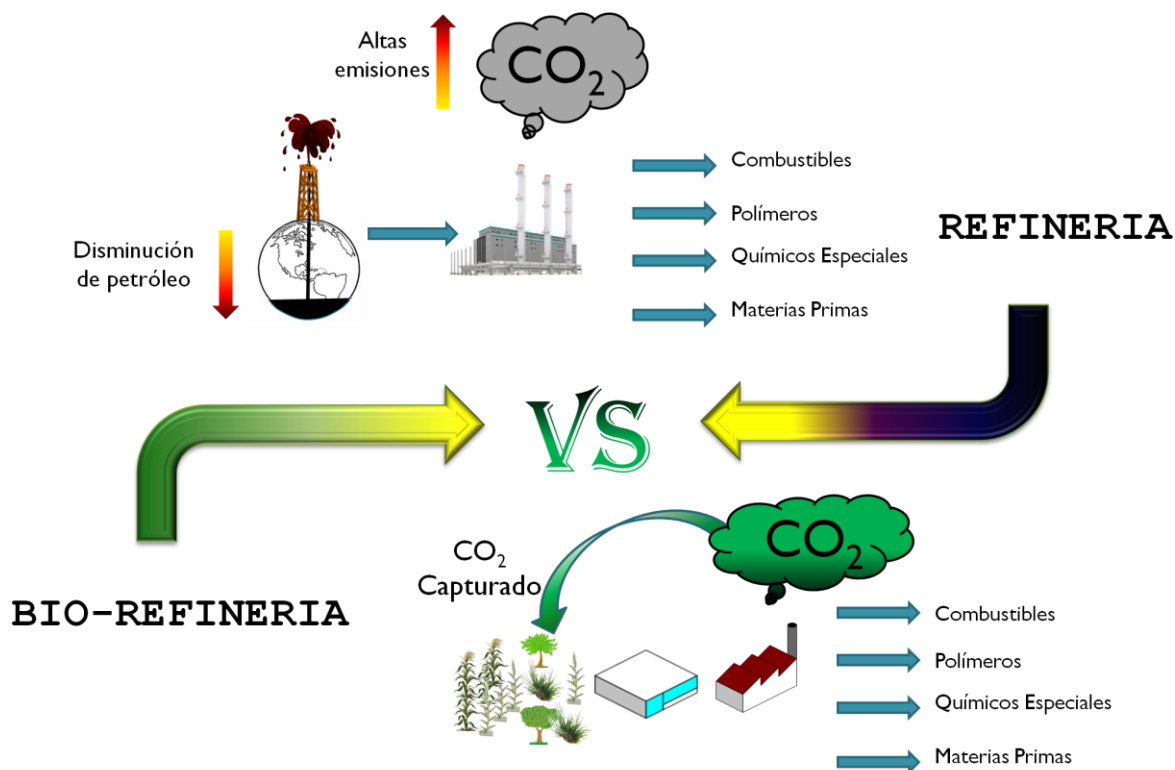
Una de las opciones más aceptadas es el uso de la biomasa, la cual puede llegar a garantizar la sustentabilidad energética y ambiental, pues reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente de  $\text{CO}_2$ , la diferencia se basa en que para la formación del petróleo se requieren millones de años, es decir, periodos geológicos por lo que la autodepuración del ambiente es lenta. Por otro lado, el periodo de formación de biomasa es rápido, por lo que durante su formación ésta puede capturar el  $\text{CO}_2$  generado por el procesamiento de la misma, contribuyendo en gran medida a una autodepuración rápida del ambiente, haciendo que las emisiones netas de gases de efecto invernadero tiendan a cero (ver Figura 1.2).



**Figura 1.2 Representación de la velocidad de emisión de  $\text{CO}_2$  por la producción de químicos y combustibles a partir de petróleo y biomasa.**

La biomasa es procesada en una planta de procesamiento llamada biorefinería, en comparación con la refinería de petróleo; una de las principales diferencias entre una biorefinería y una refinería es el tipo de materia prima empleada, lo que afecta directamente a la cantidad

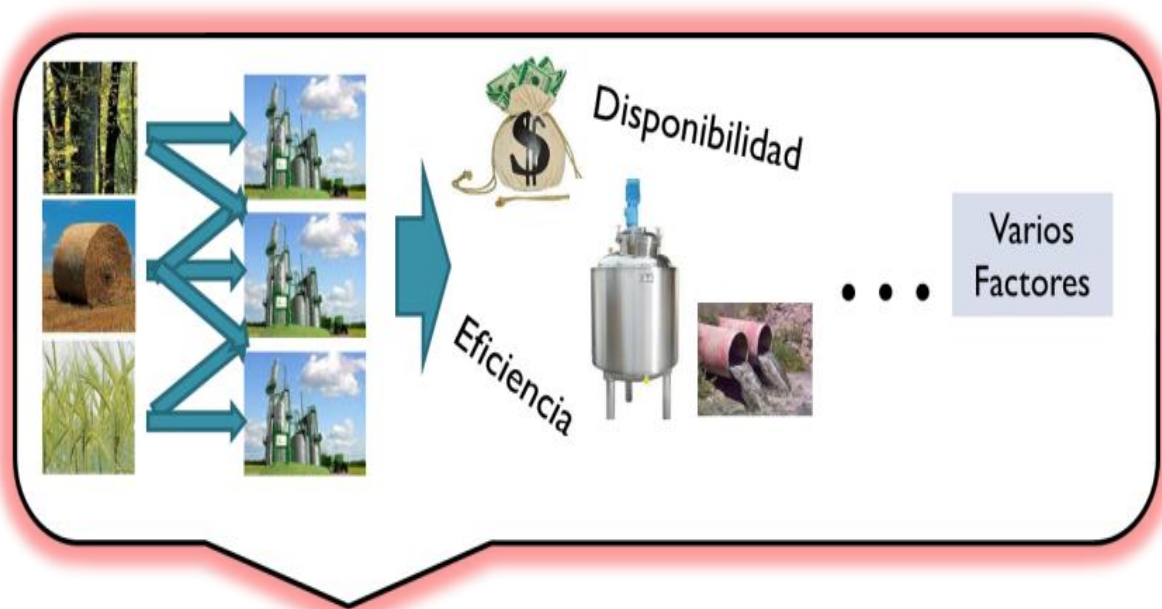
emitida de gases de efecto invernadero a la atmósfera, ya que aunque las dos utilizan una fuente de carbón (biomasa y petróleo) la época en la cual éste fue capturado afecta de tal forma que la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitida al ambiente provenientes, del petróleo es carbón que fue capturado hace millones de años y se emite a una velocidad impresionante, en cambio la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitida proveniente de la biomasa es la misma que es capturada cuando ésta es formada, esto es mostrado en la Figura 1.3.



**Figura 1.3 Representación de las diferencias entre una biorefinería y una refinería basada en petróleo**

Además, es de suma importancia tomar en cuenta diferentes alternativas de biomasa para evitar el desabasto de alimentos y no afectar las regiones que tienen como propósito la agricultura. Simultáneamente, existen varias tecnologías para la conversión de biomasa que compiten entre sí, y han sido objeto de estudio, algunas de ellas están siendo utilizadas actualmente. Cada una de estas tecnologías tiene su propio costo y eficiencia, además de sus límites de procesamiento, consecuentemente éstas son susceptibles a ser evaluadas en cuanto a su viabilidad técnico-económica, así como su impacto ambiental y social asociado. Lo cual es mostrado en la Figura 1.4.

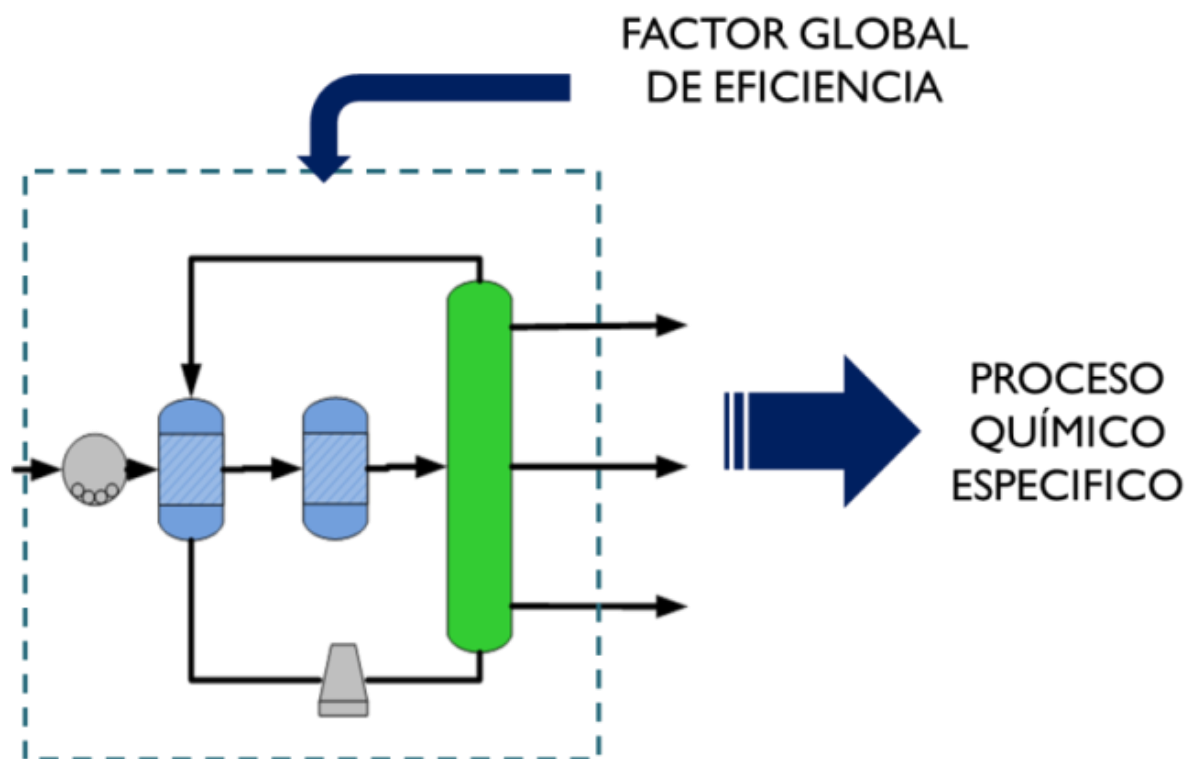
Algunos autores han mostrado que la producción de etanol a partir de materiales lignocelulósicos es una alternativa más viable comparada con el consumo de combustibles fósiles (Akgul y col., 2011; Ganguly y col., 2012; Goyal y col., 2008; Mishima y col., 2008; Zamboni y col., 2009a; 2009b; Zhu y Jones, 2009), unida a la ventaja de que los materiales lignocelulósicos no son alimentos para los humanos.



## EVALUACIÓN TÉCNICO, ECONÓMICA, AMBIENTAL Y SOCIAL

**Figura 1.4 Consideración de múltiples tipos de biomasa y conjunto de factores para realizar una evaluación**

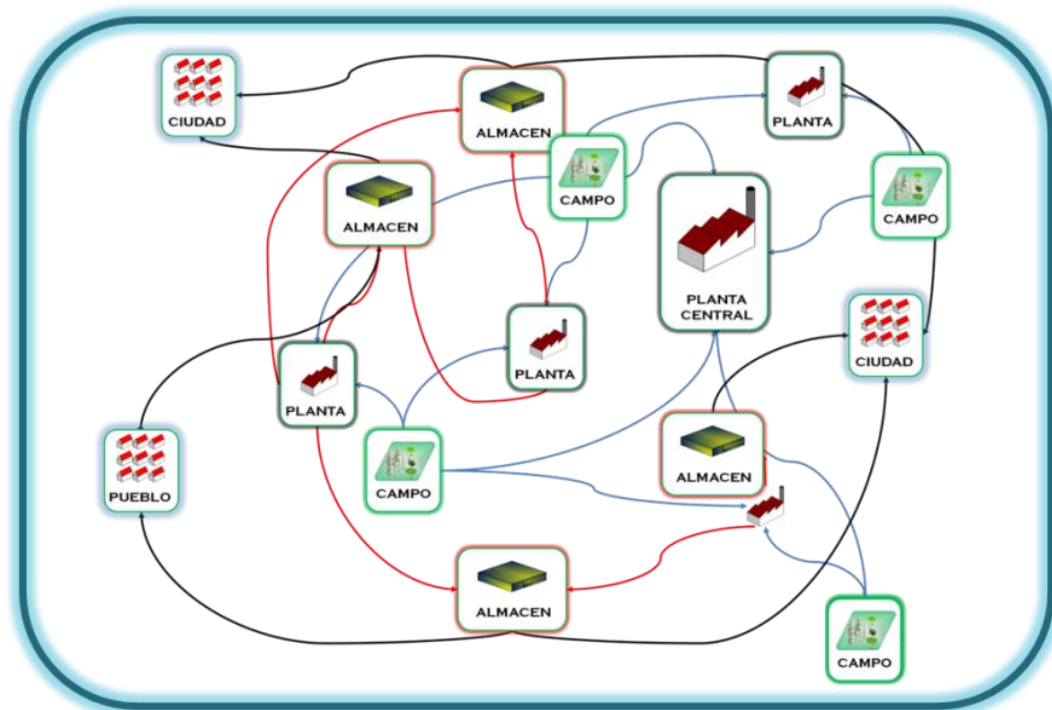
Para analizar la eficiencia de la conversión de masa y energía, se han usado modelos del tipo de caja negra, ya que los procesos pueden llegar a ser muy complejos de modelar pues implican etapas de reacción, mezclado, separación, cambio de presión, entre otras. (Mansoornejad y col., 2010; Santibañez-Aguilar y col., 2011; Sammons y col., 2007). El uso de una caja negra facilita el modelado pues en lugar de considerar todas las etapas involucradas se asocia a una sola etapa por medio de un factor de eficiencia, lo cual facilita el modelado de algún proceso específico (ver Figura 1.5).



**Figura 1.5 Representación de la consideración de caja negra en un proceso químico específico asociando un factor global de eficiencia**

Por otra parte, se ha observado que la consideración de sistemas distribuidos puede disminuir costos de transporte, pre-procesamiento, y en general, en la cadena de producción (Bowling y col., 2011; Aviso y col., 2011; You y col., 2011; You y Wang, 2011). Sin embargo, para decidir si es conveniente o no implementar un sistema de producción distribuido se debe desarrollar una metodología donde se consideren esquemas centralizados y distribuidos simultáneamente y el resultado arroje la mejor opción analizando los diferentes objetivos de interés. En este contexto, la consideración de un sistema distribuido para el aprovechamiento de la biomasa puede ser empleado donde existan varios lugares de producción de materias primas, procesamiento, y venta de productos que puedan interactuar entre sí como se muestra en la Figura 1.6.

El presente trabajo propone la planificación de biorefinerías sustentables considerando diferentes criterios de sustentabilidad para ello, además, se toma en cuenta la posibilidad de instalar sistemas distribuidos para la disminución de costos en la cadena de producción.



**Figura 1.6 Representación general de un sistema de producción distribuido para el procesamiento de la biomasa**

El Marco Teórico se presenta en el Capítulo 2, el cual contiene la descripción de las cuatro dimensiones de la sustentabilidad, la solución de un problema de optimización multi-objetivo por medio del método *constraint*, así como, una explicación del Eco-Indicador99, el cual es usado para la medición del impacto ambiental global de cualquier sustancia, proceso o actividad, también se incluyen algunos trabajos de investigación que sirven como base para la presente investigación.

El Capítulo 3 aborda la metodología empleada en la presente investigación, la cual es dividida en dos casos de estudios. El primero trata sobre la planificación y selección óptima de la configuración de un sistema de producción distribuido basado en biomasa, éste problema considera las cuatro dimensiones de la sustentabilidad para medir la sustentabilidad del sistema. El primer aspecto es el económico, el cual es considerado normalmente para la evaluación de cadenas de suministro. Éste aspecto se toma en cuenta por medio de la maximización de la ganancia neta anual, considerando los costos de transporte, procesamiento, almacenamiento de las materias primas y productos, así como, los costos de los insumos requeridos, considerando el precio de venta de los productos obtenidos. El segundo objetivo considerado es la minimización

del impacto ambiental global, el cual es medido por medio del Eco-Indicador<sup>99</sup> basando en la metodología del análisis del ciclo de vida. La tercera meta considerada es la posibilidad de maximizar el número de empleos de la cadena productiva para considerar un aspecto social. Finalmente, el último aspecto tomado en cuenta es la interacción de los objetivos en un horizonte de tiempo considerado, para poder extrapolar los resultados a cualquier periodo de tiempo. La relación entre los objetivos muestra que algunos de ellos se oponen entre sí (impacto ambiental y ganancia, ganancia y número de empleos, número de empleos e impacto ambiental), y que deben de considerarse en forma conjunta todas las opciones para generar la información necesaria para la toma de decisiones acerca de cómo debe ser la localización de los distintos lugares (suministro, procesamiento y consumo), materias primas empleadas y productos obtenidos para proveer los mayores beneficios que engloben aspectos ambientales, económicos y sociales. Por otro lado, se tratan aspectos de porqué es importante la consideración de la variabilidad de parámetros respecto del tiempo.

La segunda sección del Capítulo 3 trata acerca de la optimización de un sistema distribuido de biorefinerías que basan su producción en lirio acuático, pues éste es una de las principales plagas que afectan los cuerpos de agua. En este caso de estudio se consideran aspectos para la sustentabilidad del sistema, sin embargo son considerados de una manera diferente al caso anterior. Un primer aspecto es la minimización de una función objetivo económica, la cual considera el costo de las diferentes actividades como son: la cosecha, el procesamiento, el transporte, el tratamiento de agua, así mismo, el precio referente a los diferentes productos que son vendidos en los lugares de consumo. El segundo objetivo es la consideración del aspecto ambiental por medio de la maximización del lirio eliminado de los cuerpos de agua, ya que con el aprovechamiento del mismo se eliminan contaminantes y ayuda a la sustentabilidad ambiental de los cuerpos de agua, además, esta función cumple un segundo propósito, ya que al ser utilizado el lirio acuático se promueven actividades humanas en los cuerpos de agua ayudando a activar la economía, con la generación de empleos en los sitios de cosecha.

En el Capítulo 4 se realiza una presentación y discusión de los resultados obtenidos, los cuales para el caso del lirio acuático muestran que ambos objetivos pueden o no estar contrapuestos (la ganancia total puede aumentar o disminuir con el porcentaje de lirio eliminado) dependiendo de la cantidad de lirio eliminado. También proporcionan la configuración de la

cadena de suministro y muestran que es posible obtener soluciones para el aprovechamiento del lirio acuático que sean económicamente atractivas considerando un esquema similar.

Una manera adicional de considerar la sustentabilidad en sistemas distribuidos, es la implementación de los mismos en refinerías basadas en residuos sólidos municipales, ya que éstos residuos al ser mezclados producen un problema enorme de contaminación, generando cantidades monumentales de basura, la cual mediante una adecuada recolección y separación puede ser aprovechada para producir diversos productos útiles para la sociedad, satisfaciendo demandas de éstos productos no necesariamente en el lugar donde los residuos son generados. Este planteamiento puede ayudar a mitigar el problema ambiental y generar beneficios económicos, además de sociales por la mayor duración de los rellenos sanitarios así como, la generación de empleos en las diferentes actividades consideradas (recolección, producción y transporte).

## 1.2 Justificación

El uso de la biomasa como una fuente alternativa de energía se ha estudiado anteriormente, mostrando que pueden disminuir los gases de efecto invernadero, en especial del CO<sub>2</sub>; sin embargo, la biomasa tiene la particularidad de no estar disponible todo el tiempo, además, de competir su uso para producir energía con algún otro; principalmente como alimento.

Así mismo, las demandas específicas de productos provenientes de la biomasa son variables de acuerdo a la estación del año. Por otro lado, si se busca implementar un sistema de producción basado en biomasa, se debe de tomar en cuenta que las capacidades de producción de las plantas para el procesamiento de la biomasa son diferentes entre sí, así como la localización de los lugares de consumo y producción, es decir, sistemas distribuidos.

Por otro lado, la planificación y calendarización de un sistema distribuido debe considerar criterios ambientales, económicos y sociales para garantizar la sustentabilidad del sistema. Por ello es necesario implementar una metodología para calendarizar y planificar simultáneamente la producción de productos a partir de la biomasa considerando criterios de sustentabilidad, logrando con ello el mejor aprovechamiento de la misma. Con esto se propicia un mejor uso de los recursos considerando su disponibilidad y demanda de productos asociados durante varios periodos de tiempo.

Otro de los problemas que más afecta nuestro entorno, es la contaminación de los cuerpos de agua, pues cada vez es menor la cantidad de agua dulce con la que se dispone, en consecuencia disminuye la cantidad de agua potable. Estos cuerpos de agua deben ser explotados en mayor cantidad para satisfacer las necesidades humanas, sin embargo, muchos de ellos se infestan de plagas y contaminantes haciendo el proceso de extracción de agua económicamente inviable.

La remoción de plagas de los cuerpos de agua es una forma de considerar la sustentabilidad, pues se considera la eliminación de un agente dañino al ambiente, es decir, un beneficio ambiental, además de un beneficio social pues propicia que estas plagas no afecten las actividades humanas llevadas a cabo en la zona. Por otro lado, si se toma en cuenta un proceso de producción considerando como materia prima este agente dañino, se puede ayudar a obtener también beneficios económicos.

En este sentido, uno de las principales plagas que aquejan los cuerpos de agua es el lirio acuático debido a su rápido crecimiento, haciendo muy difícil el control del mismo. El lirio acuático consume los nutrientes disueltos en el agua, afectando la vida silvestre y algunas actividades humanas como la pesca.

Se han utilizado algunas tecnologías para la eliminación del lirio acuático, sin embargo, la mayoría de estas no son económicamente atractivas, es por ello que se ha buscado el aprovechamiento de esta planta mediante su uso como materia prima para la producción de combustibles y otros productos químicos, desgraciadamente estos métodos de aprovechamiento han sido planteados de manera aislada sin considerar el aprovechamiento integral del lirio acuático dentro de toda la cadena de suministro.

Un producto importante adicional que se puede obtener a partir del lirio acuático es agua; la cual, al ser extraída del lirio acuático tiene algunos contaminantes, estos contaminantes pueden ser separados para producir agua “limpia” y aprovechar de una mejor manera el lirio acuático.

### 1.3 Hipótesis

Mediante el uso de modelos para la planificación y calendarización óptima de sistemas distribuidos de producción de biorefinerías es posible obtener procesos sustentables; considerando criterios sociales, ambientales, económicos y estacionales.

### 1.4 Objetivo general

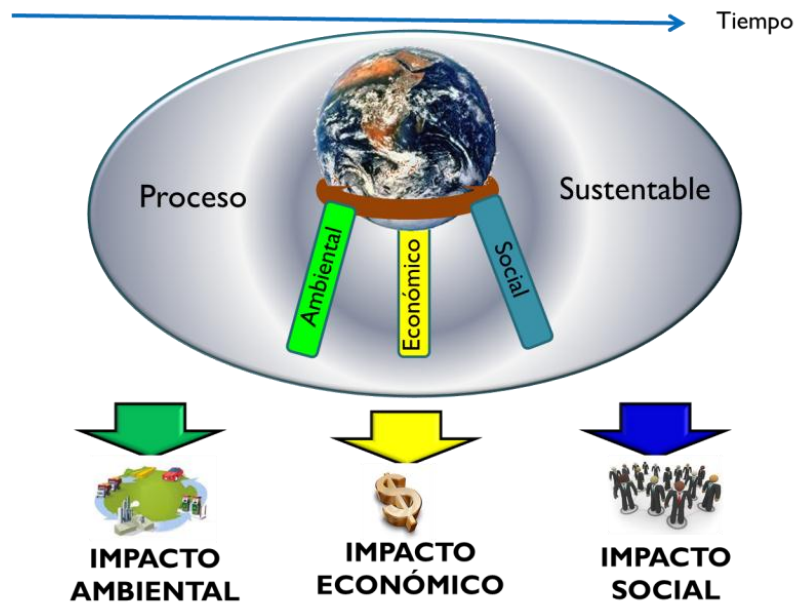
El objetivo general del presente proyecto de investigación es desarrollar y aplicar modelos para la planificación y en su caso calendarización de sistemas distribuidos de biorefinerías basado en múltiples tipos de alimentaciones enfocado a resolver problemas ambientales, sociales y económicos.

### 1.5 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo mixto entero lineal (MILP) con apoyo de la metodología de Redes de Tareas y Estados para la calendarización de la producción en una biorefinería.
- Considerar de distintas maneras la dimensión ambiental de la sustentabilidad, en un primer caso de estudio por medio del eco-indicador99 basado en el análisis del ciclo de vida y en un segundo caso por medio de porcentaje de reducción de algún agente dañino al ambiente.
- Incluir el impacto social para el desarrollo de un sistema de biorefinerías considerando el número de empleos asociados.
- Resolver el modelo por medio de un algoritmo multi-objetivo para observar el compromiso entre el beneficio económico, el impacto ambiental y social, además de la eliminación de un agente dañino.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Un proceso sustentable es aquel que puede ser llevado a cabo a través del tiempo indefinidamente, en este sentido se han buscado maneras de medir la sustentabilidad de un proceso, en donde uno de los criterios más aceptados para medir la sustentabilidad es el que considera las cuatro dimensiones de la sustentabilidad (Lozano, 2008; 2012), las cuales se conforman por una dimensión económica, social, ambiental y del tiempo (Ver Figura 2.1).



**Figura 2.1 Cuatro dimensiones de la sustentabilidad**

La primera dimensión de la sustentabilidad considera el impacto económico, pues si en un proceso no se toma en cuenta el factor económico es muy difícil que éste pueda llevarse a cabo generación tras generación, es decir, se busca que el proceso estudiado sea rentable dentro de los límites aceptados.

Por otro lado, existe una segunda dimensión la cual considera el impacto ambiental, debido a que todo ambiente tiene una capacidad de autodepuración dada, es decir, si el ambiente sufre alguna alteración es capaz de revertirla hasta un cierto límite, de esta manera se busca que un sistema sea reproducible una y otra vez pues no creará alteraciones a su sistema.

Existen múltiples maneras de considerar la dimensión ambiental, una de las más aceptadas es la medida del impacto ambiental por medio del Eco-indicador99 (Geodkoop y

Spriensma, 2001), el cual está basado en el análisis del ciclo de vida y se puede aplicar a una sustancia, un proceso o una actividad. El Eco-indicador99 es un método enfocado al daño, es por ello que se divide en tres categorías principales de daño (daño a la salud humana, daño al ecosistema y daño a los recursos), las cuales se subdividen en once categorías de impacto, las cuales se muestran a continuación:

1. Daño a la salud humana debido a:
  - a. Sustancias carcinógenas
  - b. Sustancias orgánicas que dañen en la respiración
  - c. Sustancias inorgánicas que dañen en la respiración
  - d. Cambio climático
  - e. Agotamiento de la capa de ozono
2. Daño al ecosistema debido a:
  - a. Sustancias eco tóxicas
  - b. Acidificación y eutrofización
  - c. Uso y conversión de la tierra
3. Daño a los recursos por la extracción de:
  - a. Recursos minerales
  - b. 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.

La tercera dimensión de la sustentabilidad considera lo referente a la sociedad, pues la sociedad es capaz de decidir si algún proceso o actividad deben de continuar en base a los beneficios que ésta pueda recibir, como pueden ser los empleos generados, la seguridad, el aumento del ingreso per cápita, el mejoramiento de la salud, la demanda de agua abastecida, etc.

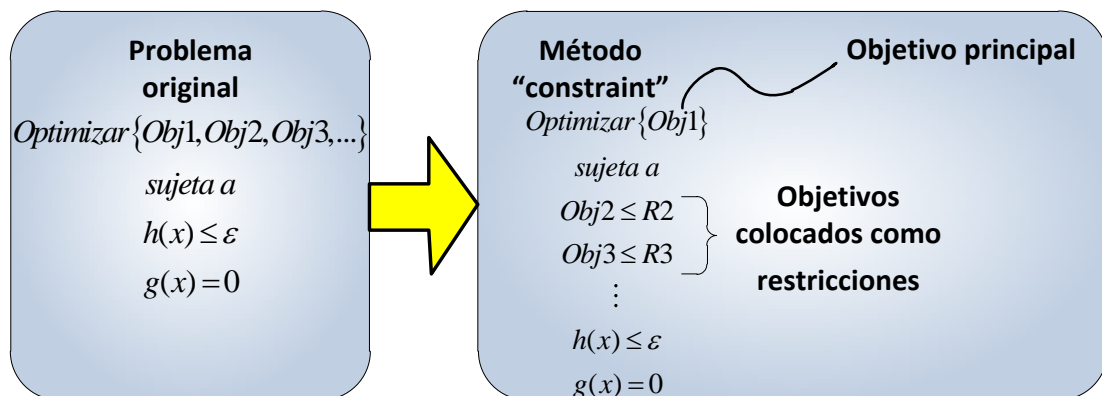
Por último, se considera la dimensión temporal, ya que las otras tres dimensiones deben de ser extrapoladas en el tiempo para poder hablar de sustentabilidad global; sin embargo, muchas veces el efecto que causa la implementación de algún proceso o actividad es difícil de cuantificar en todas sus dimensiones, más aun, las interacciones entre ellas. Es por ello que en un

problema donde se considere la sustentabilidad se debe de diseñar alguna metodología para observar las interacciones entre las diferentes dimensiones y el compromiso entre ellas.

La selección de la “mejor” solución a partir de un conjunto de soluciones implica el uso de técnicas de optimización, las cuales pueden aplicarse para una o varias funciones objetivos; para observar el compromiso y relación entre varios objetivos o dimensiones se debe utilizar una técnica de optimización multi-objetivo. Un problema de optimización multi-objetivo es un problema de decisión que puede ser descrito como 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, los cuales 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 “*constraint*” el cual se basa en la selección de un objetivo como el objetivo principal y la formulación de los otros objetivos como restricciones, como se muestra en la Figura 2.2.



**Figura 2.2 Cambio de un problema de optimización multi-objetivo a un problema de un objetivo para la utilización del método “constraint”**

Una vez que se elige el objetivo principal se procede a la optimización (maximización o minimización) del objetivo seleccionado dejando los otros objetivos libres para producir el mejor valor del objetivo principal y obtener un límite; a continuación se selecciona uno de los otros objetivos para optimizarlo y obtener la “peor” solución del objetivo principal (si los objetivos se contraponen). Luego el problema para la optimización del objetivo principal es resuelto varias veces, con el fin de generar una curva Pareto (ver Figura 2.3), el problema está sujeto a las restricciones de los otros objetivos, así como, las restricciones propias del problema de optimización. Cada vez que el modelo es resuelto, se obtiene un punto de la curva Pareto.

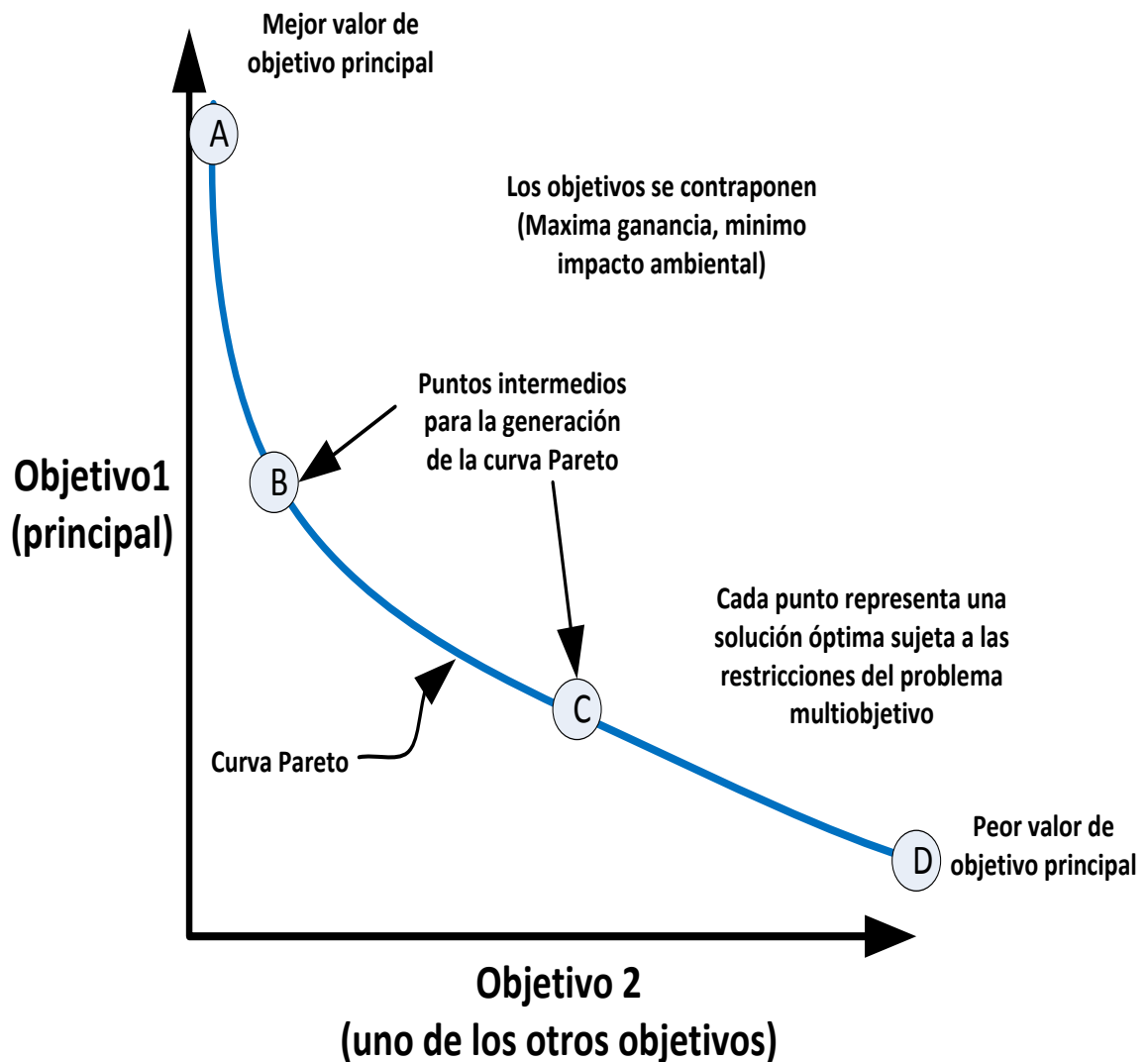


Figura 2.3 Representación general de la generación de una curva Pareto

## 2.1 Antecedentes

La generación de productos de alto valor agregado a partir de la biomasa se ha estudiado por múltiples autores, entre los que se encuentran Akgul y col. (2011), Goyal y col. (2008), Zamboni y col. (2009a, 2009b) y Zhu y Jones (2009). El caso del lirio acuático ha sido estudiado de manera especial ya que se trata de una plaga que afecta fuertemente los cuerpos de agua. El lirio acuático ha sido visto como una buena materia prima para la producción de biocombustibles por trabajos como Bhattacharya y Kumar (2010), Gunnardsson y Petersen (2007) y Malik (2007). En este contexto, Isarankura-Na-Ayudhya y col. (2007), Ganguly y col. (2012), Mishima y col. (2008) y Nigam (2002) han sugerido la producción de etanol a partir de lirio acuático con altos rendimientos. Chanakya y col. (1993), Cheng y col. (2010), Chuang y col. (2011), O'Sullivan y col. (2010) y Singhal y Rai (2003) reportaron datos para la obtención de biogás proveniente de lirio acuático, además, el lirio acuático puede ser usado como materia prima para el proceso MixAlco ((Forrest y col., 2010).

Por otro lado, el estudio de los procesos productivos se basa principalmente en la consideración de una materia prima. Sin embargo, Mansoornejad y col. (2010) y Santibañez-Aguilar y col. (2011) han propuesto la utilización de múltiples materias primas para la planificación de los sistemas de producción en biorefinerías. En este contexto, el modelado de los procesos puede verse complicado si se consideran las etapas completas del mismo, en este sentido, Sammons y col. (2007, 2008) propusieron una estructura flexible para la obtención óptima de las cantidades de producto en una biorefinería como caja negra.

Además, la producción de biocombustibles ha sido muy cuestionada, debido al impacto negativo que puede tenerse por el uso de materias primas de grado alimenticio, por lo cual, este impacto debe ser evaluado. En este sentido, Chouinard-Dussault y col. (2011) propusieron la incorporación de la integración de procesos al análisis del ciclo de vida para la producción de biocombustibles, así mismo, Santibañez-Aguilar y col. (2011) realizaron una evaluación de un sistema de producción de biocombustibles considerando múltiples objetivos. Ng (2010) presentaron una metodología para la síntesis de una biorefinería integrada. Por otro lado, Lozano (2012) presentó una visión para la evaluación de sistemas sustentables por medio de dimensiones de sustentabilidad, después Lozano (2012) utilizó estas dimensiones para evaluar varios procesos productivos de diferentes compañías.

Recientemente se ha optado no sólo por la evaluación de los procesos productivos sino también por la evaluación de la cadena de suministro completa; por lo cual, trabajos como los de Akgul y col. (2011), Aviso y col. (2011), You y col. (2011), You y Wang (2011) han realizado estudios sobre la planificación de cadenas de suministro. Además, Bowling y col. (2011) consideraron las economías de escala para la optimización de la localización de biorefinerías en un sistema distribuido.

En la mayoría de las cadenas de suministro, las demandas de productos, disponibilidad de materia prima y costos no están fijos, por lo que Castro y Grossmann (2006) presentaron una metodología para la calendarización de plantas industriales por medio de un modelo MILP. También, Maravelias y Grossmann (2003) presentaron una formulación para la calendarización de plantas batch con la metodología de redes de estados y tareas. Sin embargo, las alternativas implementadas para el tratamiento del lirio acuático no han sido efectivas, principalmente por que no son económicamente rentables, es por ello que en el presente proyecto se propone un sistema distribuido para el uso del lirio acuático considerando la posibilidad de obtener múltiples productos que sean importantes en la región donde el lirio es extraído para satisfacer las demandas de los mismos.

Además, en cuanto a los sistemas de producción distribuidos, no se ha presentado la evaluación de los sistemas desde un punto de vista de la sustentabilidad que considere la interacción de las cuatro dimensiones de la sustentabilidad, es decir, aspectos ambientales, económicos, y sociales con una constante dependencia del tiempo, pues en éste tipo de procesos, ni la demanda, producción, cantidad de materia prima o producto son constantes a través del tiempo.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

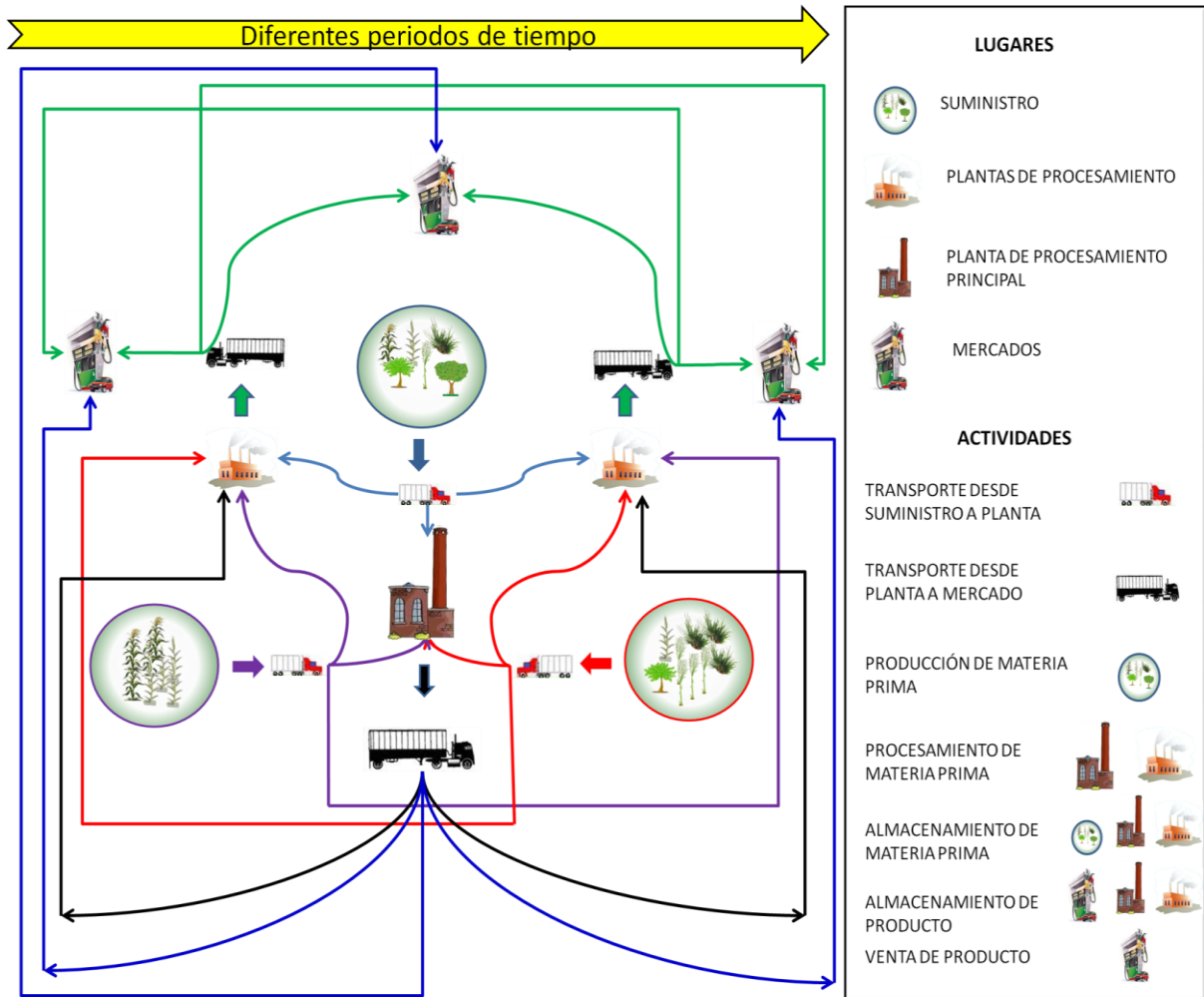
La metodología se ha dividido en dos secciones; la primera aborda la planificación de un sistema distribuido de biorefinerías, considerando aspectos económicos, ambientales y sociales. Además, la segunda sección se basa en proponer un sistema distribuido de biorefinerías basado en el tratamiento de los cuerpos de agua por la eliminación del lirio acuático. Los principales apartados en las metodologías son la definición del problema, formulación del modelo matemático y una estrategia de solución para ambos problemas abordados.

### 3.1 Planeación óptima de sistemas distribuidos de biorefinerías considerando aspectos ambientales, económicos y sociales

El problema abordado en el presente capítulo puede ser definido como un conjunto de biorecursos  $M$  disponibles en regiones geográficas específicas con características dadas; donde cada biorecurso tiene una disponibilidad que depende de la temporada del año y tiene asociado un costo, impacto ambiental e impacto social unitario. Además, a partir de los biorecursos  $M$  es posible obtener un conjunto de productos  $K$  los cuales son producidos a través de varias rutas de procesamiento  $R$ , cada producto puede ser vendido y consumido en distintas regiones y diferente época del año. Las rutas de procesamiento  $R$  tienen asociado un cierto costo de procesamiento que depende de los límites máximos y mínimos para el procesamiento en cada tecnología.

En base a lo anterior se plantea un sistema distribuido donde las materias primas  $M$  son producidas en el conjunto de lugares de suministros  $H$  de acuerdo a la época del año, éstas materias primas pueden ser almacenadas en los lugares de suministro o bien ser transportadas hasta las plantas de procesamiento  $PH$ , cabe señalar que además de las plantas de procesamiento secundarias existe una planta de procesamiento principal con mayor capacidad y menor costo de procesamiento que las anteriores, con el fin de considerar un sistema centralizado en combinación con un sistema distribuido para observar cual resulta ser la mejor opción. Una vez que la materia prima se encuentra en las plantas de procesamiento puede ser almacenada para un uso futuro, procesada para la obtención de un producto final o intermedio, o bien transportada a la planta de procesamiento principal para su eventual uso. Cuando la materia prima se transforma en los productos  $K$ , lo hace a través de múltiples rutas de procesamiento  $R$ , las cuales tienen asociados ciertos parámetros como el costo, límites y subproductos. El producto  $K$  producido en

cada una de las plantas de procesamiento secundarias *PH* y principal puede ser almacenado o bien transportado hasta los lugares de venta y consumo de mismo conforme a una demanda dada en cada uno de los lugares de consumo *MK*. La superestructura que define de manera gráfica el problema es mostrada en la Figura 3.1.



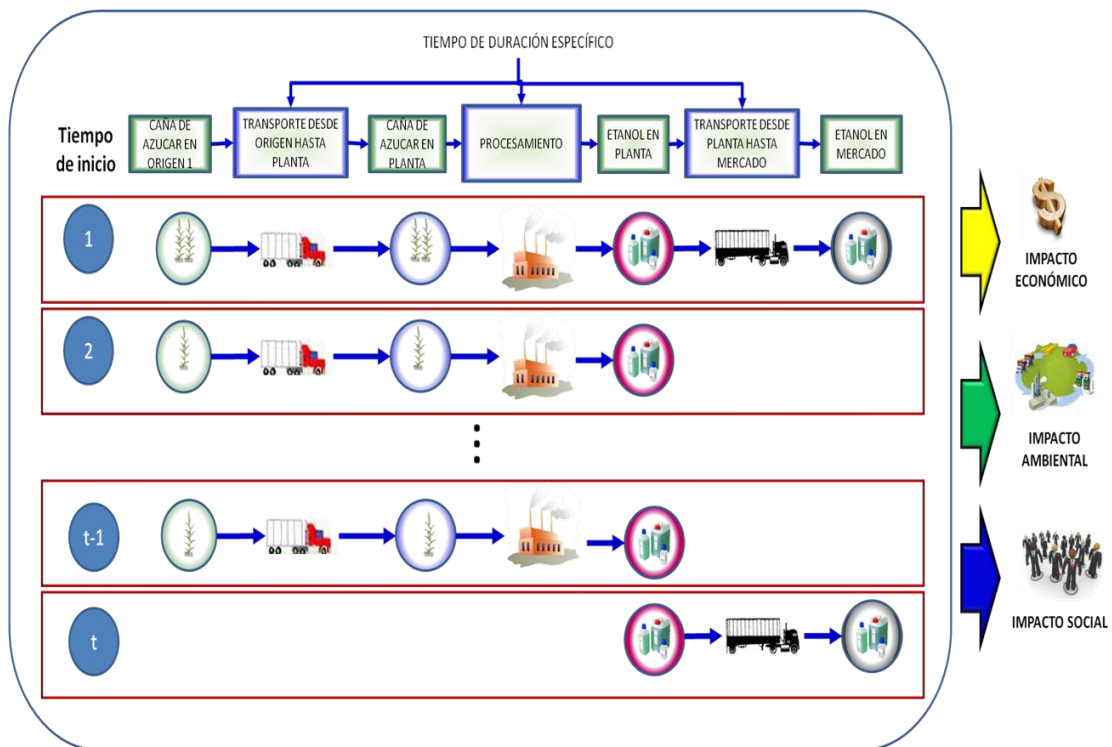
**Figura 3.1 Representación esquemática del problema abordado para un sistema distribuido de biorefinerías considerando variabilidad a través del tiempo**

El objetivo es determinar la configuración óptima para la planificación del sistema distribuido de biorefinerías considerando la estacionalidad, compensando las cuatro dimensiones de la sustentabilidad, es decir, los objetivos económico, ambiental y social a través del tiempo. En este contexto, la solución óptima debe de responder las siguientes preguntas:

- ¿Qué biorecursos deben ser usados?
- ¿A partir de donde y cuando deben de ser suministrados los recursos?

- ¿Qué tecnologías de procesamiento se deben seleccionar y donde deben de estar ubicadas?
- ¿Dónde debe ser procesada la materia prima?
- ¿Cuál es la ganancia neta obtenida?
- ¿Cuál es el impacto social asociado a la cadena de suministro en el sistema de biorefinerías?

El problema está basado en la metodología de redes de tarea y estados (Castro y Grossmann, 2006; Maravelias y Grossmann, 2003) para la representación de sistemas distribuidos. En esta metodología los estados representan los distintos materiales en los diferentes lugares, es decir si una misma materia prima se encuentra en lugar de suministro y en una planta de procesamiento son diferentes estados por estar en diferentes lugares y diferente tiempo. Por otro lado, las tareas son todas las actividades que consumen un tiempo dado y se encuentran entre cada estado. Cada actividad tiene asociada una variable binaria para definir si la actividad es llevada a cabo, éstas variables binarias dependen del tiempo. Además cada actividad tiene asociados distintos parámetros para medir su impacto social, ambiental y económico. Este comportamiento de la metodología es mostrada en la Figura 3.2.



**Figura 3.2 Representación de la calendarización por la metodología de redes de tareas y estados, con evaluación económica, ambiental y social**

Para la calendarización por medio de esta metodología, se puede considerar que la materia prima puede ser producida y transportada hacia las plantas de procesamiento en un tiempo 1, procesada en un tiempo mayor y finalmente los productos distribuidos a los diferentes mercados en un tiempo  $n$ , lo cual conformaría una cadena de producción con un tiempo de inicio 1 y un tiempo de fin  $n$ , además se puede llevar a cabo otra cadena de producción con diferentes tiempos de inicio y fin, e incluso diferentes actividades, cantidades y materiales (Ver Figura 3.2). El conjunto de todas estas cadenas de producción representa la calendarización global del sistema.

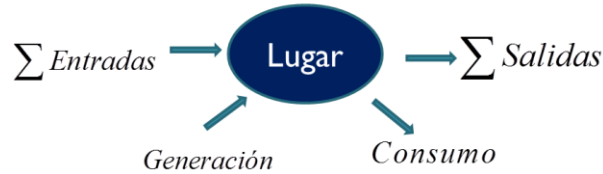
### 3.1.1 Formulación del modelo

Para poder entender el modelo antes hay que definir los principales índices para las ecuaciones:  $m$  corresponde a los biorecursos,  $k$  representa a los productos,  $r$  indica las distintas rutas de procesamiento y  $t$  es un índice especial para indicar el periodo de tiempo. Por otra parte, existen índices para indicar diferentes lugares, es decir, los lugares donde se llevan a cabo las actividades de la cadena de suministro, en este caso  $h$  representa el lugar donde la materia prima puede ser producida,  $ph$  indica los lugares donde la materia prima es procesada para transformarla a los productos, existe un lugar de procesamiento especial, el cual no requiere índice porque solo es uno y se diferencia de los demás, este lugar es la planta de procesamiento principal, con la cual se podría considerar un sistema centralizado, sin embargo el sistema es una combinación de un sistema distribuido con uno centralizado. También se considera un índice  $mk$  para representar los lugares donde los productos son vendidos y consumidos. Además, existen superíndices para poder diferenciar algunas variables, por ejemplo variables de entrada y de salida.

El modelo contiene varias ecuaciones realizadas en los distintos lugares donde las actividades son realizadas, las principales son las referidas a balances de materia (Materia prima y producto) así como ecuaciones para el transporte, procesamiento, restricciones de factibilidad y técnicas como los límites máximo y mínimo para las actividades, cálculos de costos, restricciones de demanda, etc., además, funciones objetivos que consideran las cuatro dimensiones de la sustentabilidad. Los balances de masa están basados en una Ecuación general que contempla la sumatoria de todas las entradas, salidas así como las cantidades generadas y consumidas en un

lugar dado, también toma en cuenta que la cantidad existente en un lugar en un tiempo dado está en función de la cantidad almacenada en un tiempo anterior (Ver Figura 3.3)

$$\text{Acumulación} = \theta(\text{Acumulación previa})$$



**Figura 3.3 Representación general de los balances de masa realizados en las diferentes localidades consideradas**

### 3.1.1.1 Balances de materia en lugares de suministro

Para cada lugar de suministro  $h$ , la cantidad de materia prima  $m$  acumulada al final del periodo  $t$  ( $M_{m,h,t}^{\text{suministro}}$ ) es igual a la cantidad de materia prima al final del periodo de tiempo anterior ( $M_{m,h,t-1}^{\text{suministro}}$ ), más la cantidad de materia prima producida hasta el final del periodo de tiempo  $t$  ( $M_{m,h,t}^{\text{producida}}$ ), menos la cantidad de materia prima transportada desde los lugares de suministro hasta las plantas de procesamiento ( $M_{m,h,ph,t}^{\text{suministro-plantas}}$ ,  $M_{m,h,t}^{\text{suministro-principal}}$ ).

$$M_{m,h,t}^{\text{suministro}} = M_{m,h,t-1}^{\text{suministro}} + M_{m,h,t}^{\text{producida}} - \sum_{ph} M_{m,h,ph,t}^{\text{suministro-plantas}} - M_{m,h,t}^{\text{suministro-principal}}, \quad \forall m \in M, h \in H, t \in T \quad (3.1.1)$$

### 3.1.1.2 Balances de materia en plantas de procesamiento secundarias

Para tomar en cuenta las economías de escala, se propone aprovechar las ventajas del procesamiento en plantas secundarias, las cuales son plantas de procesamiento distribuidas en una determinada región geográfica para disminuir los costos de transporte para las materias primas y productos, estas ecuaciones son definidas en los apartados siguientes.

#### 3.1.1.2.1 Materia prima en plantas de procesamiento secundarias.

La cantidad de materia prima  $m$  acumulada al final del periodo de tiempo  $t$  en la planta secundaria de procesamiento  $ph$  ( $M_{m,ph,t}^{\text{plantas}}$ ), es igual a la cantidad de materia prima almacenada en la planta de procesamiento en un periodo previo ( $M_{m,ph,t-1}^{\text{plantas}}$ ), más la cantidad de materia prima que

es recibida desde los lugares de suministro de materia prima  $h$  ( $Me_{m,h,ph,t}^{suministro-plantas}$ ), menos la cantidad de materia prima procesada en la planta de procesamiento a través de cada ruta de procesamiento  $r$  ( $M_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento}$ ), menos la cantidad de materia prima transportada desde la planta de procesamiento secundaria hasta la planta de procesamiento principal ( $M_{m,ph,t}^{plantas-principal}$ ), siendo este balance descrito en la siguiente Ecuación:

$$M_{m,ph,t}^{plantas} = M_{m,ph,t-1}^{plantas} + \sum_h Me_{m,h,ph,t}^{suministro-plantas} - \sum_k \sum_r M_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento} - M_{m,ph,t}^{plantas-principal}, \quad \forall m \in M, ph \in PH, t \in T \quad (3.1.2)$$

### 3.1.1.2.2 Producto en plantas de procesamiento secundarias

Algo importante a destacar es la diferencia entre los balances de materia prima y producto en las plantas de procesamiento, la cual implica que las plantas de procesamiento secundarias  $ph$  no reciben producto desde los lugares de suministro  $h$ , además los productos pueden ser transportados desde las plantas de procesamiento secundarias  $ph$  hasta los lugares de venta y consumo  $mk$ . En este caso, la cantidad de producto almacenado en una planta de procesamiento secundaria al final de un periodo de tiempo  $t$  ( $P_{k,ph,t}^{plantas}$ ) es la cantidad de producto acumulada en la planta secundaria en un tiempo anterior ( $P_{k,ph,t-1}^{plantas}$ ), más la cantidad de producto producido a partir de las materias primas ( $P_{m,k,r,ph,t}^{producido}$ ), menos la cantidad de producto que es transportada hacia la planta de procesamiento principal y los lugares de consumo ( $P_{k,ph,t}^{plantas-principal}$ ,  $P_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado}$ ), siendo la Ecuación resultante de la siguiente forma:

$$P_{k,ph,t}^{plantas} = P_{k,ph,t-1}^{plantas} + \sum_m \sum_r P_{m,k,r,ph,t}^{producido} - P_{k,ph,t}^{plantas-principal} - \sum_{mk} P_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado}, \quad \forall m \in M, ph \in PH, t \in T \quad (3.1.3)$$

### 3.1.1.3 Balances de materia en planta de procesamiento principal

Los balances de materia en la planta de procesamiento principal son similares a los balances para las plantas secundarias, este tipo de balances está asociado a la materia prima y a los productos.

3.1.1.3.1 Balances de materia prima en la planta principal de procesamiento

La materia prima  $m$  almacenada al final de un periodo de tiempo  $t$  dado ( $M_{m,t}^{principal}$ ) está asociada a la acumulación de materia prima en el periodo inmediato anterior ( $M_{m,t-1}^{principal}$ ) y a la cantidad de materia prima distribuida desde los centros de procesamiento  $ph$  ( $Me_{m,ph,t}^{plantas-principal}$ ). Además, la materia prima situada en la planta de procesamiento principal depende de la cantidad de materia prima procesada en dicha planta ( $M_{m,k,r,t}^{procesamiento-principal}$ ) y de la materia prima que llega originaria de los centros de abastecimiento de la misma ( $Me_{m,h,t}^{suministro-principal}$ ).

$$M_{m,t}^{principal} = M_{m,t-1}^{principal} + \sum_h Me_{m,h,t}^{suministro-principal} + \sum_{ph} Me_{m,ph,t}^{plantas-principal} - \sum_k \sum_r M_{m,k,r,t}^{procesamiento-principal}, \quad \forall m \in M, t \in T \quad (3.1.4)$$

3.1.1.3.2 Balances de producto en la planta principal de procesamiento

Los balances para los productos en la planta principal de procesamiento son similares a los balances de producto en los centros de procesamiento secundarios. En este contexto, la cantidad acumulada de producto en la planta principal ( $P_{k,t}^{principal}$ ) es igual a la cantidad de producto almacenado en un tiempo inferior ( $P_{k,t-1}^{principal}$ ), más la cantidad de producto generada gracias a la materia prima que es procesada ( $P_{m,k,r,t}^{producido-principal}$ ), más la cantidad de producto que es recopilado desde las plantas secundarias ( $Pe_{k,ph,t}^{plantas-principal}$ ), menos la cantidad de producto que es distribuida a los distintos lugares de consumo  $mk$  ( $P_{k,mk,t}^{mercado-principal}$ ).

$$P_{k,t}^{principal} = P_{k,t-1}^{principal} + \sum_m \sum_r P_{m,k,r,t}^{producido-principal} + \sum_{ph} Pe_{k,ph,t}^{plantas-principal} - \sum_{mk} P_{k,mk,t}^{mercado-principal}, \quad \forall k \in K, t \in T \quad (3.1.5)$$

Las principales diferencias entre las plantas de procesamiento secundarias y el centro principal de procesamiento son: el costo de procesamiento en la planta principal es menor que en las plantas secundarias, los límites de procesamiento son más amplios en la planta de procesamiento principal, así como la capacidad de almacenamiento. Es necesario destacar lo

anterior porque el problema a tratar considera la opción de un sistema de producción descentralizado con la opción de un sitio de procesamiento central.

#### 3.1.1.4 Balances de materia en lugares de consumo

Los balances de materia para los lugares de consumo de producto son necesarios para cuantificar la cantidad de producto que puede ser vendido y con ello obtener ingresos en el sistema de producción. Al realizar los balances en los lugares de consumo se tiene: la cantidad de producto acumulado en algún lugar de consumo  $mk$  en un periodo de tiempo  $t$  dado ( $P_{k,mk,t}^{mercado}$ ) es igual a la cantidad acumulada de producto en un tiempo anterior ( $P_{k,mk,t-1}^{mercado}$ ), más la cantidad de producto proveniente de los centros de procesamiento ( $P_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado}$ ,  $P_{k,mk,t}^{principal-mercado}$ ), menos la cantidad de producto vendido ( $P_{k,mk,t}^{vendido}$ ).

$$P_{k,mk,t}^{mercado} = P_{k,mk,t-1}^{mercado} + \sum_{ph} P_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado} + P_{k,mk,t}^{principal-mercado} - P_{k,mk,t}^{vendido}, \quad \forall k \in K, mk \in MK, t \in T \quad (3.1.6)$$

#### 3.1.1.5 Almacenamiento

El almacenamiento es la primera actividad considerada, para describir esta actividad dos disyunciones son consideradas, la primera está asociada a una variable binaria que es verdadera sí el almacenamiento se lleva a cabo en un periodo de tiempo específico, ésta depende de la sustancia almacenada (producto o materia prima), el lugar donde se lleva a cabo el almacenamiento (planta de procesamientos, lugares de suministros o lugares de consumo) y el periodo de tiempo en el cual se realiza el almacenamiento. Este tipo de almacenamiento es definido para un tiempo  $t$  dado mayor que cero, en el cual la cantidad de material a almacenar debe de estar entre los límites inferior  $Sm_{s,l}^{inferiorlim}$  y superior  $Sm_{s,l}^{superiorlim}$  previamente definidos basados en limitaciones geográficas y límites de transporte. Sí la variable booleana  $Y_{s,l,t}^l$  es falsa, esto indica que la cantidad almacenada es igual a cero (Almacenamiento no es requerido).

$$\left[ \begin{array}{l} Y_{s,l,t}^l \\ Sm_{s,l}^{inferiorlim} \leq S_{s,l,t}^l \leq Sm_{s,l}^{superiorlim} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg Y_{s,l,t}^l \\ S_{s,l,t}^l = 0 \end{array} \right], \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T$$

Sin embargo, ninguna disyunción es posible de implementar en el modelo en esta forma, es decir, necesita ser reformular en ecuaciones donde las variables booleanas pasan a ser variables binarias donde nos queda la Ecuación de la siguiente manera:

$$y_{s,l,t}^l Sm_{s,l}^{inferiorlim} \leq S_{s,l,t}^l \leq y_{s,l,t}^l Sm_{s,l}^{superiorlim}, \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T \quad (3.1.7)$$

Las relaciones previas ayudan a activar la variable binaria  $y_{s,l,t}^l$  para el caso en el cual el almacenamiento es necesario en un periodo de tiempo  $t$ , en una locación  $l$  para la materia  $s$ . El costo asociado de los materiales en una localización  $s$  depende de dos partes, una asociada a la capacidad de almacenamiento y otra que es fija para la máxima capacidad requerida en cualquier periodo de tiempo. Además, son consideradas variables binarias adicionales para determinar la existencia de espacio para almacenamiento para cualquier periodo de tiempo y lugar considerado. Ésta es modelada a través de relaciones lógicas. Las relaciones definen que sí al menos en un tiempo es requerido el almacenamiento (la variable  $y_{s,l,t}^l$  es uno), entonces el almacén existe y la variable binaria  $y_{s,l}^{l,necesario}$  es activada.

$$\sum_t y_{s,l,t}^l \geq y_{s,l}^{l,necesario}, \quad \forall s \in S, l \in L \quad (3.1.8)$$

Además, sí la variable binaria para la existencia del almacenamiento  $y_{s,l}^{l,necesario}$  es activada, entonces fue requerido almacenamiento en al menos un periodo (al menos una de las variables binarias  $y_{s,l,t}^l$  debe ser igual a uno).

$$(Maximos\ periodos) y_{s,l}^{l,necesario} - \sum_t y_{s,l,t}^l \geq 0, \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T \quad (3.1.9)$$

En este contexto, es necesario definir también la capacidad requerida para el almacenamiento, la cual depende de la máxima capacidad requerida en cualquier periodo de tiempo.

$$Sm_{s,l}^l \geq S_{s,l,t}^l, \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T \quad (3.1.10)$$

Sí el almacenamiento es requerido en cualquier periodo de tiempo, entonces el costo asociado para éste es calculado, incluyendo la parte fija que depende sólo de la máxima capacidad de almacenamiento en cualquier tiempo  $Sm_{s,l}^l$ , y la parte variable que depende de la cantidad total almacenada en todos los periodos del horizonte considerado, sí se toman en cuenta los costos unitarios  $Csmf_{s,l}^l$ ,  $Csmv_{s,l}^l$  y  $Csm_s$  para la partes constante, fija y variable del costo de almacenamiento respectivamente. Esto es modelado como sigue:

$$\left[ \begin{array}{c} \text{almacenamiento} \\ Cm_{s,l}^l \\ Y_{s,l}^{necesario} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} Csmf_{s,l}^l \\ Csmv_{s,l}^l Sm_{s,l}^l \\ \sum_t Csm_s S_{s,l,t}^l \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg Y_{s,l}^{necesario} \\ Cm_{s,l}^l \\ Sm_{s,l}^l \\ S_{s,l,t}^l = 0, \quad \forall t \in T \end{array} \right] = 0, \quad \forall s \in S, l \in L$$

Como las disyunciones previas no pueden implementarse directamente en el modelo de optimización, éstas han sido reformuladas; algunas reformulaciones han sido reportadas por Lee y Grossmann (2000, 2005). Las reformulaciones generadas por las disyunciones anteriores son descritas en las ecuaciones siguientes:

$$Cm_{s,l}^l = Csmf_{s,l}^l y_{s,l}^{necesario} + Csmv_{s,l}^l Sm_{s,l}^l + \sum_t Csm_s S_{s,l,t}^l, \quad \forall s \in S, l \in L \quad (3.1.11)$$

$$Cm_{s,l}^l \leq Cm_{s,l}^{almacenamientoMAX} y_{s,l}^{necesario}, \quad \forall s \in S, l \in L \quad (3.1.12)$$

$$Sm_{s,l}^l \leq Sm_{s,l}^{lMAX} y_{s,l}^{necesario}, \quad \forall s \in S, l \in L \quad (3.1.13)$$

$$S_{s,l,t}^l \leq S_{s,l,t}^{lMAX} y_{s,l}^{necesario}, \quad \forall s \in S, l \in L, t \in T \quad (3.1.14)$$

Es importante mencionar que existen seis tipos diferentes de almacenamiento, pues considera almacenamiento de materia prima en lugar de suministro y en plantas de procesamiento (principal y secundarias), almacenamiento de producto en plantas de procesamiento y mercados.

### 3.1.1.6 Transporte

Para la actividad de transporte se consideran límites máximos y mínimos de las cantidades que son posibles transportar ( $T_s^{superior}, T_s^{inferior}$ ), debido a éstos límites se generan las siguientes restricciones que delimitan la cantidad que es transportada de un lugar  $l1$  a uno  $l2$  ( $T_{s,l1,l2,t}$ ), las cuales contienen la variable binaria  $y_{s,l1,l2,t}$  para decidir sí el transporte se lleva a cabo en un tiempo determinado.

$$y_{s,l1,l2,t} T_s^{superior} \geq T_{s,l1,l2,t} \quad \forall s \in S, l1 \in L1, l2 \in L2, t \in T \quad (3.1.15)$$

$$y_{s,l1,l2,t} T_s^{inferior} \leq T_{s,l1,l2,t} \quad \forall s \in S, l1 \in L1, l2 \in L2, t \in T \quad (3.1.16)$$

En cuanto a la actividad de transporte existen seis tipos de transporte de materiales, pues se toma en cuenta el transporte de materia prima desde los lugares de suministro a las plantas de procesamiento y desde las plantas de procesamiento secundarias a la planta principal, además se tiene transporte de productos desde las plantas de procesamiento secundarias a la planta principal y de éstas a los consumidores.

Por otro lado, es necesario considerar la duración del transporte de un lugar  $l1$  a un lugar  $l2$ , esto es, la cantidad de material transportada desde un lugar  $l1$  a un lugar  $l2$  en un tiempo  $t$  ( $T_{s,l1,l2,t}$ ) es igual a la cantidad de material que entra al lugar  $l2$  desde el lugar  $l1$  a un tiempo mayor ( $Te_{s,l1,l2,t+ttransp}$ ), la diferencia entre los tiempos de entrada y salida es el tiempo de transporte ( $ttransp$ ).

$$T_{s,l1,l2,t} = Te_{s,l1,l2,t+ttransp} \quad \forall s \in S, l1 \in L1, l2 \in L2, t \in T \quad (3.1.17)$$

### 3.1.1.7 Procesamiento

También para la actividad de procesamiento de materia prima es necesario considerar límites máximos y mínimos de procesamiento ( $P_{m,k,r,l}^{superior}$ ,  $P_{m,k,r,l}^{inferior}$ ), lo cual ayuda a establecer los límites de producción de las plantas de procesamiento así como los costos de producción dentro de estos límites. Las siguientes restricciones son usadas para activar las variables binarias asociadas a los límites de procesamiento y son usadas para calcular los costos fijos de procesamiento asociados.

$$y_{m,k,r,l,t} P_{m,k,r,l}^{superior} \geq P_{m,k,r,l,t} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, l \in L, t \in T \quad (3.1.18)$$

$$y_{m,k,r,l,t} P_{m,k,r,l}^{inferior} \leq P_{m,k,r,l,t} \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, l \in L, t \in T \quad (3.1.19)$$

Normalmente los procesos de producción constan de varias etapas y son altamente complejos de resolver, éstos tienen varios factores de rendimiento para cada una de las etapas consideradas. Sin embargo, este problema puede ser evitado por la inclusión de un factor global de rendimiento para cada tecnología de procesamiento utilizada y considerar como una caja negra al proceso en conjunto (Figura 1.3). Esto significa que las tecnologías de procesamiento son previamente optimizadas y sólo es considerado un factor  $\alpha_{m,k,r}$  así como, un costo unitario asociado, Si se quieren considerar las economías de escala la función asociada es una función no lineal, sin embargo esta se puede considerar lineal en ciertos límites de procesamiento. Además, el costo de procesamiento depende de la cantidad procesada pues a baja producción resulta un costo unitario alto y a alta producción se tiene un costo unitario bajo. Es importante observar, que la materia prima es procesada en un tiempo  $t$  y el producto es obtenido en un tiempo diferente, esto es porque el procesamiento consume un tiempo dado. La Ecuación que resulta al hacer el balance de materia en cada tecnología de procesamiento es que la cantidad de producto obtenido ( $P_{m,k,r,l,t+\tau}^{producido-lugar}$ ) es directamente proporcional a la materia prima procesada ( $M_{m,k,r,l,t}^{procesamiento-lugar}$ ) relacionadas por una constante de proporcionalidad que resulta ser el factor de rendimiento global del proceso ( $\alpha_{m,k,r}$ ):

$$P_{m,k,r,l,t+\text{processing}}^{\text{producido-lugar}} = \alpha_{m,k,r} M_{m,k,r,l,t}^{\text{procesamiento-lugar}}, \quad \forall m \in M, k \in K, r \in R, l \in L, t \in T \quad (3.1.20)$$

### 3.1.1.8 Restricciones de disponibilidad

Este modelo considera restricciones adicionales para la naturaleza multi-periodo del problema, esto es, toma en cuenta las variaciones a través del tiempo de la disponibilidad de las alimentaciones, productos y demandas. La primera restricción es para limitar a la materia prima en cada lugar de suministro ( $M_{m,h,t}^{\text{producida}}$ ), la cual debe ser menor que la máxima cantidad disponible en cada lugar de suministro en cada época del año ( $M_{m,h,t}^{\text{superior producida}}$ ). Ésta restricción se encuentra asociada a una variable binaria ( $ypm_{m,h,t}$ ), la cual es uno cuando la cantidad de materia prima consumida a partir del lugar de suministro es mayor a cero, y es cero para los casos donde la cantidad de materia prima consumida es cero. Esta restricción se modela de la siguiente manera:

$$ypm_{m,h,t} M_{m,h,t}^{\text{superior producida}} \geq M_{m,h,t}^{\text{producida}}, \quad \forall m \in M, h \in H, t \in T \quad (3.1.21)$$

### 3.1.1.9 Restricción para el almacenamiento al principio y al final del horizonte del tiempo

Existe una restricción adicional para asegurar que el problema se pueda resolver en cualquier horizonte de tiempo y que éste pueda colocarse entre otros horizontes para así obtener una cadena de producción que pueda repetirse cada cierto periodo de tiempo. Por ejemplo, si el horizonte de tiempo consta de 12 meses, se puede encontrar la solución para múltiplos de éste, es decir, 24, 36 ó 48 meses. En este contexto, la restricción asegura que las materias primas y productos almacenados en algún lugar al final del horizonte de tiempo ( $S_{s,l,\text{last } t}$ ) sea igual a la cantidad almacenada al principio del horizonte ( $S_{s,l,0}$ ), garantizando la sustentabilidad del sistema, en otras palabras, el sistema puede hacerse repetitivo a través del tiempo. La Ecuación que ayuda a modelar esta situación es la siguiente:

$$S_{s,l,\text{CARD}(t)} = S_{s,l,0}, \quad \forall s \in S, l \in L \quad (3.1.22)$$

3.1.1.10 Funciones Objetivo

El modelo de optimización considera simultáneamente tres funciones objetivo: una función económica, una ambiental y una social; con el fin de tomar en cuenta las cuatro dimensiones de la sustentabilidad y observar las interrelaciones entre ellas.

3.1.1.10.1 Función Objetivo Económica

La función objetivo económica consiste en la maximización de la ganancia neta anual, tomando en consideración la ganancia por la venta de los productos, menos el costo de procesamiento, transporte, almacenamiento y producción de materia primas. La función objetivo económica es formulada de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 GNA = & \sum_k \sum_{mk} \sum_t Ck_{k,mk,t}^{vendido} P_{k,mk,t}^{vendido} - \sum_m \sum_h \sum_t Cm_{m,h,t}^{producido} M_{m,h,t}^{producido} - \sum_m \sum_h Cm_{m,h}^{almacenamiento} \\
 & - \sum_m \sum_{ph} Cm_{m,ph}^{almacenamiento}^{plantas} - \sum_m Cm_m^{almacenamiento}^{principal} - \sum_k \sum_{ph} Ck_{k,ph}^{almacenamiento}^{plantas} - \sum_k Ck_k^{almacenamiento}^{principal} \\
 & - \sum_k \sum_{mk} Ck_{k,mk}^{almacenamiento}^{mercados} - \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t Ctm_{m,h,ph,t}^{suministro-plantas} M_{m,h,ph,t}^{suministro-plantas} - \sum_m \sum_h \sum_t Ctm_{m,h,t}^{suministro-principal} M_{m,h,t}^{suministro-principal} \\
 & - \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t Ctk_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado} P_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado} - \sum_k \sum_{ph} \sum_t Ctk_{k,ph,t}^{plantas-principal} P_{k,ph,t}^{plantas-principal} \\
 & - \sum_k \sum_{mk} \sum_t Ctk_{k,mk,t}^{principal-mercado} P_{k,mk,t}^{principal-mercado} - \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t Cm_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento} M_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento} \\
 & - \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t Cm_{m,k,r,t}^{procesamiento}^{principal} M_{m,k,r,t}^{procesamiento}^{principal}
 \end{aligned} \tag{3.1.23}$$

En la Ecuación anterior,  $Ck_{k,mk,t}^{vendido}$  es el precio unitario para los productos,  $Cm_{m,h,t}^{producido}$  es el costo unitario para las materias primas,  $Cm_{m,h}^{almacenamiento}^{suministro}$ ,  $Cm_{m,ph}^{almacenamiento}^{plantas}$ ,  $Cm_m^{almacenamiento}^{principal}$  son los costos para el almacenamiento de materia prima en los lugares de suministro, plantas secundarias y planta principal, estos costos tienen una parte fija que depende solo de la existencia del almacenamiento y otra que depende de la cantidad almacenada. Por otra parte,  $Ck_{k,ph}^{almacenamiento}^{plantas}$ ,  $Ck_k^{almacenamiento}^{principal}$ ,  $Ck_{k,mk}^{almacenamiento}^{mercados}$ ,  $Ctk_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado}$ ,  $Ctk_{k,ph,t}^{plantas-principal}$ ,  $Ctk_{k,mk,t}^{principal-mercado}$  son los costos para el almacenamiento de los productos en las plantas de procesamiento secundarias, planta principal y los lugares de consumo, los cuales consideran

una parte fija y una parte variable.  $Ctm_{m,h,ph,t}^{suministro-plantas}$ ,  $Ctm_{m,h,t}^{suministro-principal}$ ,  $Ctk_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado}$ ,  $Ctk_{k,ph,t}^{plantas-principal}$ ,  $Ctk_{k,mk,t}^{principal-mercado}$  son los costos unitarios de transporte con sus diferentes alternativas para la materia prima y producto. Finalmente,  $C_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento}$ ,  $C_{m,k,r,t}^{procesamiento}$  son los costos de procesamiento en las plantas de procesamiento secundarias y la planta principal.

### 3.1.1.10.2 Función Objetivo Ambiental

La función objetivo ambiental mide el impacto ambiental global a través del Eco-indicador99 considerando el análisis del ciclo de vida (Geodkoop y Spriensma, 2001). El Eco-indicador99 considera el impacto ambiental por medio de 11 categorías de impacto que a su vez están divididas en tres categorías principales de daño: daño a la salud humana, daño al ecosistema y daño a los recursos. Para determinar el impacto global en una cadena de producción es necesario calcular un Eco-indicador unitario para cada una de las actividades realizadas en dicha cadena. Las actividades consideradas en la cadena de suministro son la venta del producto (si se vende es porque se pretende utilizar), la producción de materia prima, el transporte con sus diferentes alternativas y el procesamiento, las actividades anteriores fueron seleccionadas pues se considera que son los puntos clave que producen mayor contribución al impacto ambiental global.

$$\begin{aligned}
 IA = & \sum_k \sum_{mk} \sum_t EcoInd_k^{producto} P_{k,mk,t}^{vendido} + \sum_m \sum_h \sum_t EcoInd_m^{materia-prima} M_{m,h,t}^{producida} \\
 & + \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t EcoIndm_{m,h,ph}^{suministro-plantas} M_{m,h,ph,t}^{suministro-plantas} + \sum_m \sum_h \sum_t EcoIndm_{m,h}^{suministro-principal} M_{m,h,t}^{suministro-principal} \\
 & + \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t EcoIndk_{k,ph,mk}^{plantas-mercados} P_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercados} + \sum_k \sum_{ph} \sum_t EcoIndk_{k,ph}^{plantas-principal} P_{k,ph,t}^{plantas-principal} \\
 & + \sum_k \sum_{mk} \sum_t EcoIndk_{k,mk}^{principal-mercados} P_{k,mk,t}^{principal-mercados} + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t EcoInd_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento} M_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento} \\
 & + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t EcoInd_{m,k,r,t}^{procesamiento-principal} M_{m,k,r,t}^{procesamiento-principal}
 \end{aligned} \tag{3.1.24}$$

En la Ecuación previa existen eco-indicadores unitarios para las diferentes actividades de la cadena de producción donde:  $EcoInd_k^{producto}$  es el eco-indicador unitario por el uso del

producto,  $EcoInd_m^{materia-prima}$  es el eco-indicador unitario para la producción de materia prima, también existen eco-indicadores para los diferentes tipos de transporte desde un lugar a otro (  $EcoIndm_{m,h,ph}^{suministro-plantas}$  ,  $EcoIndm_{m,h}^{suministro-principal}$  ,  $EcoIndk_{k,ph,mk}^{plantas-mercados}$  ,  $EcoIndk_{k,ph}^{plantas-principal}$  ,  $EcoIndk_{k,mk}^{principal-mercados}$  ), finalmente el procesamiento también es considerado mediante sus eco-indicadores respectivos  $EcoInd_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento}$  y  $EcoInd_{m,k,r,t}^{procesamiento principal}$  .

### 3.1.1.10.3 Función Objetivo Social

Además, el modelo que se presenta toma en cuenta una función objetivo social a través del número de empleos asociados a la cadena de producción, aunque se sabe que el impacto social puede abarcar muchas maneras de medirse, el número de empleos es una alternativa para dar la pauta a considerarlo posteriormente en el diseño de cadenas de suministro. Al igual que en la función objetivo ambiental, se debe hacer un barrido para determinar cuáles son las actividades con mayor aportación en cuanto al número de empleos y determinar un factor que se refiera al número de empleos unitarios por cada actividad. Esta función objetivo contempla los empleos asociados por la producción de materia prima, transporte y procesamiento. Esta función es difícil de considerar pues no tiene el mismo impacto a la sociedad los empleos dirigidos a la producción de materia prima que los empleos utilizados para el transporte. Sin embargo, es importante para darle un nuevo enfoque al diseño de cadenas de suministro. Para considerar el número de empleos asociados para cualquier proceso o producto en el ciclo de vida completo se utilizó el modelo *Job and Economic Development Impact* (JEDI, 2012) con el modelo *IMPLAN* (Minnesota *IMPLAN Group*, 2012). El número de empleos asociados al ciclo de vida completo para la cadena de producción queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 IS = & \sum_m \sum_h \sum_t SI_m^{materia\ prima} M_{m,h,t}^{producida} + \sum_m \sum_h \sum_{ph} \sum_t SI_{m,h,ph}^{suministro-plantas} M_{m,h,ph,t}^{suministro-plantas} \\
 & + \sum_m \sum_h \sum_t SI_{m,h}^{suministro-principal} M_{m,h,t}^{suministro-principal} + \sum_m \sum_{ph} \sum_t SI_{k,ph}^{plantas-principal} M_{m,ph,t}^{plantas-principal} \\
 & + \sum_k \sum_{ph} \sum_{mk} \sum_t SI_{k,ph,mk}^{plantas-mercado} P_{k,ph,mk,t}^{plantas-mercado} + \sum_k \sum_{ph} \sum_t SI_{k,ph}^{plantas-principal} P_{k,ph,t}^{plantas-principal} \\
 & + \sum_k \sum_{mk} \sum_t SI_{k,mk}^{principal-mercado} P_{k,mk,t}^{principal-mercado} + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_{ph} \sum_t SI_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento} M_{m,k,r,ph,t}^{procesamiento} \\
 & + \sum_m \sum_k \sum_r \sum_t SI_{m,k,r,t}^{procesamiento-principal} M_{m,k,r,t}^{procesamiento-principal}
 \end{aligned} \tag{3.1.25}$$

### 3.1.1.11 Puntos de importancia del modelo

El modelo de optimización consta de las ecuaciones (3.1.1)-(3.1.22) y resulta un problema de programación matemática de optimización mixta entera lineal (MILP), donde las funciones objetivos son simultáneamente la maximización de la ganancia neta anual (Ecuación (3.1.23)), la minimización del impacto ambiental (Ecuación (3.1.24)) y la maximización del impacto social (Ecuación (3.1.25)) para evaluar la cadena de producción.

El modelo propuesto involucra las economías de escala, considerando simultáneamente la optimización de la cadena de suministro y la localización de los lugares especificados en el sistema distribuido.

El modelo considera la estacionalidad de los recursos en la cadena de producción para la aplicación en la optimización de cadenas de producción de biorefinerías.

### 3.1.2 Estrategia de solución

Para resolver el problema de optimización multi-objetivo mixto entero lineal e identificar las relaciones y compromisos entre los tres objetivos considerados, se ha implementado la siguiente estrategia de solución:

1. El problema se resuelve para la maximización de la ganancia neta anual (Ecuación (3.1.23)) sin considerar ninguno de los otros objetivos (social y ambiental) para obtener la solución en la cual se tenga la máxima ganancia y determinar límites para el impacto ambiental y social.

2. Después el problema MILP es resuelto para la minimización del impacto ambiental (Ecuación (3.1.24)) sin considerar los objetivos económico y social, para obtener la solución con el mínimo impacto ambiental y límites para la ganancia neta anual y el número de empleos.
3. Una vez resueltos los objetivos ambiental y económico, el problema es resuelto para la maximización del impacto social (Ecuación (3.1.25)) sin tomar en cuenta los otros objetivos, de esta manera se obtiene una solución con un número máximo de empleos y límites para el impacto ambiental y la ganancia neta anual.
4. Luego de obtener los límites para los diferentes objetivos en los pasos previos, se procede a la aplicación del método *constraint* (Diwekar, 2003) para la determinación de soluciones en una curva Pareto

### 3.2 Sistema distribuido de biorefinerías basado en el aprovechamiento de lirio acuático

El problema abordado en este capítulo se basa en la característica que tiene el lirio acuático, el cuál puede ser usado como materia prima para obtener biomasa y agua (Ver Figura 3.4). En este sentido se propone un conjunto de cuerpos de agua  $S$  los cuales son considerados para su posible inclusión en un sistema distribuido y tienen una producción de lirio acuático especificada. Además, existe una serie de plantas de procesamiento  $I$  para la biomasa proveniente del lirio acuático. Por otro lado, los productos producidos de la biomasa son consumidos en un conjunto de ciudades  $C$  que representa los diferentes mercados. También, es posible obtener agua a partir del lirio, por lo cual se necesitan una serie de plantas de tratamiento  $M$  con varias tecnologías de tratamiento  $N$ . La biomasa proveniente del lirio acuático es capaz de producir diversos productos  $P$  por medio de un conjunto de rutas de procesamiento  $J$ .

El lirio acuático es cosechado desde los sitios  $s$ , el cual puede ser separado en biomasa y agua, la biomasa proveniente del lirio acuático puede ser enviada a diferentes plantas de procesamiento  $i$ , las cuales se encuentran distribuidas en una región dada, además existe una planta principal a la cual la biomasa puede ser enviada de la misma forma, con el fin de considerar un sistema central y distribuido. Una vez que la biomasa se encuentra en la planta de procesamiento, ésta es dirigida a múltiples rutas de procesamiento  $j$  para obtener un conjunto de

productos  $p$ , los productos  $p$  son distribuidos a diferentes mercados o ciudades  $c$  donde se mezclan con productos del mismo tipo para satisfacer la demanda del sitio de consumo. La interacción entre los lugares de producción de lirio, procesamiento, tratamiento y consumo de productos es mostrada en la Figura 3.5, la cual es la superestructura del problema abordado.



**Figura 3.4 Representación del uso potencial del lirio acuático a partir de los cuerpos de agua**

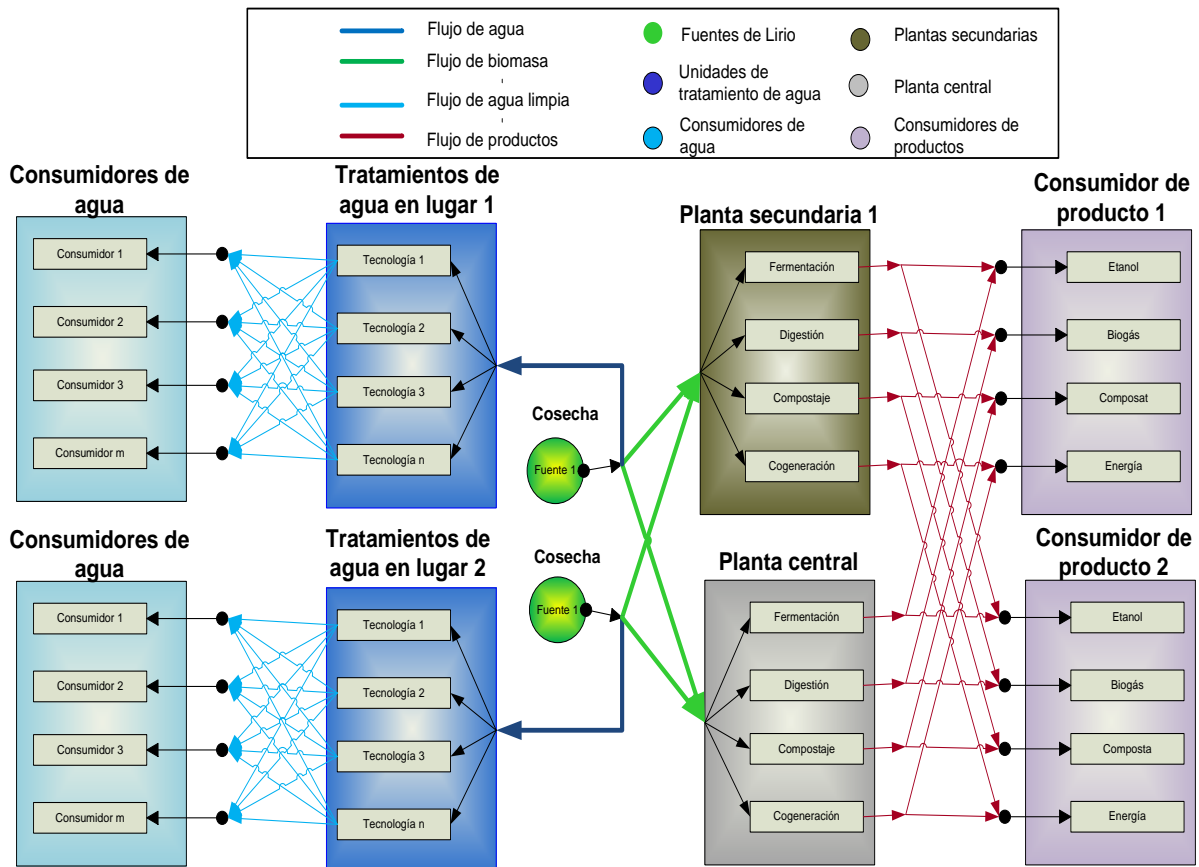
La finalidad de considerar un sistema distribuido es la posibilidad de disminuir costos, principalmente los de transporte porque se puede transportar más cantidad de materia prima útil a las plantas de procesamiento si antes esa materia prima es tratada.

La metodología propuesta se basa en modelo de optimización, el cual debe ser capaz de generar información para contribuir a la determinación de lo siguiente:

- Los productos que deben ser obtenidos
- Las tecnologías de procesamiento que deben ser utilizadas
- El tamaño y localización de las plantas de procesamiento secundarias
- El tamaño y localización de la planta de procesamiento central
- Buscar satisfacer las demandas en cada lugar de consumo propuesto
- El costo de transporte asociado a toda la cadena de suministro
- La cantidad de lirio acuático que debe ser extraído para remediar los cuerpos de agua

- Los consumidores de producto así como los consumidores de agua
- Los incentivos requeridos para hacer la metodología económicamente atractiva

Las cuestiones anteriores se deben obtener de manera que se obtengan los óptimos beneficios desde el punto de vista de sustentabilidad, es decir, que tome en cuenta aspectos ambientales, económicos y de ser posible aspectos sociales.



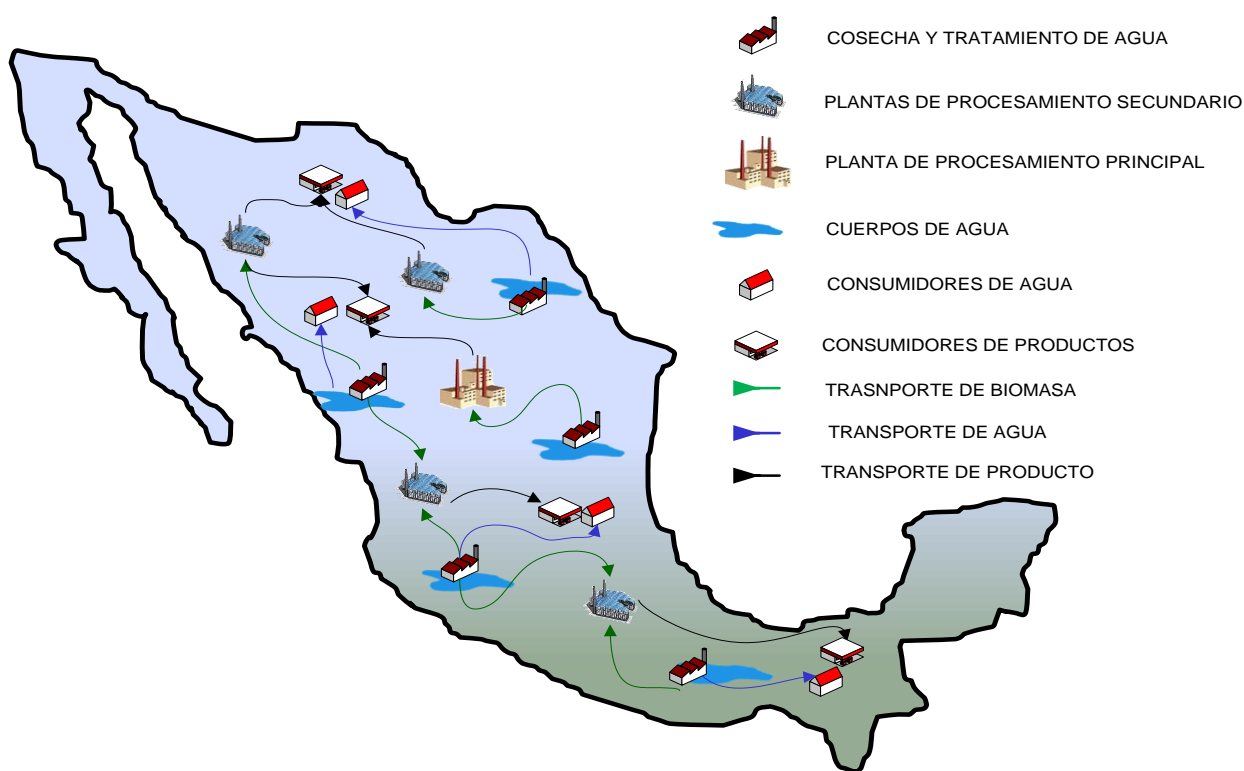
**Figura 3.5 Superestructura para una cadena de suministro distribuida basada en lirio acuático**

### 3.2.1 Formulación del modelo

El problema abordado en el presente Capítulo puede ser definido como sigue: dado un conjunto de cuerpos de agua ( $s$ ) con cantidades conocidas de lirio acuático; también, existen varios mercados ( $k$ ) para los productos con demandas dadas; el problema consiste en determinar la localización para las plantas de procesamiento ( $j$ ), el tamaño de estas plantas de procesamiento y las tecnologías usadas ( $i$ ), así como la distribución para el uso del lirio acuático en diferentes

lugares ( $m$ ), la distribución de los productos ( $p$ ) con la finalidad de minimizar el costo y mantener los niveles de lirio acuático en los cuerpos de agua en los límites adecuados.

El modelo propuesto para el sistema de biorefinerías basado en la utilización de lirio acuático se basa en la representación de la Figura 3.6 considerando la superestructura de la Figura 3.5, en dicha figura existen varios lugares geográficamente distribuidos donde puede ser extraído y procesado el lirio acuático, además donde los productos obtenidos del mismo pueden ser vendidos. La cantidad de materia prima disponible depende de la ubicación, por otro lado, cada consumidor tiene una demanda dada. El modelo considera balances de masa, restricciones técnicas, ambientales y de factibilidad



**Figura 3.6 Representación para una cadena de suministro distribuida basada en lirio acuático**

### 3.2.1.1 Balances de masa para la cosecha del lirio acuático

Para el control del lirio acuático existen dos métodos principales: el control químico y el control mecánico, por una parte, el control químico puede llegar a ser eficiente pero en lugares donde la lluvia sea escasa, ya que si es aplicado a sistemas con abundante lluvia se debe de aplicar mayor cantidad, lo cual incrementa el riesgo de contaminación de los cuerpos de agua.

Uno de los factores más importantes para el control mecánico del lirio acuático es que la cosecha mecánica requiere mucha energía, y la cual está asociada al costo de cosecha, sin embargo, el costo de cosecha es diferente para cada lugar o caso de estudio considerado, ya que el costo de la energía es diferente en cada región: Para el caso de México, el costo de cosecha es aproximadamente \$US 0.906 por tonelada cosechada, aunque también depende del equipo utilizado.

El lirio acuático usado en el lugar de producción del mismo  $s$  ( $Fwh_s$ ) puede ser cosechado y procesado para extraer biomasa ( $Fb_s$ ) y agua ( $Fw_s$ ). De este modo, la tecnología para la cosecha del lirio acuático puede extraer biomasa desde ésta planta con una eficiencia dada ( $Zwh_s$ ) de la siguiente manera:

$$Fwh_s \cdot Zwh_s = Fb_s, s \in S \quad (3.2.1)$$

En este contexto, es posible extraer el contenido de agua del lirio acuático con una eficiencia dada ( $Zw_s$ ) como sigue:

$$Fwh_s \cdot Zw_s = Fw_s, s \in S \quad (3.2.2)$$

### 3.2.1.2 Disponibilidad para el lirio acuático cosechado

El lirio acuático cosechado debe ser menor o igual a la máxima cantidad disponible de lirio ( $Fwh_s^{\max}$ ) en el lugar de producción  $s$ :

$$Fwh_s \leq Fwh_s^{\max}, s \in S \quad (3.2.3)$$

La cosecha del lirio acuático consiste en un control mecánico del crecimiento del mismo; sin embargo, la cosecha mecánica consume una gran cantidad de tiempo y resulta bastante costosa (ver Gunnardsson y Petersen, 2007). Existe una gran variedad de máquinas que son capaces de cosechar el lirio acuático, estas máquinas tienen un límite máximo de cosecha y una eficiencia para obtener lirio acuático acorde a sus capacidades.

### 3.2.1.3 Balances de masa para los distribuidores de biomasa a las plantas de procesamiento

La biomasa extraída a partir del lirio acuático en cada lugar  $s$  ( $Fb_s$ ) puede ser segregada y dirigida a las plantas de procesamiento secundarias localizadas en el lugar  $i$  ( $fb_{s,i}^{planta}$ ) y la planta de procesamiento principal para tratar la biomasa y obtener los productos finales:

$$Fb_s = \sum_{i \in I} fb_{s,i}^{planta} + fb_s^{cen}, \quad s \in S \quad (3.2.4)$$

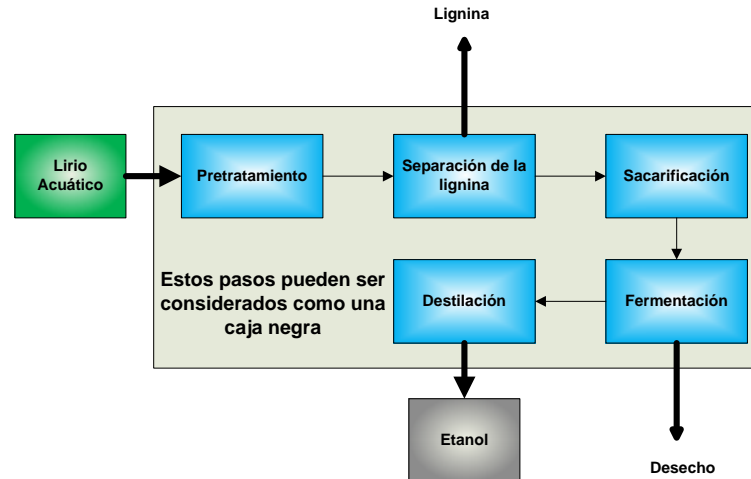
### 3.2.1.4 Balances de masa para los recopiladores de materia prima a la entrada de las plantas de procesamiento

El flujo total de biomasa a la entrada de las plantas de procesamiento secundarias  $i$  y distribuido a las diferentes tecnologías de conversión  $j$  ( $fb_{i,j}^{planta}$ ) es igual a la suma de la biomasa distribuida desde los distintos lugares donde el lirio acuático es cosechado  $s$  ( $fb_{s,i}^{planta}$ ) y se plantea de la siguiente forma:

$$\sum_{s \in S} fb_{s,i}^{planta} = \sum_{j \in J} fb_{i,j}^{planta}, \quad \forall i \in I \quad (3.2.5)$$

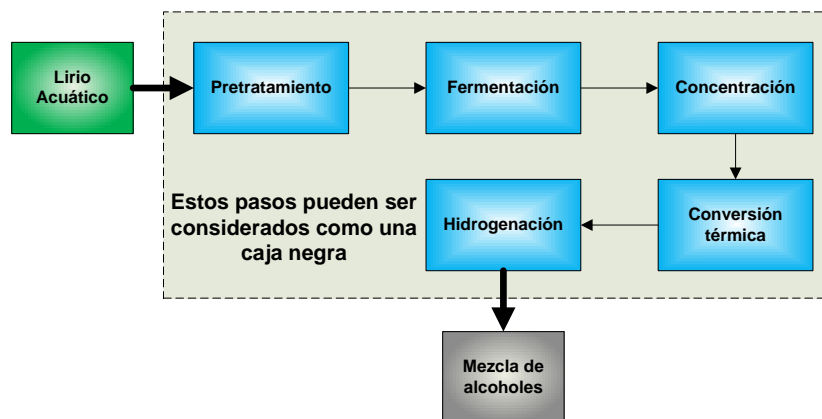
### 3.2.1.5 Balances de masa para las tecnologías de procesamiento usadas en las plantas de procesamiento

En cada planta de procesamiento existen varias tecnologías que pueden ser usadas para transformar la biomasa proveniente del lirio acuático a una variedad amplia de productos (por ejemplo bioetanol, ácido acético, biogás, abono, energía, etc.). Varios ejemplos de este proceso de transformación han sido reportados en la literatura; entre ellos, el proceso para la producción de bioetanol incluyendo información técnico-económica (Isarankura-Na-Ayudhya, 2007; Mishima y col., 2008; Nigam, 2002), en este sentido, las tecnologías disponibles para la fermentación de la biomasa son caracterizadas con factores de conversión dados que representan la cantidad de producto obtenido por unidad de materia prima. Un proceso general para la obtención de etanol a partir del lirio acuático ha sido reportado por Ganguly y col. (2012) el cual es mostrado en la Figura 3.7.



**Figura 3.7** Proceso general para la obtención de etanol a partir de lirio acuático

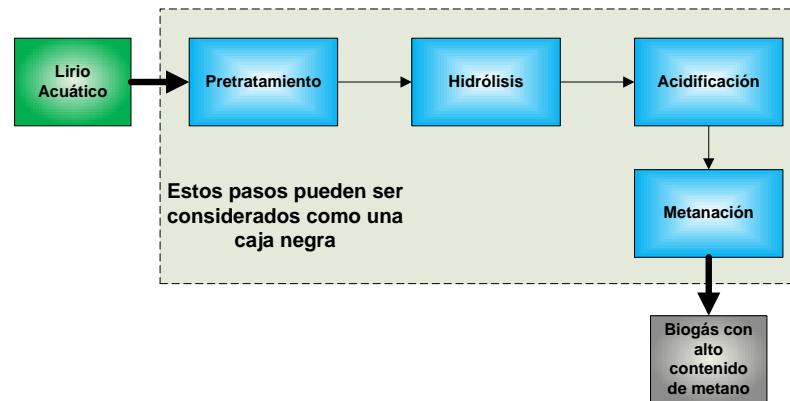
El proceso MixAlco (Forrest y col., 2010) es una tecnología interesante la cual puede ser usada para producir una mezcla de alcoholes a través de fermentación, conversión térmica e hidrogenación a partir de biomasa (ver Figura 3.8). Esta tecnología ha sido recientemente modelada y optimizada para determinar el factor de conversión (Forrest y col., 2010), el cual es la cantidad de mezcla de alcoholes obtenida para una cantidad dada de biomasa.



**Figura 3.8** Proceso MixAlco a partir del lirio acuático

La digestión anaeróbica es un proceso biológico por el cual la materia orgánica es degradada en ausencia de oxígeno produciendo biogás (Gunnardsson y Petersen, 2007). El biogás producido puede ser usado para generar energía o electricidad. Ésta es una interesante opción para producir energía por el alto precio de los combustibles fósiles. Una ventaja es que el lirio

acuático puede ser fácilmente degradado porque tiene un alto contenido de materia fermentable que puede ser transformada en biogás. La digestión anaeróbica del lirio acuático puede resolver problemas causados con su excesivo crecimiento en los cuerpos de agua. Sin embargo, el tratamiento para esta tecnología requiere aparatos especializados que hacen difícil su aplicación en zonas rurales. El proceso general es mostrado en la Figura 3.9.



**Figura 3.9 Proceso general para la digestión anaerobia a partir de lirio acuático para producir biogás**

Por otro lado, el lirio acuático puede ser utilizado para producir composta por descomposición aerobia. El fertilizante es un producto interesante donde la agricultura es una actividad económica importante. Es importante notar que en el caso del lirio acuático contiene cerca del 90% de humedad, lo cual es una ventaja, ya que la preparación de una tonelada de fertilizante necesita alrededor de 2700 litros de agua, los cuales pueden ser obtenidos a partir del lirio acuático.

Otra opción para obtener un producto útil a partir de lirio acuático es la deoxy licuefacción (Lu y col., 2009). La deoxy-licuefacción es un proceso donde la biomasa puede ser convertida indirectamente en líquidos combustibles a través de gasificación a gas de síntesis seguida por conversión catalítica y licuefacción directa. En este proceso, la mayoría del oxígeno en la biomasa es transformada en CO y CO<sub>2</sub>. Existe aproximadamente 2.9% de oxígeno contenido en el aceite. Este proceso es clasificado como un proceso hidrotérmico. Esta es una alternativa para incrementar el contenido de energía en la biomasa.

La quema directa es otra alternativa para el uso del lirio acuático, sin embargo, esta planta contiene un alto contenido de humedad, por lo que antes debe de ser reducida, cuando la

humedad es reducida la densidad energética es cercana a  $15.23\text{MJkg}^{-1}$ . Esta opción puede ser usada en pequeña escala y lugares cerca de los cuerpos de agua para producir energía.

En este contexto, el modelo de optimización debe seleccionar el tipo de tecnología usada ( $j$ ) en cada planta de procesamiento ( $i$ ) para producir los diferentes productos ( $p$ ). Lo anterior es modelado en la siguiente Ecuación.

$$fb_{i,j}^{planta} \cdot \alpha_{j,p}^{planta} = wprod_{i,j,p}^{planta}, \forall i \in I, j \in J, p \in P \quad (3.2.6)$$

### 3.2.1.6 Balances de materia para los mezcladores antes de la planta central de procesamiento

El flujo de biomasa a la entrada de la planta central de procesamiento que es enviado a las diferentes tecnologías de conversión ( $fb_s^{cen}$ ) es igual a la suma de la biomasa distribuida a partir de los sitios de cosecha  $s$  ( $wb_j^{cen}$ ) como sigue:

$$\sum_{s \in S} fb_s^{cen} = \sum_{j \in J} wb_j^{cen} \quad (3.2.7)$$

### 3.2.1.7 Balances de materia para las tecnologías de las plantas centrales de procesamiento

En la planta central de procesamiento existen varias tecnologías de bioconversión  $j$  disponibles para transformar la biomasa ( $wb_j^{cen}$ ) y producir diferentes productos ( $wprod_{j,p}^{cen}$ ) con una eficiencia dada ( $\alpha_{j,p}^{cen}$ ) que puede ser optimizada previamente. La principal ventaja de una planta central de procesamiento es la consideración de las economías de escala para reducir los costos de capital y operación asociados a una capacidad mayor. Esto es modelado como sigue:

$$wb_j^{cen} \cdot \alpha_{j,p}^{cen} = wprod_{j,p}^{cen}, \forall j \in J, p \in P \quad (3.2.8)$$

### 3.2.1.8 Balances de materia para los divisores después de cada planta de procesamiento

El producto  $p$  obtenido en la planta de procesamiento  $i$  ( $wprod_{i,j,p}^{planta}$ ) usando diferentes tecnologías  $j$  son segregadas y dirigidas a los consumidores localizados en los diferentes lugares  $k$  ( $gprod_{i,j,p,k}^{planta}$ ):

$$wprod_{i,j,p}^{planta} = \sum_{k \in K} gprod_{i,j,p,k}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P \quad (3.2.9)$$

### 3.2.1.9 Balances de materia para los divisores después de la planta de procesamiento central

El producto  $p$  obtenido en la planta central de procesamiento ( $wprod_{j,p}^{cen}$ ) usando diferentes tecnologías  $j$  son segregadas y dirigidas a los consumidores localizados en diferentes lugares de consumo  $k$  ( $gprod_{j,p,k}^{cen}$ ):

$$wprod_{j,p}^{cen} = \sum_{k \in K} gprod_{j,p,k}^{cen}, \quad \forall j \in J, p \in P \quad (3.2.10)$$

### 3.2.1.10 Balances de materia para los mercados

El producto  $p$  a la entrada del mercado en el lugar  $k$  ( $G_{p,k}^{con}$ ) es igual a los productos enviados desde todas las plantas de procesamiento ( $gprod_{i,j,p,k}^{planta}$ ) y la planta central de procesamiento ( $gprod_{j,p,k}^{cen}$ ):

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} gprod_{i,j,p,k}^{planta} + \sum_{j \in J} gprod_{j,p,k}^{cen} = G_{p,k}^{con}, \quad \forall p \in P, k \in K \quad (3.2.11)$$

### 3.2.1.11 Demanda para los consumidores

El flujo de cada producto  $p$  a la entrada del mercado  $k$  ( $G_{p,k}^{con}$ ) debe ser menor que la máxima demanda en cada mercado ( $G_{p,k}^{conMax}$ ):

$$G_{p,k}^{con} \leq G_{p,k}^{conMax}, \quad \forall p \in P, k \in K \quad (3.2.12)$$

### 3.2.1.12 Balances de materia para las unidades de tratamiento de agua en cada fuente

El agua extraída del lirio acuático en cada cuerpo de agua ( $Fw_s$ ) es enviado a un conjunto de tecnologías de tratamiento  $n$  ( $fw_{s,n}$ ) para eliminar contaminantes para hacer de esta manera el agua útil para usos específicos:

$$Fw_s = \sum_{n \in N} fwt_{s,n}, \quad \forall s \in S \quad (3.2.13)$$

### 3.2.1.13 Tecnología de tratamiento de agua en cada cuerpo de agua

Existen varias tecnologías disponibles para el tratamiento de agua  $n$  para eliminar los contaminantes  $c$  para el agua extraída a partir del lirio acuático con una eficiencia dada  $\gamma_{n,c}$ , la composición a la entrada de las tecnologías de tratamiento  $Zw_{s,c}^{ent}$  y la composición a la salida

$Zw_{s,n,c}^{sal}$  se relacionan de la siguiente manera:

$$Zw_{s,n,c}^{sal} = Zw_{s,c}^{ent} \cdot (1 - \gamma_{n,c}), \quad \forall s \in S, n \in N, c \in C \quad (3.2.14)$$

### 3.2.1.14 Balances de masa para los divisores después de las unidades de tratamiento de agua

El agua extraída a partir del lirio acuático desde el cuerpo de agua  $s$  y tratada con la tecnología  $n$  puede ser enviada al consumidor de agua  $m$  ( $hw_{s,n,m}$ ) y la Ecuación resultante es la siguiente:

$$f_{WT_{s,n}} = \sum_{m \in M} hw_{s,n,m}, \quad \forall s \in S, n \in N \quad (3.2.15)$$

### 3.2.1.15 Balances de masa para los mezcladores antes de cada unidad de tratamiento de agua

El flujo total de agua que es dirigido al consumidor de agua  $m$  ( $H_{W_{s,m}}$ ) es igual a la suma del flujo de agua desde cualquier unidad de tratamiento  $n$  ( $hw_{s,n,m}$ ):

$$\sum_{n \in N} hw_{s,n,m} = H_{W_{s,m}}, \quad \forall s \in S, m \in M \quad (3.2.16)$$

### 3.2.1.16 Balances de componente para los mezcladores antes de cada consumidor de agua

Los balances siguientes son requeridos para determinar los componentes presentes en el agua que es dirigida a los consumidores ( $Zw_{s,m,c}^{con}$ ):

$$\sum_{n \in N} (hw_{s,n,m} \cdot Zw_{s,n,c}^{sal}) = H_{W_{s,m}} \cdot Zw_{s,m,c}^{con}, \quad \forall s \in S, m \in M, c \in C \quad (3.2.17)$$

Es importante resaltar que la Ecuación (3.2.17) es no lineal ya que tiene un término bilineal, el cual está formado por el producto de la composición de contaminante a la descarga de las unidades de tratamiento de agua ( $Zw_{s,m,c}^{con}$ ) y el flujo total de agua que es dirigido a los consumidores de agua ( $H_{W_{s,m}}$ ). Nótese que éste es el único término no lineal del modelo.

### 3.2.1.17 Demanda para los consumidores de agua

La cantidad de agua dirigida a los consumidores de agua  $m$  ( $H_{W_{s,m}}$ ) debe ser menor a una demanda máxima dada para cada consumidor  $m$  ( $H_{W_{s,m}}^{\max}$ ). Esta restricción es escrita como sigue:

$$H_{W_{s,m}} \leq H_{W_{s,m}}^{\max}, \quad \forall s \in S, m \in M \quad (3.2.18)$$

### 3.2.1.18 Restricciones para la calidad del agua en cada consumidor

Existen restricciones específicas para la concentración de algunos contaminantes  $c$  en cada consumidor de agua dependiendo del uso, de esta manera la máxima concentración de contaminante  $c$  ( $Zw_{s,m,c}^{con\max}$ ) para cada consumidor es definida como sigue:

$$Zw_{s,m,c}^{con} \leq Zw_{s,m,c}^{con\max}, \quad \forall s \in S, m \in M, c \in C \quad (3.2.19)$$

### 3.2.1.19 Costo operacional para las plantas de procesamiento

El costo operacional para las plantas de procesamiento ( $CostHub_{i,j}^{op}$ ) depende del flujo de biomasa proveniente del lirio acuático que es tratado ( $fbj_{i,j}^{planta}$ ) y está asociado a un costo unitario ( $\beta_j^{planta\ op}$ ) para cada planta  $i$  y tecnología de procesamiento  $j$ :

$$CostHub_{i,j}^{op} = fbj_{i,j}^{planta} \cdot \beta_j^{planta\ op}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2.20)$$

3.2.1.20 Costo de capital para las plantas de procesamiento

El costo de capital para las plantas de procesamiento ( $CostHub_{i,j}^{cap}$ ) es normalmente considerado como una función no lineal con un costo fijo ( $A_{i,j}^{planta}$ ) y un término variable ( $B_{i,j}^{planta} \cdot (fb_{i,j}^{planta})^\sigma$ ), donde  $\sigma$  esta usualmente entre 0.6 y 0.9 para considerar las economías de escala. En este trabajo, el segundo término es no convexo, por lo que es remplazado por un conjunto de segmentos lineales de la siguiente forma:

$$CostHub_{i,j}^{cap} = A_{i,j}^{planta} + B_{i,j}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2.21)$$

Donde el término ( $B_{i,j}^{planta}$ ) es modelado a través de la siguiente disyunción:

$$\forall_{q \in Q} \left[ \begin{array}{c} Y_{i,j,q}^{planta} \\ fb_{i,j,q}^{planta \min} \leq fb_{i,j}^{planta} \leq fb_{i,j,q}^{planta \max} \\ A_{i,j}^{planta} = a_{i,j,q}^{planta} \\ B_{i,j}^{planta} = b_{i,j,q}^{planta} \cdot fb_{i,j}^{planta} \end{array} \right], \quad i \in I, j \in J$$

Las disyunciones no pueden ser implementadas en el modelo de optimización, así que tienen que ser reformuladas a un problema algebraico. Para tal propósito, primeramente se establece una restricción para que sólo un segmento pueda ser seleccionado:

$$\sum_{q \in Q} y_{i,j,q}^{planta} = 1, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2.22)$$

Después, cada variable continua es desagregada de la siguiente manera:

$$fb_{i,j}^{planta} = \sum_{q \in Q} d_{i,j,q}^{planta} \cdot fb_{i,j,q}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2.23)$$

$$A_{i,j}^{planta} = \sum_{q \in Q} d_{i,j,q}^{planta} \cdot A_{i,j,q}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2.24)$$

$$Bf_{i,j}^{planta} = \sum_{q \in Q} dB_{i,j,q}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3.2.25)$$

A su vez, las relaciones para determinar el valor de las variables desagregadas se definen como sigue:

$$fb_{i,j,q}^{planta} \cdot y_{i,j,q}^{planta} \leq dfb_{i,j,q}^{planta} \leq fb_{i,j,q}^{planta} \cdot y_{i,j,q}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (3.2.26)$$

$$dA_{i,j,q}^{planta} = a_{i,j,q}^{planta} \cdot y_{i,j,q}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (3.2.27)$$

$$dB_{i,j,q}^{planta} = b_{i,j,q}^{planta} \cdot dfb_{i,j,q}^{planta}, \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (3.2.28)$$

En la disyunción previa, para un flujo de biomasa ( $fb_{i,j}^{planta}$ ), la Ecuación (3.2.26) es usada para activar la variable binaria correspondiente, entonces sólo una variable binaria ( $y_{i,j,q}^{planta}$ ) puede activarse o tomar el valor de uno gracias a la Ecuación (3.2.22). Después, las variables desagregadas son calculadas a través de las ecuaciones (3.2.27) y (3.2.28). Se observa que las variables desagregadas que toman un valor diferente de cero son las correspondientes al segmento  $q$  de la variable binaria activada y estas son asignadas a las variables continuas originales por medio de las ecuaciones (3.2.23) a (3.2.25). Es importante notar que la principal ventaja de usar una formulación por medio de disyunciones es para facilitar la representación de relaciones lógicas complicadas, la formulación de la disyunción no afecta la estrategia de solución porque la reformulación algebraica es la que es resuelta dentro de un modelo de optimización.

### 3.2.1.21 Costo operacional para la planta central de procesamiento

El costo operacional para la planta central de procesamiento ( $CostCen_j^{op}$ ) depende del flujo tratado de biomasa a partir del lirio acuático ( $wb_j^{cen}$ ) y el costo unitario asociado ( $\beta_j^{cenop}$ ) para cada tecnología de procesamiento  $j$ :

$$CostCen_j^{op} = wb_j^{cen} \cdot \beta_j^{cenop}, \quad \forall j \in J \quad (3.2.29)$$

## 3.2.1.22 Costo de capital para la planta central de procesamiento

El costo de capital para la planta central de procesamiento ( $CostCen_j^{cap}$ ) es determinado por la consideración de una parte fija ( $A_j^{cen}$ ) y una parte variable, la cual es tratada de la misma forma que para las plantas de procesamiento secundarias:

$$CostCen_j^{cap} = A_j^{cen} + Bf_j^{cen}, \quad \forall j \in J \quad (3.2.30)$$

Donde el término ( $Bf_j^{cen}$ ) es modelado a través de la siguiente disyunción:

$$\vee_q \left[ \begin{array}{c} Y_{j,q}^{cen} \\ wb_{j,q}^{cen\min} \leq wb_j^{cen} \leq wb_{j,q}^{cen\max} \\ A_j^{cen} = a_{j,q}^{cen} \\ Bf_j^{cen} = b_{j,q}^{cen} \cdot wb_j^{cen} \end{array} \right], \quad j \in J$$

En este sentido, la disyunción previa es reformulada como sigue:

$$\sum_{q \in Q} y_{j,q}^{cen} = 1, \quad \forall j \in J \quad (3.2.31)$$

$$wb_j^{cen} = \sum_{q \in Q} dw_{j,q}^{cen}, \quad \forall j \in J \quad (3.2.32)$$

$$A_j^{cen} = \sum_{q \in Q} dA_{j,q}^{cen}, \quad \forall j \in J \quad (3.2.33)$$

$$Bf_j^{cen} = \sum_{q \in Q} dB_{j,q}^{cen}, \quad \forall j \in J \quad (3.2.34)$$

$$wb_{j,q}^{cen\min} \cdot y_{j,q}^{cen} \leq dw_{j,q}^{cen} \leq wb_{j,q}^{cen\max} \cdot y_{j,q}^{cen}, \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.2.35)$$

$$dA_{j,q}^{cen} = a_{j,q}^{cen} \cdot y_{j,q}^{cen}, \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.2.36)$$

$$dB_{j,q}^{cen} = b_{j,q}^{cen} \cdot dw_{j,q}^{cen}, \quad \forall j \in J, q \in Q \quad (3.2.37)$$

Las ecuaciones anteriores son similares a las correspondientes a las plantas de procesamiento secundarias.

### 3.2.1.23 Costo operacional para las unidades de tratamiento de agua

El costo operacional para las unidades de tratamiento de agua ( $CostWT_{s,n}^{op}$ ) depende del flujo de agua tratada ( $fw_{t,s,n}$ ) y el costo unitario asociado ( $\beta_{s,n}^{wt,op}$ ) para cada unidad de tratamiento  $n$ .

$$CostWT_{s,n}^{op} = fw_{t,s,n} \cdot \beta_{s,n}^{wt,op}, \quad \forall s \in S, n \in N \quad (3.2.38)$$

### 3.2.1.24 Costo de capital para las unidades de tratamiento de agua

El costo de capital para las unidades de tratamiento de agua ( $CostWT_{s,n}^{cap}$ ) es determinado considerando una parte fija ( $A_{s,n}^{WT}$ ) y una parte variable ( $Bf_{s,n}^{WT}$ ) de la misma manera que las plantas de procesamiento.

$$CostWT_{s,n}^{cap} = A_{s,n}^{WT} + Bf_{s,n}^{WT}, \quad \forall s \in S, n \in N \quad (3.2.39)$$

Donde el término  $Bf_{s,n}^{WT}$  es modelado a través de la siguiente disyunción:

$$\vee_q \left[ \begin{array}{c} Y_{s,n,q}^{WT} \\ fw_{t,s,n,q}^{\min} \leq fw_{t,s,n} \leq fw_{t,s,n,q}^{\max} \\ A_{s,n}^{WT} = a_{s,n,q}^{WT} \\ Bf_{s,n}^{WT} = b_{s,n,q}^{WT} \cdot fw_{t,s,n} \end{array} \right], \quad \forall s \in S, n \in N, q \in Q$$

Como en las disyunciones anteriores, ésta debe ser reformulada algebraicamente, con lo cual se obtiene lo siguiente:

$$\sum_{q \in Q} y_{s,n,q}^{wt} = 1, \quad \forall s \in S, n \in N \quad (3.2.40)$$

$$fwt_{s,n} = \sum_{q \in Q} dfwt_{s,n,q}, \quad \forall s \in S, n \in N \quad (3.2.41)$$

$$A_{s,n}^{wt} = \sum_{q \in Q} dA_{s,n,q}^{wt}, \quad \forall s \in S, n \in N \quad (3.2.42)$$

$$Bf_{s,n}^{wt} = \sum_{q \in Q} dBf_{s,n,q}^{wt}, \quad \forall s \in S, n \in N \quad (3.2.43)$$

$$fwt_{s,n,q}^{\min} \cdot y_{s,n,q}^{wt} \leq dfwt_{s,n,q} \leq fwt_{s,n,q}^{\max} \cdot y_{s,n,q}^{wt}, \quad \forall s \in S, n \in N, q \in Q \quad (3.2.44)$$

$$dA_{s,n,q}^{wt} = a_{s,n,q}^{wt} \cdot y_{s,n,q}^{wt}, \quad \forall s \in S, n \in N, q \in Q \quad (3.2.45)$$

$$dBf_{s,n,q}^{wt} = b_{s,n,q}^{wt} \cdot dwt_{s,n,q}, \quad \forall s \in S, n \in N, q \in Q \quad (3.2.46)$$

La explicación de las ecuaciones anteriores es similar a la correspondiente a las plantas de procesamiento.

### 3.2.1.25 Costo de cosecha

El costo de cosecha del lirio acuático ( $CostCosecha$ ) es determinado por la cantidad de lirio acuático cosechado ( $Fwh_s$ ) y el costo unitario asociado a la cosecha para cada localización  $s$  ( $\beta_s^{Cosecha}$ ) y es definido como sigue:

$$CostCosecha = \sum_{s \in S} Fwh_s \cdot \beta_s^{Cosecha} \quad (3.2.47)$$

Es importante señalar que el costo de cosecha unitario depende del lugar porque la dificultad asociada a esta operación es diferente para cada localización, en este contexto, el uso de energía es un factor importante que se debe considerar para evaluar el costo de transporte.

### 3.2.1.26 Costo de transporte de agua

El costo de transporte de agua ( $CostTransAgua$ ) consiste en el transporte de agua tratada y sin tratar considerando los costos unitarios de transporte ( $\beta_{s,n}^{Transp}$ ,  $\beta_{s,n,m}^{Transp}$ ) para cada uno de los tipos de agua.

$$CostTransAgua = \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} fwt_{s,n} \cdot \beta_{s,n}^{Transp} + \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} hwt_{s,n,m} \cdot \beta_{s,n,m}^{Transp} \quad (3.2.48)$$

### 3.2.1.27 Costo de transporte de biomasa

El costo de transporte de biomasa ( $CostTransBM$ ) incluye el costo de transporte de biomasa desde los cuerpos de agua hasta las plantas de procesamiento ( $\beta bplanta_{s,i}^{Transp}$ ) y a la planta central de procesamiento ( $\beta bcen_s^{Transp}$ ).

$$CostTransBM = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} fb_{s,i}^{planta} \cdot \beta bplanta_{s,i}^{Transp} + \sum_{s \in S} fb_s^{cen} \cdot \beta bcen_s^{Transp} \quad (3.2.49)$$

### 3.2.1.28 Costo de transporte de productos

El costo de transporte para los productos incluye el costo de transporte desde las plantas de procesamiento secundarias ( $\beta plantaprod_{i,j,p,k}^{Transp}$ ) y desde la planta central de procesamiento ( $\beta cenprod_{j,p,k}^{Transp}$ ).

$$CostTransProd = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} gprod_{i,j,p,k}^{planta} \cdot \beta plantaprod_{i,j,p,k}^{Transp} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} gprod_{i,j,p,k}^{cen} \cdot \beta cenprod_{j,p,k}^{Transp} \quad (3.2.50)$$

### 3.2.1.29 Costo de operación total

El costo de operación total ( $CostOperacional$ ) está dado por la suma de los costos de operación asociados para las plantas de procesamiento secundarias ( $CostHub_{i,j}^{op}$ ), la planta central de procesamiento ( $CostCen_j^{op}$ ) y las unidades de tratamiento de agua ( $CostWT_{s,n}^{op}$ ).

$$CostOperacional = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} CostHub_{i,j}^{op} + \sum_{j \in J} CostCen_j^{op} + \sum_{s \in S} \sum_{n \in N} CostWT_{s,n}^{op} \quad (3.2.51)$$

### 3.2.1.30 Costo de capital total

El costo de capital total ( $CostCapital$ ) incluye los costos de capital asociados a las plantas de procesamiento secundarias ( $CostHub_{i,j}^{cap}$ ), planta central de procesamiento ( $CostCen_j^{cap}$ ) y unidades de tratamiento de agua ( $CostWT_{s,n}^{cap}$ ).

$$CostCapital = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} CostHub_{i,j}^{cap} + \sum_{j \in J} CostCen_j^{cap} + \sum_{s \in I} \sum_{n \in N} CostWT_{s,n}^{cap} \quad (3.2.52)$$

### 3.2.1.31 Ganancia por ventas

Las ganancias por ventas (*VentaProd*) corresponden a los ingresos por la venta de los productos y el agua, esta ganancia se determina como sigue:

$$VentaProd = \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} G_{p,k}^{con} \beta_p^{prod} + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} Hw_{s,m} \beta_m^{agua} \quad (3.2.53)$$

### 3.2.1.32 Función objetivo económica

La función objetivo económica (*FOE*) incluye el costo por la cosecha de lirio acuático (*CostCosecha*), más el costo asociado al transporte de agua (*CostTransAgua*), biomasa (*CostTransBM*) y productos (*CostTransProd*), más el costo operacional (*CostOperacional*) y el costo de capital (*CostCapital*), menos el ingreso por la venta de productos (*VentaProd*) y un incentivo fiscal (*Incentivo*). En este contexto, el costo total anual es dado de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} FOE = & CostCosecha + CostTransAgua \\ & + CostTransBM + CostTransProd + CostOperacional + K_F \times CostCapital \\ & - VentaProd - Incentivo \end{aligned} \quad (3.2.54)$$

### 3.2.1.33 Porcentaje de lirio acuático eliminado

En este estudio, la función objetivo ambiental es la maximización del porcentaje de lirio acuático eliminado. Esta función es representativa ambientalmente porque ésta indica cuanto lirio acuático es eliminado desde los cuerpos de agua. El porcentaje de lirio acuático eliminado es definido como sigue:

$$consume = 100 \frac{\sum_s Fwh_s}{\sum_s Fwh_s^{\max}} \quad (3.2.55)$$

### 3.2.1.34 Puntos de importancia del modelo

El problema de optimización consiste en la minimización del costo total anual, el cual se encuentra dado por la Ecuación (3.2.54) y la maximización del porcentaje de lirio acuático eliminado dado por la Ecuación (3.2.55) sujeto a las ecuaciones (3.2.1) a (3.2.53). Para resolver el modelo de optimización multi-objetivo se ha implementado el método “*constraint*”; en este contexto, se pueden generar un conjunto de soluciones Pareto que muestran la relación entre los dos objetivos. El problema para la minimización de *FOE* sujeto a las ecuaciones (3.2.1) a (3.2.53) y a una restricción para el porcentaje de lirio eliminado se debe resolver varias veces para generar la curva Pareto. Se han considerado dos alternativas, en un primer caso para una baja eliminación de lirio acuático y en un segundo caso para una alta eliminación de lirio acuático.

El modelo de optimización optimiza simultáneamente la selección de las tecnologías de conversión para el lirio acuático y los tratamientos de agua; también, toma en cuenta la optimización del tamaño y localización para las plantas de procesamiento distribuidas y la planta de procesamiento central para considerar las economías de escala, además, el modelo considera cuales productos deben ser seleccionados y la distribución de los productos en los diferentes mercados.

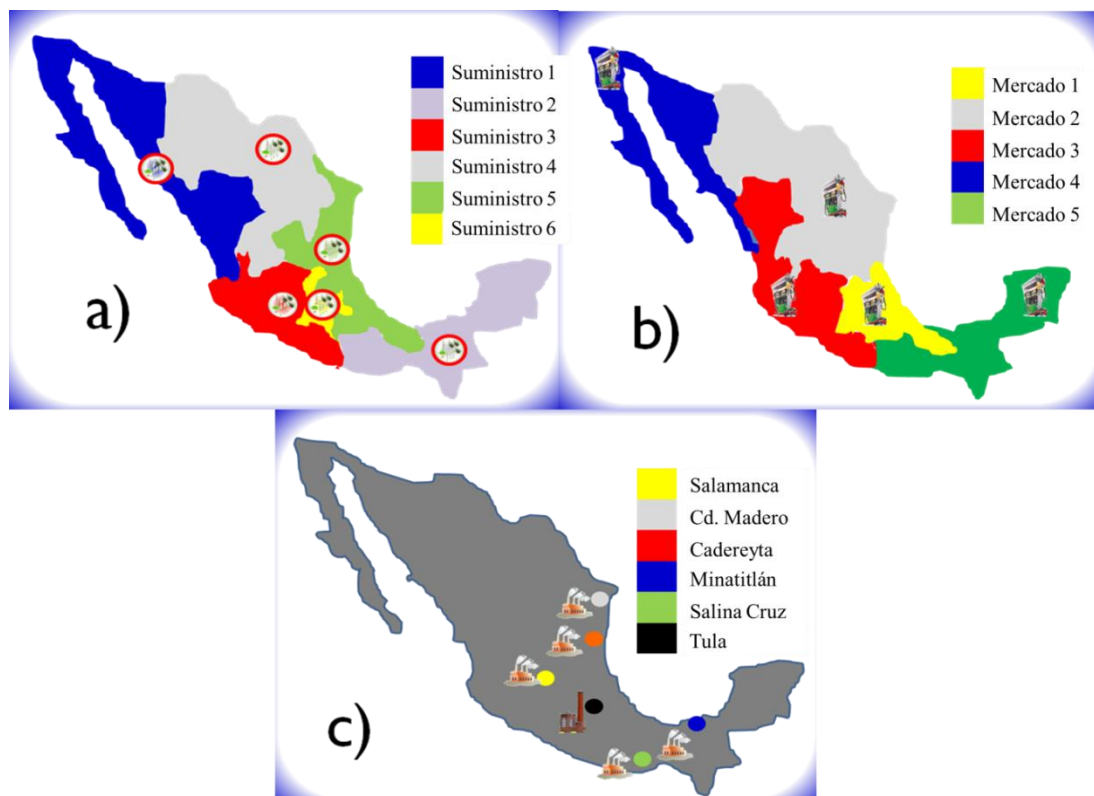
Si el número de lugares potenciales para instalar las plantas de procesamiento secundarias y la planta central se incrementa, el tiempo de cómputo incrementa exponencialmente. Si se quiere reducir el tiempo de cómputo se puede realizar una implementación para obtener buenos valores iniciales.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

El presente capítulo se divide en dos secciones, las cuales definen los casos de estudio abordados en las distintas etapas del proyecto desarrollado. Además, se presenta la discusión de los resultados obtenidos para la planificación óptima de un sistema distribuido de biorefinerías basado en múltiples alimentaciones así como lirio acuático.

### 4.1 Definición del primer caso de estudio y discusión de resultados

La metodología propuesta es aplicada a un caso de estudio para establecer un sistema de biorefinería en México. Este caso considera seis diferentes lugares donde la materia prima puede ser producida, la cual puede ser procesada en seis distintas locaciones, además, considera cinco lugares donde los productos son vendidos, la distribución es mostrada en la Figura 4.1, para la determinación de éstos lugares se tomaron en cuenta datos de materia prima obtenidos a partir de SAGARPA-SIAP (2011) y SEMARNAT (2012), así como, datos para mercados y fábricas de procesamiento a partir de PEMEX (2012).



**Figura 4.1 Definición de lugares para el caso de estudio propuesto: a) Lugares de suministro, b) Mercados, c) Plantas de procesamiento**

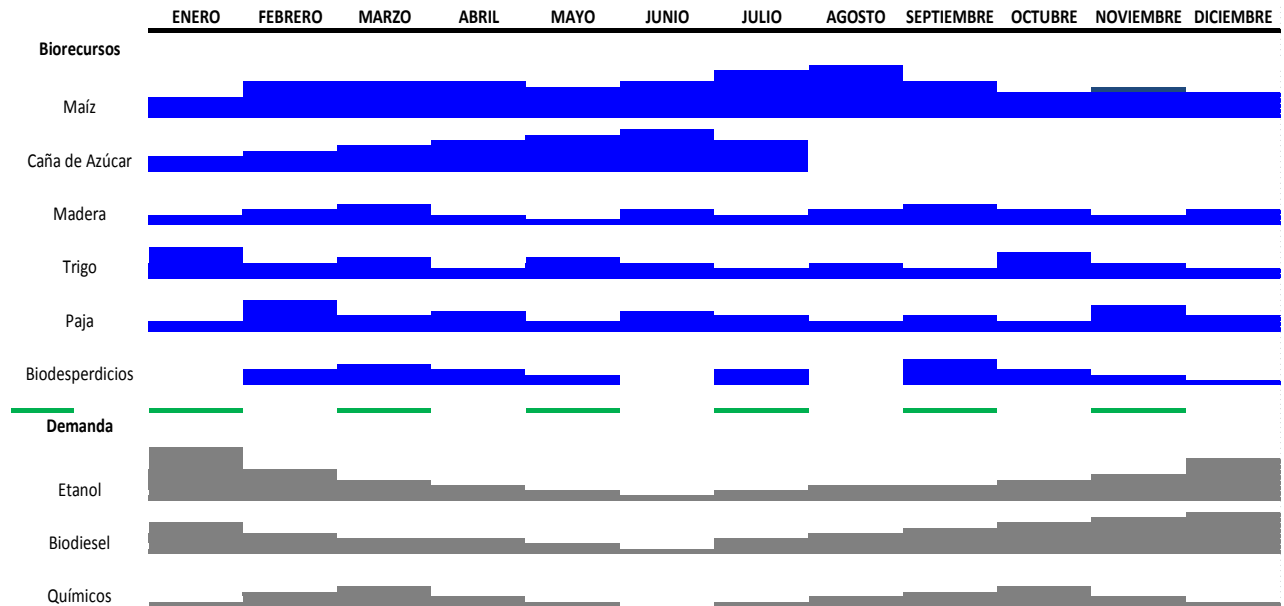
Este caso involucra nueve materias primas (astillas de madera, madera comercial, caña de azúcar, maíz, sorgo, sorgo dulce, girasol, palma africana y jatropha) disponibles en México, las cuales pueden ser usadas como alimentación para obtener dos productos principales (bioetanol y biodiesel). También se consideran cuatro diferentes rutas de procesamiento (Gasificación y biosíntesis, hidrólisis y fermentación, gasificación y síntesis química y transesterificación). Los factores de conversión para las 4 diferentes tecnologías de procesamiento fueron tomados a partir de Chouinard-Dussault y col. (2011), Holtzaple y Granda (2009), Jones y col. (2009), Santibañez-Aguilar y col. (2011), los cuales se muestran en la Tabla 4.1. Es importante mencionar que aunque no se tiene autosuficiencia en México de algunas materias primas como el maíz o la jatropha, se supuso un escenario para observar si el modelo seleccionaba estas materias primas y ayudar con la toma de decisiones.

**Tabla 4.1 Factores de conversión de material prima a producto para las diferentes rutas de procesamiento**

| <b>Producto</b> | <b>Materia Prima</b> | <b>Ruta de Procesamiento</b>                   | <b>Relación Masa</b> |
|-----------------|----------------------|--|----------------------|
| Bioetanol       | Astillas de madera   | Pretratamiento hidrólisis ácida y fermentación | 0.1669               |
| Bioetanol       | Astillas de madera   | Gasificación y biosíntesis                     | 0.2625               |
| Bioetanol       | Astillas de madera   | Gasificación y síntesis química                | 0.1887               |
| Bioetanol       | Caña de azúcar       | Pretratamiento hidrólisis ácida y fermentación | 0.0592               |
| Bioetanol       | Maíz                 | Pretratamiento hidrólisis ácida y fermentación | 0.3149               |
| Bioetanol       | Sorgo                | Pretratamiento hidrólisis ácida y fermentación | 0.2999               |
| Bioetanol       | Sorgo dulce          | Pretratamiento hidrólisis ácida y fermentación | 0.0553               |
| Biodiesel       | Palma africana       | Extracción y transesterificación con metanol   | 0.2064               |
| Biodiesel       | Jatropha             | Extracción y transesterificación con metanol   | 0.3268               |
| Biodiesel       | Girasol              | Extracción y transesterificación con metanol   | 0.2850               |

Por otro lado, cada biorecurso considerado tiene asociado un costo de producción, impacto ambiental y empleos generados por unidad de biorecurso. Además, la disponibilidad de cada biorecurso en los diferentes lugares de suministro depende de la región y la temporada del año. En este contexto, la demanda de cada producto tiene dependencia con el tiempo además (ver

Figura 4.2), en países como México el clima puede cambiar drásticamente a lo largo del año, lo cual hace aún más importante la consideración de la disponibilidad y demanda variable a lo largo del año. Los datos para los biorecursos son mostrados en las Tablas 4.2 y 4.3.



**Figura 4.2 Representación general de la variabilidad de la disponibilidad de biorecursos y demanda de productos a lo largo de la época del año para un lugar específico**

**Tabla 4.2 Costo, Eco-indicador<sup>99</sup> unitario y empleos generados por unidad de biomasa producida**

| Materia Prima      | Costo US\$/Ton | Eco-indicador 99/Ton | Empleos/Ton |
|--------------------|----------------|----------------------|-------------|
| Astillas de madera | 86.60          | 211.12               | 2.9925E-04  |
| Madera comercial   | 60.62          | 169.32               | 2.9925E-04  |
| Caña de azúcar     | 28.98          | 12.14                | 7.6652E-03  |
| Maíz               | 207.40         | 199.78               | 6.3356E-07  |
| Sorgo              | 167.77         | 250.56               | 1.9000E-07  |
| Sorgo dulce        | 31.11          | 41.84                | 1.9000E-07  |
| Palma Africana     | 66.31          | 14.61                | 2.9925E-04  |
| Jatropha           | 110.40         | 14.61                | 2.9925E-04  |
| Girasol            | 269.07         | 614.38               | 1.9000E-07  |

FUENTE: Santibañez-Aguilar y col.,(2011)

Tabla 4.3a Disponibilidad de las materias primas a lo largo del año para los diferentes lugares de suministro considerados

| Materia prima                       | Lugar de Suministro | Año       |           |           |           |           |           |           |         |            |         |           |           | Anual      |
|-------------------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|------------|---------|-----------|-----------|------------|
|                                     |                     | Enero     | Febrero   | Marzo     | Abril     | Mayo      | Junio     | Julio     | Agosto  | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |            |
| Materia prima de Ingenieria Química | 1                   | 533,008   | 395,977   | 775,646   | 529,242   | 744,649   | 558,202   | 389,363   | 0       | 0          | 0       | 0         | 0         | 3,926,087  |
|                                     | 2                   | 3,025,668 | 1,094,683 | 2,184,954 | 1,669,491 | 1,334,888 | 282,295   | 113,518   | 0       | 0          | 0       | 0         | 0         | 9,705,497  |
|                                     | 3                   | 2,748,833 | 1,116,699 | 1,470,949 | 1,820,716 | 752,872   | 366,686   | 110,452   | 0       | 0          | 0       | 0         | 0         | 8,387,207  |
|                                     | 5                   | 6,219,260 | 4,458,579 | 5,769,145 | 5,178,078 | 3,426,659 | 682,132   | 1,384,818 | 0       | 0          | 0       | 0         | 0         | 2,711,8671 |
|                                     | 6                   | 594,493   | 258,901   | 348,528   | 296,504   | 370,420   | 0         | 0         | 0       | 0          | 0       | 0         | 0         | 1,868,846  |
|                                     | Maíz                | 1         | 194       | 222       | 29,763    | 84,305    | 1,785,225 | 3,224,777 | 89,881  | 3,778      | 7,337   | 281,066   | 11,1428   | 224,323    |
|                                     | 2                   | 11,805    | 58,713    | 62,752    | 65,346    | 57,243    | 64,597    | 16,306    | 12,392  | 4,203      | 223,921 | 497,902   | 460,400   | 1,535,580  |
|                                     | 3                   | 1,319     | 255       | 5,180     | 78,290    | 37,821    | 10,311    | 8,037     | 1,079   | 225        | 603,659 | 1,787,921 | 2,580,913 | 5,115,010  |
|                                     | 4                   | 0         | 0         | 0         | 0         | 270       | 1,705     | 0         | 1,419   | 0          | 241,622 | 1,047,587 | 110,359   | 1,402,962  |
|                                     | 5                   | 9,633     | 15,896    | 30,375    | 108,580   | 237,199   | 85,922    | 242,639   | 190,775 | 45,317     | 304,867 | 1,056,438 | 615,297   | 2,942,938  |
|                                     | 6                   | 0         | 0         | 0         | 1,490     | 1,289     | 914       | 1,307     | 478     | 170        | 55,190  | 612,789   | 995,510   | 1,669,137  |
| Sorgo                               | 1                   | 0         | 1,000     | 9,466     | 215,244   | 8,045     | 23,186    | 394,771   | 59,919  | 44,783     | 7,791   | 80,092    | 103,934   | 948,231    |
|                                     | 2                   | 0         | 747       | 7,864     | 27,216    | 13,364    | 10,315    | 3,773     | 597     | 130        | 1,117   | 7,023     | 17,127    | 89,273     |
|                                     | 3                   | 896       | 16        | 1,993     | 15,101    | 7,849     | 3,680     | 428       | 492     | 2,959      | 456,005 | 959,629   | 519,013   | 1,968,061  |
|                                     | 4                   | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 19,066    | 4,400     | 10,059  | 1,243      | 22,183  | 52,547    | 27,017    | 136,515    |
|                                     | 5                   | 480       | 0         | 19,865    | 85,780    | 45,188    | 1,893,824 | 501,646   | 1,821   | 9,927      | 881     | 87,819    | 329,187   | 2,976,418  |
|                                     | 6                   | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0       | 0          | 13,641  | 191,951   | 41,774    | 247,366    |
| Sorgo dulce                         | 1                   | 7,625     | 58,755    | 12,414    | 84,221    | 25,722    | 45,410    | 48,943    | 199,258 | 424,088    | 227,577 | 332,236   | 184,921   | 1,651,170  |
|                                     | 2                   | 0         | 0         | 4,787     | 1,852     | 1,060     | 1,095     | 0         | 220     | 317        | 406     | 1039      | 365       | 11,141     |
|                                     | 3                   | 17,786    | 6,151     | 38,791    | 11,3274   | 9,782     | 10,491    | 3,519     | 3,409   | 5,476      | 229,133 | 257,755   | 307,985   | 1,003,552  |
|                                     | 4                   | 0         | 0         | 0         | 0         | 180       | 50,413    | 39,083    | 475,238 | 304,165    | 346,089 | 253,728   | 183,950   | 1,652,846  |
|                                     | 5                   | 0         | 595       | 2,755     | 4,600     | 7,115     | 0         | 2,725     | 4,000   | 7,289      | 3,581   | 16,410    | 4,560     | 53,630     |
|                                     | 6                   | 0         | 0         | 0         | 225       | 1,105     | 233       | 447       | 4,743   | 1,148      | 2,256   | 3046      | 5,933     | 19,136     |

FUENTE: SAGARPA-SIAP, (2011); SEMANRNAT, (2012)

Tabla 4.3b Disponibilidad de las materias primas a lo largo del año para los diferentes lugares de suministro considerados

| Materia prima    | Lugar de Suministro | Enero  | Febrero | Marzo  | Abril   | Mayo   | Junio     | Julio   | Agosto  | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | Anual     |
|------------------|---------------------|--------|---------|--------|---------|--------|-----------|---------|---------|------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Girasol          | 1                   | 17,786 | 7,898   | 60,908 | 357,586 | 32,251 | 45,087    | 402,063 | 64,145  | 50,706     | 238,447 | 345,909   | 429,411   | 2,052,197 |
|                  | 3                   | 480    | 0       | 19,865 | 85,780  | 45,188 | 1,893,824 | 501,646 | 1,821   | 9,927      | 14,522  | 279,770   | 370,961   | 322,3784  |
|                  | 4                   | 8,96   | 16      | 1,993  | 15,101  | 7,849  | 22,746    | 4,828   | 10,551  | 4,202      | 478,188 | 1,012,176 | 546,030   | 210,4576  |
|                  | 5                   | 7,625  | 59,350  | 15,169 | 88,821  | 33,017 | 95,823    | 90,751  | 678,496 | 735,542    | 577,247 | 602,374   | 373,431   | 3,357,646 |
| Maderas          | 1                   | 5,084  | 5,084   | 5,084  | 5,084   | 5,084  | 5,084     | 5,084   | 5,084   | 5,084      | 5,084   | 5,084     | 5,084     | 61,006    |
|                  | 2                   | 1,701  | 1,701   | 1,701  | 1,701   | 1,701  | 1,701     | 1,701   | 1,701   | 1,701      | 1,701   | 1,701     | 1,701     | 20,408    |
|                  | 3                   | 3,311  | 3,311   | 3,311  | 3,311   | 3,311  | 3,311     | 3,311   | 3,311   | 3,311      | 3,311   | 3,311     | 3,311     | 39,730    |
|                  | 4                   | 4,213  | 4,213   | 4,213  | 4,213   | 4,213  | 4,213     | 4,213   | 4,213   | 4,213      | 4,213   | 4,213     | 4,213     | 50,559    |
|                  | 5                   | 779    | 779     | 779    | 779     | 779    | 779       | 779     | 779     | 779        | 779     | 779       | 779       | 9,354     |
|                  | 6                   | 779    | 779     | 779    | 779     | 779    | 779       | 779     | 779     | 779        | 779     | 779       | 779       | 9,354     |
| Madera Comercial | 1                   | 1,841  | 1,841   | 1,841  | 1,841   | 1,841  | 1,841     | 1,841   | 1,841   | 1,841      | 1,841   | 1,841     | 1,841     | 22,087    |
|                  | 2                   | 616    | 616     | 616    | 616     | 616    | 616       | 616     | 616     | 616        | 616     | 616       | 616       | 7,389     |
|                  | 3                   | 1,199  | 1,199   | 1,199  | 1,199   | 1,199  | 1,199     | 1,199   | 1,199   | 1,199      | 1,199   | 1,199     | 1,199     | 14,384    |
|                  | 4                   | 1,525  | 1,525   | 1,525  | 1,525   | 1,525  | 1,525     | 1,525   | 1,525   | 1,525      | 1,525   | 1,525     | 1,525     | 18,304    |
|                  | 5                   | 282    | 282     | 282    | 282     | 282    | 282       | 282     | 282     | 282        | 282     | 282       | 282       | 3,386     |
|                  | 6                   | 282    | 282     | 282    | 282     | 282    | 282       | 282     | 282     | 282        | 282     | 282       | 282       | 3,386     |
| Palma Africana   | 2                   | 24,517 | 24,517  | 24,517 | 24,517  | 24,517 | 24,517    | 24,517  | 24,517  | 24,517     | 24,517  | 24,517    | 24,517    | 294,204   |
|                  | 5                   | 6,129  | 6,129   | 6,129  | 6,129   | 6,129  | 6,129     | 6,129   | 6,129   | 6,129      | 6,129   | 6,129     | 6,129     | 73,548    |
| Jatropha         | 2                   | 44,150 | 44,150  | 44,150 | 44,150  | 44,150 | 44,150    | 44,150  | 44,150  | 44,150     | 44,150  | 44,150    | 44,150    | 529,800   |
|                  | 3                   | 44,150 | 44,150  | 44,150 | 44,150  | 44,150 | 44,150    | 44,150  | 44,150  | 44,150     | 44,150  | 44,150    | 44,150    | 529,800   |
|                  | 4                   | 44,150 | 44,150  | 44,150 | 44,150  | 44,150 | 44,150    | 44,150  | 44,150  | 44,150     | 44,150  | 44,150    | 44,150    | 529,800   |

FUENTE: SAGARPA-SIAP, (2011); SEMANRNAT, (2012)

De la misma manera, la demanda para los biocombustibles en México depende significativamente de la temporada del año para diferentes mercados en forma parecida a la mostrada en la Figura 4.2. En este contexto, las Tablas 4.4 y 4.5 presentan la demanda de cada producto a lo largo del año en México considerando el escenario para el etanol que forma 10% en volumen en la gasolina y que el biodiesel es parte de 5% volumen en el biodiesel convencional, mientras que la Tabla 4.6 muestra el Eco-indicador<sup>99</sup> por el uso de bioetanol y biodiesel que son los productos considerados en el caso de estudio.

**Tabla 4.4 Demanda de etanol en cada Mercado a lo largo del año para el escenario considerado (Ton/año) para el año 2012**

| <b>Periodo</b> | <b>Mercado 1</b> | <b>Mercado 2</b> | <b>Mercado 3</b> | <b>Mercado 4</b> | <b>Mercado 5</b> |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Enero          | 181,960          | 81,091           | 114,146          | 95,858           | 70,515           |
| Febrero        | 121,307          | 54,061           | 76,097           | 63,905           | 47,010           |
| Marzo          | 90,980           | 40,545           | 57,073           | 47,929           | 35,257           |
| Abril          | 75,817           | 33,788           | 47,561           | 39,941           | 29,381           |
| Mayo           | 75,817           | 33,788           | 47,561           | 39,941           | 29,381           |
| Junio          | 60,653           | 27,030           | 38,049           | 31,953           | 23,505           |
| Julio          | 60,653           | 27,030           | 38,049           | 31,953           | 23,505           |
| Agosto         | 75,817           | 33,788           | 47,561           | 39,941           | 29,381           |
| Septiembre     | 75,817           | 33,788           | 47,561           | 39,941           | 29,381           |
| Octubre        | 90,980           | 40,545           | 57,073           | 47,929           | 35,257           |
| Noviembre      | 121,307          | 54,061           | 76,097           | 63,905           | 47,010           |
| Diciembre      | 181,960          | 81,091           | 114,146          | 95,858           | 70,515           |
| <b>Anual</b>   | <b>1,213,068</b> | <b>540,606</b>   | <b>760,970</b>   | <b>639,054</b>   | <b>470,098</b>   |

FUENTE: PEMEX, (2010); SENER, (2012)

**Tabla 4.5 Demanda de biodiesel en cada Mercado a lo largo del año para el escenario considerado (Ton/año) para el año 2012**

| <b>Periodo</b> | <b>Mercado 1</b> | <b>Mercado 2</b> | <b>Mercado 3</b> | <b>Mercado 4</b> | <b>Mercado 5</b> |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Enero          | 25,709           | 13,482           | 20,469           | 17,289           | 12,631           |
| Febrero        | 51,419           | 26,963           | 40,938           | 34,578           | 25,261           |
| Marzo          | 38,564           | 20,223           | 30,703           | 25,933           | 18,946           |
| Abril          | 19,282           | 10,111           | 15,352           | 12,967           | 9,473            |
| Mayo           | 16,068           | 8,426            | 12,793           | 10,806           | 7,894            |
| Junio          | 16,068           | 8,426            | 12,793           | 10,806           | 7,894            |
| Julio          | 12,855           | 6,741            | 10,234           | 8,644            | 6,315            |
| Agosto         | 12,855           | 6,741            | 10,234           | 8,644            | 6,315            |
| Septiembre     | 12,855           | 6,741            | 10,234           | 8,644            | 6,315            |
| Octubre        | 16,068           | 8,426            | 12,793           | 10,806           | 7,894            |
| Noviembre      | 16,068           | 8,426            | 12,793           | 10,806           | 7,894            |
| Diciembre      | 19,282           | 10,111           | 15,352           | 12,967           | 9,473            |
| <b>Anual</b>   | <b>257,093</b>   | <b>134,817</b>   | <b>204,689</b>   | <b>172,889</b>   | <b>126,307</b>   |

FUENTE: PEMEX, (2010); SENER, (2012)

**Tabla 4.6 Eco-indicator<sup>99</sup> para el uso de los productos considerados**

| <b>Producto</b> | <b>Eco-indicator<sup>99</sup>/Ton</b> |
|-----------------|---------------------------------------|
| Bioetanol       | 32.12                                 |
| Biodiesel       | 10.15                                 |

FUENTE: Santibañez-Aguilar y col., (2011)

Las Tablas 4.7 y 4.8 muestran los datos para el transporte de materias primas y productos para el caso de estudio en México. Estos datos incluyen el costo unitario, distancia, Eco-Indicador<sup>99</sup> y empleos generados. Los datos fueron obtenidos a partir de la metodología reportada por Geodkoop y Spriensma (2001), datos obtenidos a partir del software Greet 1.8d y la Secretaria de Comunicaciones y Transporte.

**Tabla 4.7 Parámetros para el transporte de productos desde las plantas de procesamiento a los mercados**

| Planta de procesamiento | Distancia km | Costo US\$/Ton           | Eco-indicador <sup>99</sup> /Ton | Tipo de Transporte | Mercado |
|-------------------------|--------------|--------------------------|----------------------------------|--------------------|---------|
| Tula (planta principal) | 178.0        | $1.4992 \times 10^{-11}$ | 0.1459                           | Ducto              | 1       |
|                         | 914.8        | $2.8206 \times 10^{-08}$ | 0.7500                           | Camión Cisterna    | 2       |
|                         | 532.3        | $4.4844 \times 10^{-11}$ | 0.4365                           | Ducto              | 3       |
|                         | 2,550.8      | $7.8653 \times 10^{-08}$ | 2.0915                           | Camión Cisterna    | 4       |
|                         | 1,046.9      | $8.8199 \times 10^{-11}$ | 0.8584                           | Ducto              | 5       |
| Salamanca               | 380.3        | $3.2038 \times 10^{-11}$ | 0.3118                           | Ducto              | 1       |
|                         | 702.9        | $2.1672 \times 10^{-08}$ | 0.5763                           | Camión Cisterna    | 2       |
|                         | 277.1        | $2.3341 \times 10^{-11}$ | 0.2272                           | Ducto              | 3       |
|                         | 2,518.9      | $7.7667 \times 10^{-08}$ | 2.0653                           | Camión Cisterna    | 4       |
|                         | 1,889.9      | $1.5922 \times 10^{-10}$ | 1.5496                           | Ducto              | 5       |
| Cadereyta               | 1,020.5      | $3.1466 \times 10^{-08}$ | 0.8367                           | Camión Cisterna    | 1       |
|                         | 26.0         | $2.1904 \times 10^{-12}$ | 0.0213                           | Ducto              | 2       |
|                         | 898.9        | $2.7716 \times 10^{-08}$ | 0.7370                           | Camión Cisterna    | 3       |
|                         | 2,262.5      | $6.9761 \times 10^{-08}$ | 1.8551                           | Camión Cisterna    | 4       |
|                         | 2,530.1      | $2.1315 \times 10^{-10}$ | 2.0746                           | Ducto              | 5       |
| Cd. Madero              | 615.6        | $1.8982 \times 10^{-08}$ | 0.5048                           | Camión Cisterna    | 1       |
|                         | 601.5        | $5.0671 \times 10^{-11}$ | 0.4932                           | Ducto              | 2       |
|                         | 788.7        | $2.4319 \times 10^{-08}$ | 0.6467                           | Camión Cisterna    | 3       |
|                         | 2,814.9      | $8.6796 \times 10^{-08}$ | 2.3081                           | Camión Cisterna    | 4       |
|                         | 1806.4       | $1.5218 \times 10^{-10}$ | 1.4811                           | Ducto              | 5       |
| Minatitlán              | 597.2        | $5.0315 \times 10^{-11}$ | 0.4897                           | Ducto              | 1       |
|                         | 1,461.7      | $1.2315 \times 10^{-10}$ | 1.1985                           | Ducto              | 2       |
|                         | 1,139.0      | $9.5956 \times 10^{-11}$ | 0.9339                           | Ducto              | 3       |
|                         | 3,380.8      | $1.0424 \times 10^{-07}$ | 2.7720                           | Camión Cisterna    | 4       |
|                         | 1,034.4      | $8.7145 \times 10^{-11}$ | 0.8481                           | Ducto              | 5       |
| Salina Cruz             | 819.7        | $6.906 \times 10^{-11}$  | 0.6721                           | Ducto              | 1       |
|                         | 1,684.2      | $1.4189 \times 10^{-10}$ | 1.3810                           | Ducto              | 2       |
|                         | 1,361.5      | $5.1976 \times 10^{-10}$ | 1.1163                           | Barco de carga     | 3       |
|                         | 2,620.0      | $1.0002 \times 10^{-09}$ | 2.1482                           | Barco de carga     | 4       |
|                         | 1,339.9      | $1.1288 \times 10^{-10}$ | 1.0986                           | Ducto              | 5       |

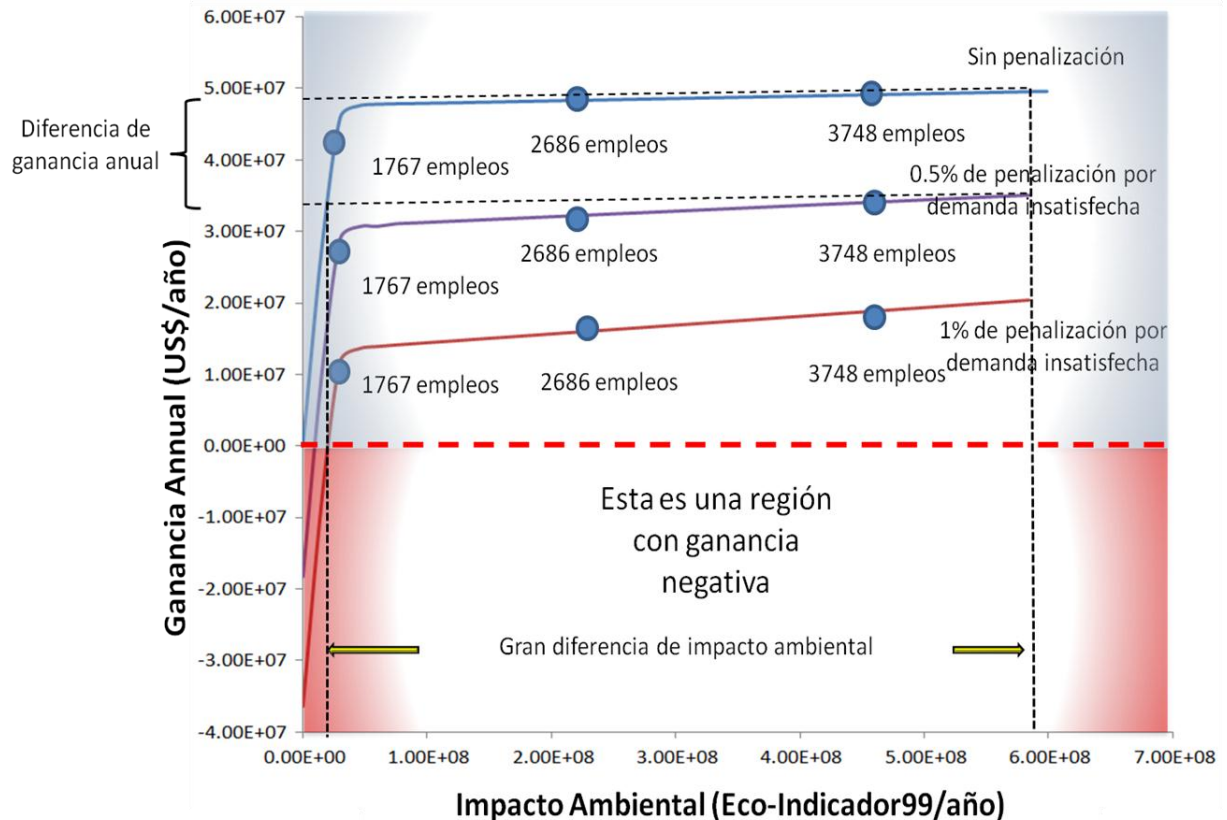
**Tabla 4.8 Datos para el transporte de productos desde la planta principal a las plantas de procesamiento secundarias**

| <b>Distancia km</b> | <b>Costo US\$/Ton</b>    | <b>Eco-<br/>indicador99/Ton</b> | <b>Planta de<br/>procesamiento</b> |
|---------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| 226.3               | $1.9061 \times 10^{-11}$ | 0.18551029                      | Salamanca                          |
| 872.5               | $7.3501 \times 10^{-11}$ | 0.71536049                      | Cadereyta                          |
| 531.2               | $4.4753 \times 10^{-11}$ | 0.43556587                      | Cd. Madero                         |
| 642.3               | $5.4109 \times 10^{-11}$ | 0.52661965                      | Minatitlán                         |
| 870.8               | $7.3359 \times 10^{-11}$ | 0.7139748                       | Salina Cruz                        |

El modelo consiste de 16,167 variables binarias, 130,769 variables continuas y 180,779 restricciones, éste modelo fue codificado en el lenguaje GAMS, tomando 2.2 segundos de tiempo de CPU en promedio para encontrar la solución de cada punto en cada curva Pareto usando el resolvidor CPLEX reportado por Brooke y col. (2011). Es importante mencionar que aunque el número de variables binarias es muy elevado, la mayoría de éstas pueden ser fijadas por el resolvidor antes de iniciar las iteraciones pues se deben a las actividades (procesamiento, transporte, almacenamiento, producción de materia prima) y muchas de ellas no se llevan a cabo en ningún tiempo. La Figura 4.3 muestra la curva Pareto para el caso de estudio considerando como funciones principales la ganancia anual y el impacto ambiental, en ésta figura son identificadas dos secciones. En la primera sección la ganancia incrementa drásticamente mientras el impacto ambiental incrementa sólo un poco; por otro lado, en la segunda sección la ganancia presenta un pequeño incremento y el impacto ambiental presenta un gran aumento en el valor del Eco-indicador99. En esta curva Pareto también el número de empleos incrementa con el impacto ambiental y la ganancia neta anual. Además, diferentes curvas Pareto fueron generadas para compensar los tres diferentes objetivos.

La primera curva presenta la curva Pareto formada por la ganancia neta anual contra el impacto ambiental dejando libre el número de empleos, esta curva muestra que para un impacto ambiental alto se tiene una ganancia alta, y para el menor impacto ambiental se obtiene la menor ganancia. Además, el análisis fue realizado considerando diferente penalización por la demanda insatisfecha, donde la ganancia disminuye para el mismo impacto ambiental, también se observa que para un impacto ambiental dado el número de empleos generados permanece constante.

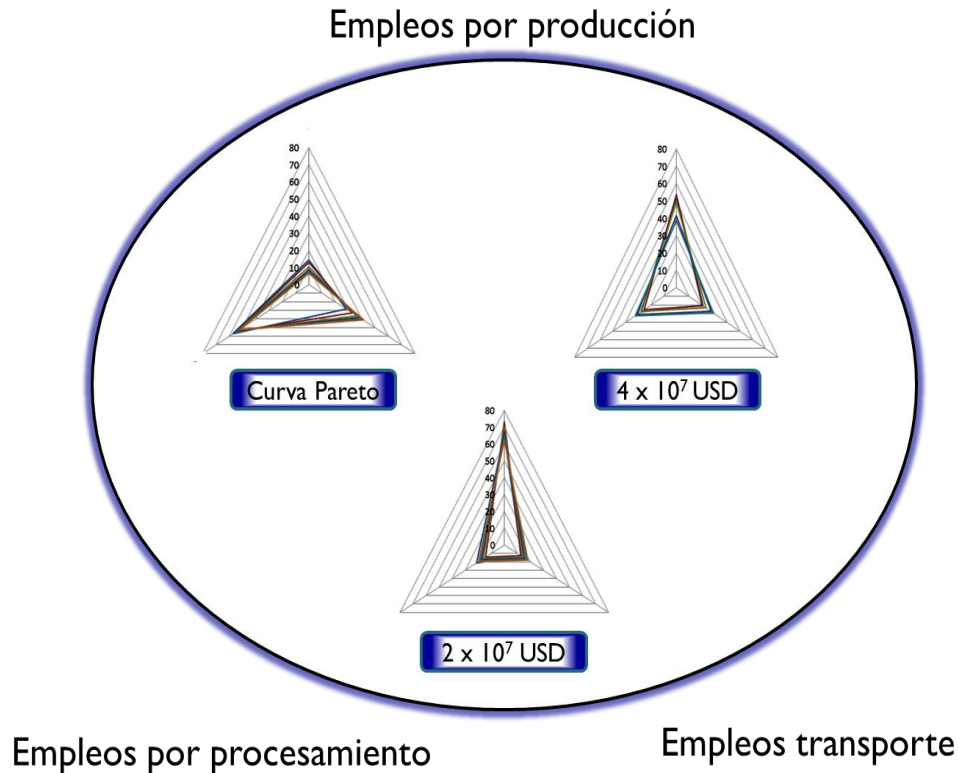
Cuando se considera la penalización se puede producir una ganancia negativa en la zona baja izquierda de la Figura 4.3. Para la curva Pareto la producción de empleos incrementa hasta un valor máximo, cuando las alimentaciones seleccionadas son astillas de madera y sorgo para etanol y jatropha, mientras que la palma africana es usada para producir biodiesel.



**Figura 4.3 Curvas Pareto para la maximización de la ganancia neta anual y la minimización del impacto ambiental global**

Es importante indicar el tipo de empleos generados, porque el impacto social no es el mismo si éstos son generados en la zona de producción de materia prima respecto de zonas industriales. En este contexto, la Figura 4.4 muestra la distribución de los empleos generados para diferentes soluciones de la curva Pareto de la Figura 4.3, donde se puede notar, para éste caso, que el mayor número de empleos generados se dan en la etapa de procesamiento, beneficiando principalmente los lugares donde las plantas de procesamiento son localizadas. Para las soluciones de la curva Pareto de la Figura 4.3 el número de empleos no es considerado como objetivo, y genera que la mayoría de los empleos se dirija hacia los pasos de procesamiento de la

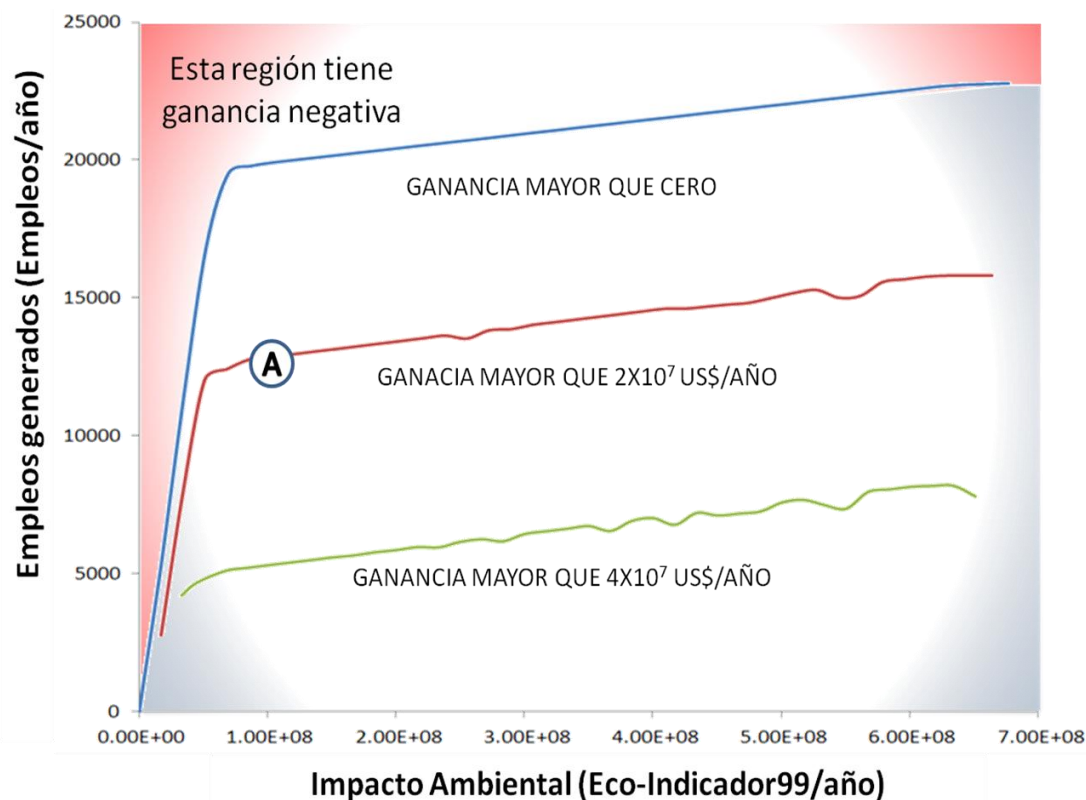
materia prima y al transporte, dejando de lado a los empleos generados en la producción de materias primas, los cuales tienen un mejor efecto en la sociedad, ya que en países como México las materias primas procedentes de la agricultura son producidas en las regiones más pobres.



**Figura 4.4 Análisis de la proporción del número de empleos generados considerando diferentes ganancias mínimas**

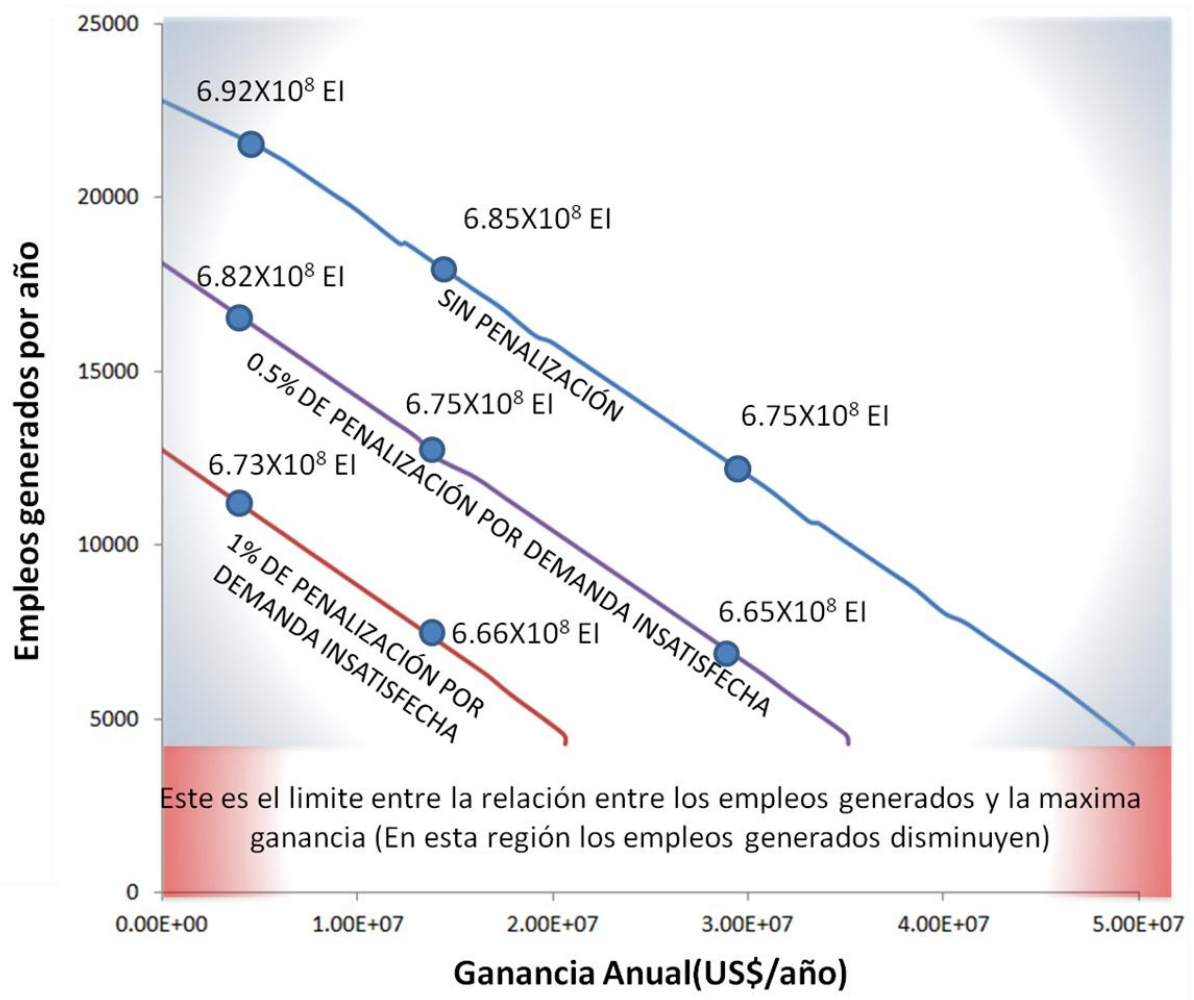
Después del análisis para los objetivos económico y ambiental sin tomar en cuenta el objetivo social, el siguiente análisis es considerar el objetivo social respecto al objetivo ambiental considerando una restricción para una mínima ganancia neta entre cero y  $4 \times 10^7$  USD. La Figura 4.5 muestra las curvas Pareto resultantes, donde el número de empleos es altamente favorecido, alcanzando hasta 23,000 empleos generados. Se puede observar que el número de empleos incrementa conforme el impacto ambiental incrementa; sin embargo, cuando la ganancia neta incrementa el número de empleos disminuye en la Figura 4.5, la cual es muy interesante porque esto ayuda a obtener un máximo impacto social para un impacto ambiental y ganancia neta dados, además de que el comportamiento en cuanto al número de empleos y la ganancia neta es

contrario al mostrado en la Figura 4.3, lo cual es una información muy útil para la toma de decisiones cuando se requiere la implementación de éstas tecnologías.



**Figura 4.5 Curvas Pareto para la maximización del número de empleos generados y la minimización del impacto ambiental global**

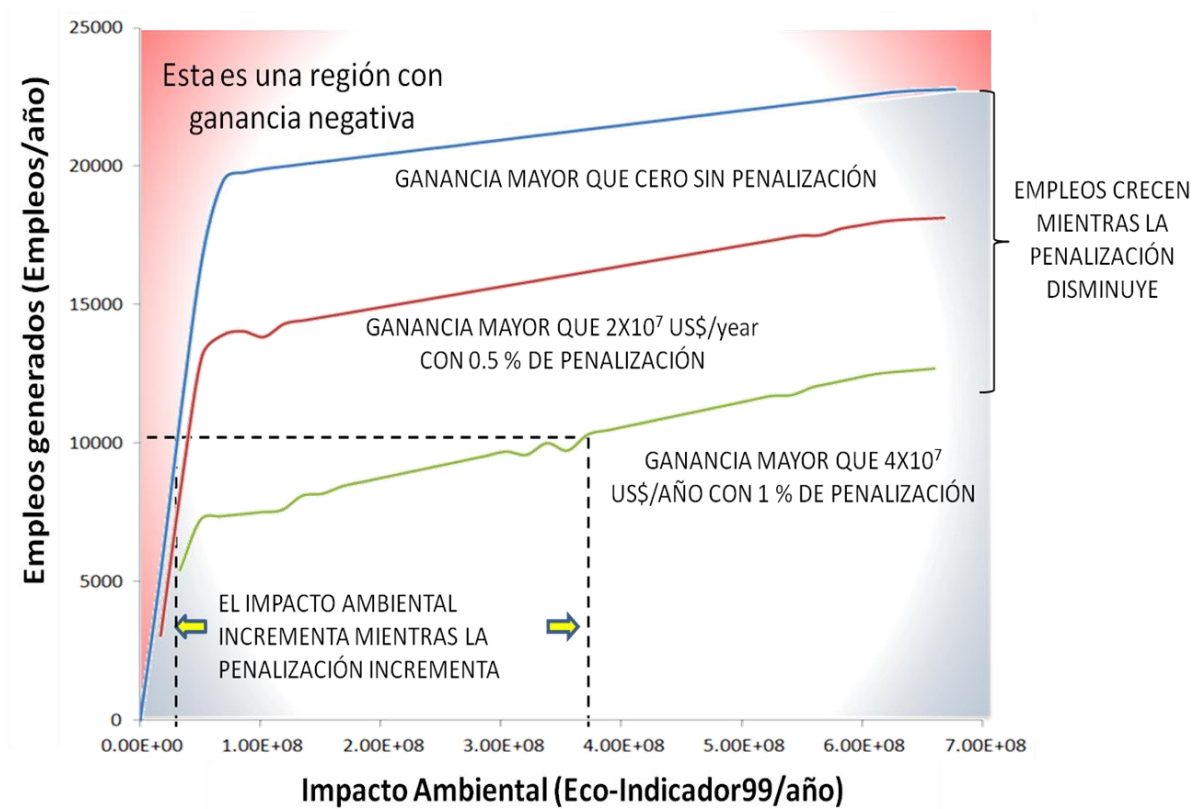
La Figura 4.4 muestra la distribución para el número de empleos generados para el caso cuando el beneficio social es maximizado considerando el impacto ambiental para diferentes valores de límites inferiores para la ganancia neta. Es importante observar que el mayor número de empleos es producido cuando la restricción para la ganancia se encuentra relajada; aunque la mayor parte de estos empleos es dirigida al procesamiento cuando las restricciones para la ganancia neta se mide para el mismo impacto ambiental. Este comportamiento se debe principalmente por el incremento de la alimentación procesada, particularmente el incremento en el número de empleos es observado por la incorporación de caña de azúcar y una pequeña cantidad de sorgo respecto a la curva Pareto de la Figura 4.3 donde éstas materias primas no aparecen en las soluciones óptimas generadas.



**Figura 4.6 Curvas Pareto para la maximización del número de empleos generados y la maximización de la ganancia neta anual**

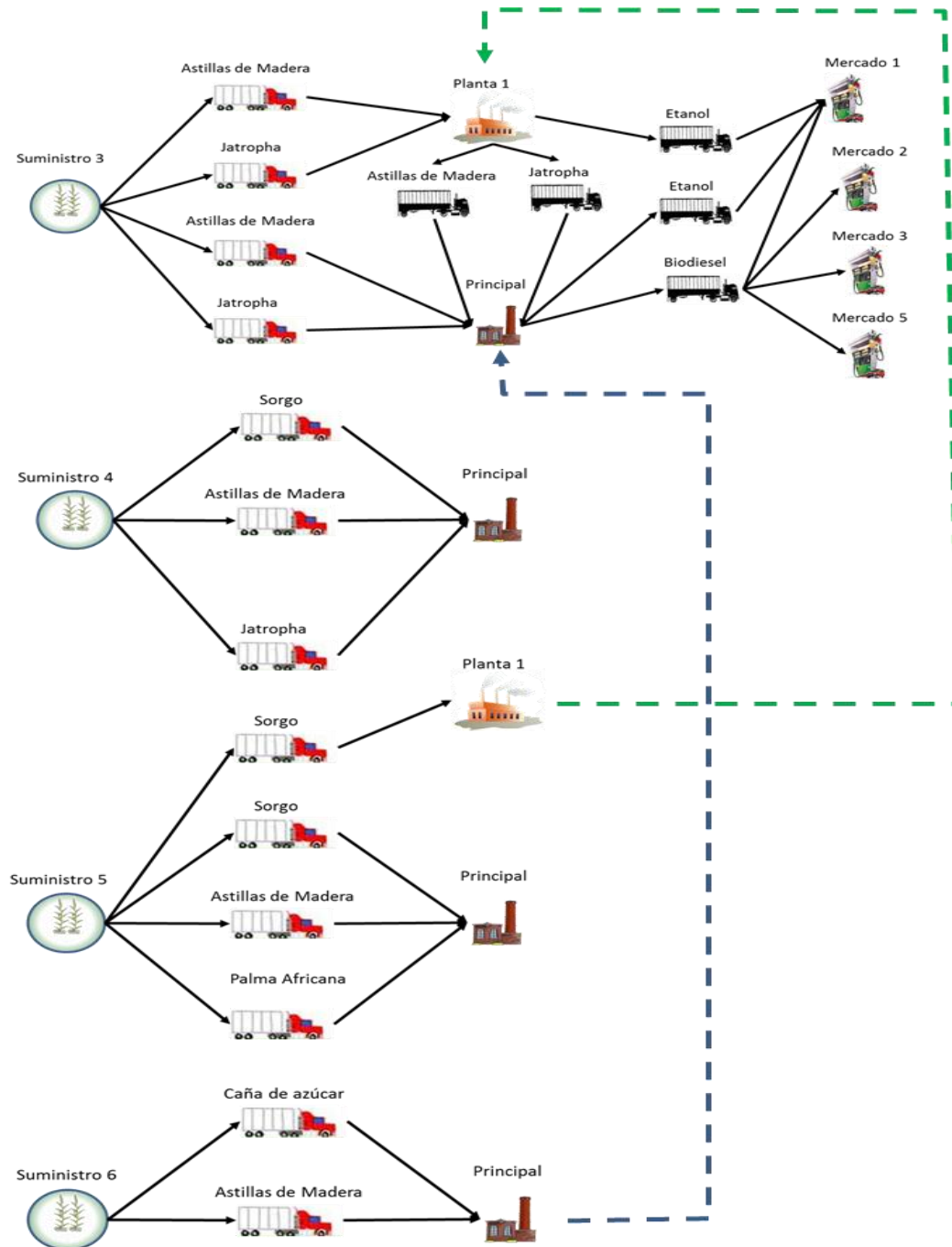
Además, la Figura 4.6 permite hacer un análisis para la maximización de la ganancia neta anual y la maximización del número de empleos generados. Es importante notar que el objetivo económico y el número de empleos se contradicen uno al otro.

Por otro lado, la Figura 4.7 muestra las curvas Pareto para la maximización de los empleos generados y la minimización del impacto ambiental para varios límites inferiores de la ganancia neta considerando diferentes penalizaciones por la demanda insatisfecha. Los resultados muestran que cuando la penalización incrementa, los empleos generados disminuyen para el mismo impacto ambiental. También, si el número de empleos generados es fijado, el impacto ambiental aumenta significativamente cuando la penalización disminuye.



**Figura 4.7 Curvas Pareto para la maximización del número de empleos asociados y la minimización del impacto ambiental considerando varias penalizaciones por demanda insatisfecha**

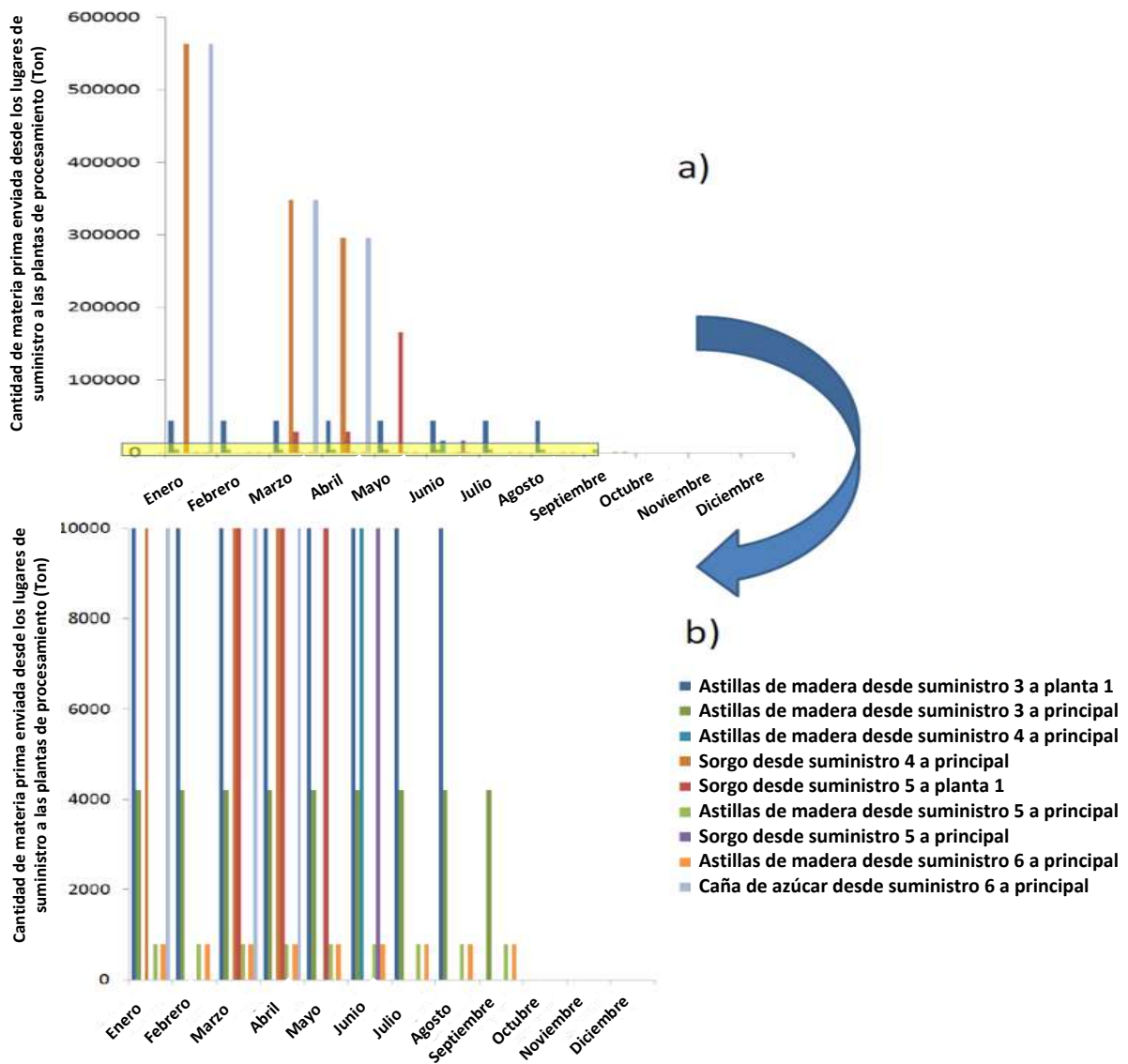
Todas estas figuras ayudan a analizar el comportamiento para los diferentes objetivos y la interacción entre ellos, también ayudan a generar información para la toma de decisiones, seleccionando la mejor solución que satisfaga requerimientos específicos. Por ejemplo en la Figura 4.5 se ha seleccionado el punto A como punto de interés, donde el número de empleos es cerca de 13,000, el impacto ambiental se encuentra en el orden de  $1 \times 10^8$  puntos de Eco-Indicador99 y la ganancia neta es aproximadamente  $\$US 2 \times 10^7$ , puesto que los valores de los objetivos están en valores intermedios entre sus límites mínimos y máximos; además el número de empleos es dirigido principalmente a la producción de materia prima beneficiando así a las regiones más pobres. La configuración de la cadena de suministro y selección de sitios para el punto A de la Figura 4.5 se muestra en la Figura 4.8, donde además se muestran las interacciones entre los lugares de suministro, plantas de procesamiento y mercados.



**Figura 4.8 Representación para la cadena de suministro seleccionada en la solución del punto A de la Figura 4.5**

La Figura 4.8 muestra la interacción entre las materias primas y productos para diferentes lugares de producción, procesamiento y consumo, tomando en cuenta el horizonte completo del tiempo. Cabe mencionar que la Figura 4.8 es una representación de un sistema distribuido, lo cual ayuda a considerar adecuadamente las economías de escala. En la Figura 4.8 se puede observar

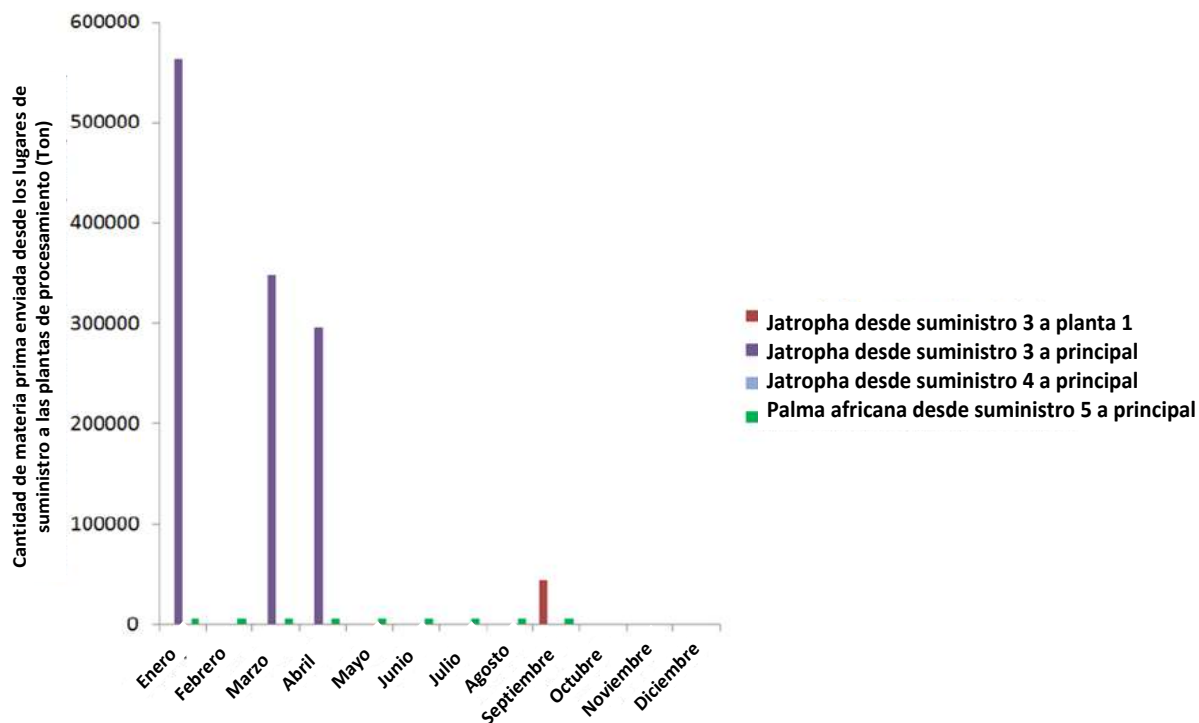
que sólo la planta de procesamiento 1 y la planta principal fueron seleccionas para tratar la variedad de materias primas a lo largo del horizonte del tiempo.



**Figura 4.9 Alimentaciones utilizadas para producción de bioetanol en las diferentes plantas de procesamiento para la solución del punto A. a) Vista general, b) Zoom de la figura**

Además, las Figuras 4.9 y 4.10 muestran las principales alimentaciones utilizadas en las diferentes plantas de procesamiento para la solución del punto A, para producir bioetanol y biodiesel, respectivamente. Se puede observar que las principales alimentaciones para obtener bioetanol son el sorgo y la caña de azúcar, mientras que la jatropha se utiliza para obtener biodiesel.

En este contexto, de acuerdo a la distribución de los productos para el punto A (ver Figuras 4.11 y 4.12) se observa que el etanol solo es enviado al mercado 1 (este mercado es el mayor consumidor), mientras que el biodiesel es enviado desde las plantas de procesamiento a todos los lugares de consumo a excepción del consumidor 4, esto se debe a que se localiza demasiado lejos de los lugares de suministro y plantas de procesamiento.

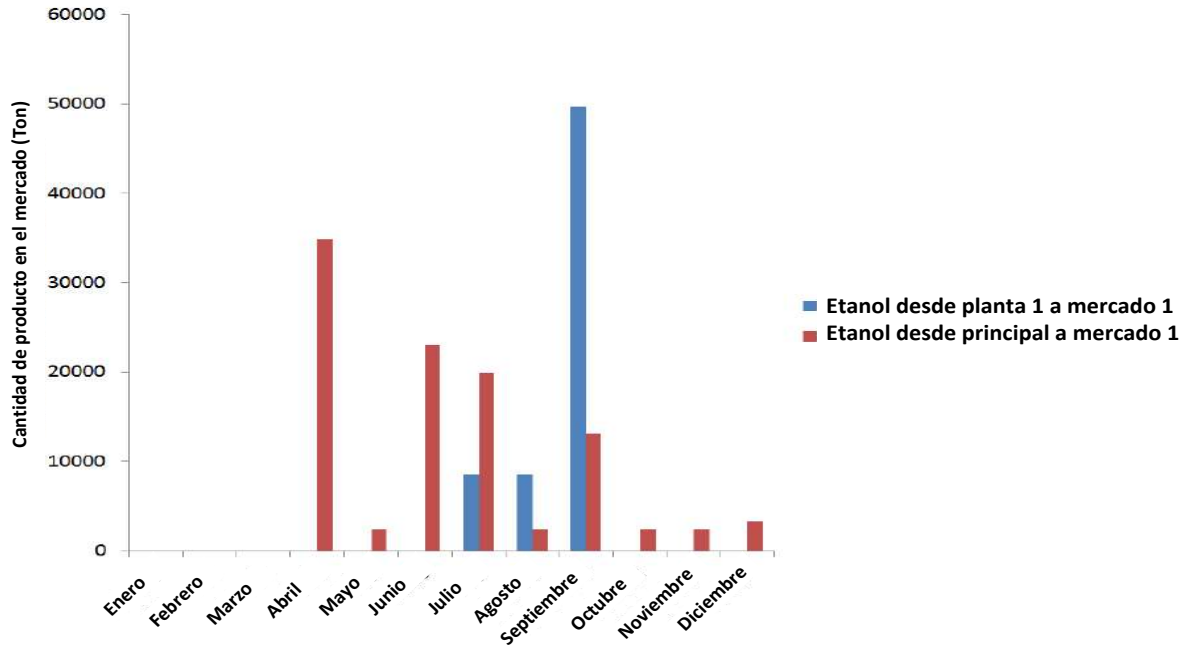


**Figura 4.10 Alimentaciones utilizadas para la producción de biodiesel en las diferentes plantas de procesamiento para la solución A**

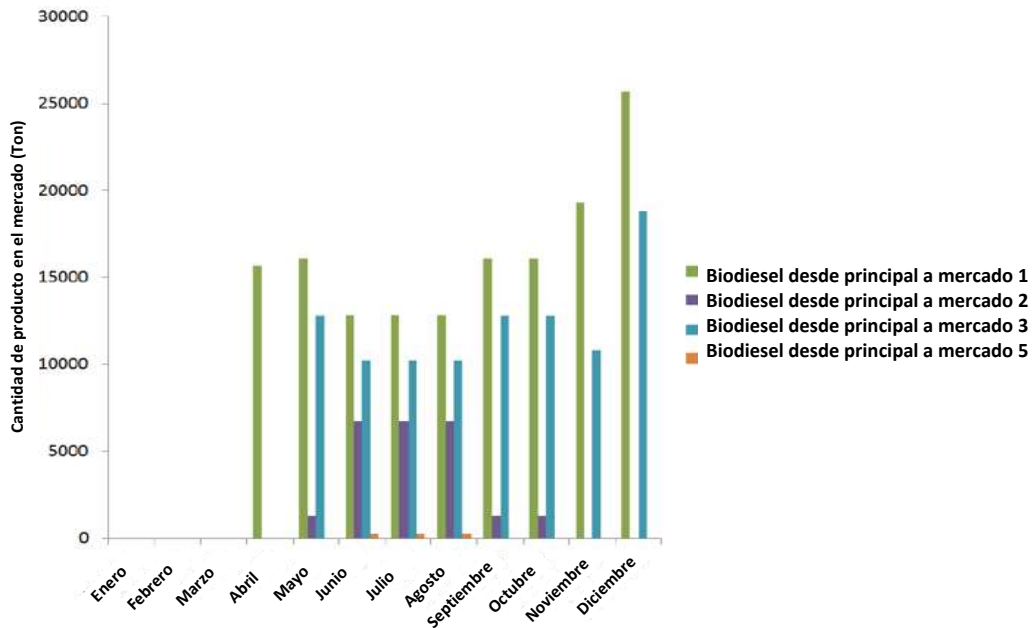
Finalmente, los resultados fueron obtenidos sin complicaciones numéricas y la metodología propuesta puede ayudar a considerar diferentes escenarios que sean capaces de compensar los objetivos involucrados, lo cual es muy útil para la toma de decisiones.

Por otro lado, en este apartado se presentó un modelo para la planificación óptima en un sistema de producción distribuido basado en biorefinerías. El modelo considera factores importantes que deben ser tomados en cuenta para la implementación en estos sistemas, como: a) la consideración simultánea de objetivos económico, ambiental y social; b) la variación de la disponibilidad y costo de los biorecursos a través del año; c) la consideración de un sistema distribuido que tome en cuenta las economías de escala para la instalación de las plantas de

procesamiento. El problema de optimización multi-objetivo incluye restricciones técnicas, económicas, ambientales y sociales. La solución es mostrada a través de un conjunto de curvas Pareto donde se observa el compromiso entre varios objetivos.



**Figura 4.11 Distribución de etanol para la solución del punto A**



**Figura 4.12**

**Distribución de biodiesel para la solución del punto A**

4.2 Definición del segundo caso de estudio y discusión de resultados

Para mostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta se seleccionó un caso de estudio en México. El caso de estudio se ubica en la parte central de México, la cual tiene varios cuerpos de agua infestados de lirio acuático con lo cual se pone en riesgo la sustentabilidad de éstos cuerpos de agua. Se han propuesto e implementado varias alternativas para resolver este problema, las cuales no han dado buenos resultados.

Para aplicar la metodología propuesta en la región seleccionada, primero los sitios potenciales de cosecha son identificados como los cuerpos de agua que se encuentran seriamente infestados con lirio acuático, en este sentido, el lago de Chapala es el lago más importante en México y esta infestado con lirio acuático, este cuerpo de agua se encuentra muy cercano a Guadalajara, la segunda ciudad más grande de México. Otro sitio seleccionado es el río Balsas, el cual es uno de los ríos más grandes de México. Este río es parte primordial de una de las más importantes plantas termo-eléctricas en el estado de Michoacán.



**Figura 4.13 Representación esquemática del caso de estudio propuesto**

Además, los lagos de Pátzcuaro y Cuitzeo son propuestos como sitios de cosecha. Estos lagos se encuentran cercanos a ciudades como Pátzcuaro y Morelia, respectivamente; el lago de Pátzcuaro tiene una especie de pez endémica, llamada pez blanco y el turismo y la pesca son las actividades económicas más importantes en esas regiones. También, el lago de Yuriria es un lago importante en el estado de Guanajuato. En este contexto, los sitios de cosecha seleccionados son cuerpos de agua muy importantes en el sistema. Además, las posibles refinerías y las zonas de demanda corresponden a las principales ciudades alrededor de los cuerpos de agua, ya que el objetivo de un sistema distribuido es disminuir los costos (principalmente costos de transporte) así que las distancias para transportar los distintos materiales deben ser cortas. La Figura 4.13 muestra los cuerpos de agua contaminados con lirio acuático, las zonas de demanda y las plantas de procesamiento, además, la Tabla 4.9 presenta la biomasa disponible de lirio acuático para cada lugar considerado en el caso de estudio.

**Tabla 4.9 Biomasa disponible en cada cuerpo de agua a partir del lirio acuático**

| Cuerpo de agua | Producción de biomasa húmeda (ton/ha año) | Área infestada (ha) | Producción anual de biomasa húmeda (ton/año) | Referencia para área infestada         |
|----------------|---|---------------------|--|--|
| Chapala        | 1,530                                     | 4,500               | 6,887,903                                    | Gobierno de Jalisco (2011)             |
| Pátzcuaro      | 1,530                                     | 3,037               | 4,648,569                                    | Rodríguez-Trejo y Ducoing-Chahó (2003) |
| Cuitzeo        | 1,530                                     | 9,628               | 14,737,052                                   | López y Bocco (2000)                   |
| Yuriria        | 1,530                                     | 5,820               | 8,908,355                                    | INE (2012)                             |
| Sayula         | 1,530                                     | 4,548               | 6,961,374                                    | INE (2012)                             |
| Atotonilco     | 1,530                                     | 1,508               | 2,308,213                                    | INE (2012)                             |
| Balsas         | 1,530                                     | 1,719,220           | 2,631,516,762                                | INE (2012)                             |

La Tabla 4.10 presenta la demanda de cada lugar para los productos; así mismo, en la Tabla 4.11 se muestra la demanda de agua para cada lugar con la restricción de calidad para los contaminantes considerados.

**Tabla 4.10 Demanda para cada producto en cada lugar de consumo**

| Consumidor de producto | Etanol (ton/ año) | Biogás (ton/ año) | Ácido acético (ton/ año) | Composta (ton/ año) | HCF (ton/ año) | Energía (GJ/año) |
|------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|----------------|------------------|
|------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|----------------|------------------|

|                 |         |       |       |     |       |         |
|-----------------|---------|-------|-------|-----|-------|---------|
| Morelia         | 40,512  | 706   | 797   | 799 | 465   | 20,382  |
| Lázaro Cárdenas | 9,933   | 173   | 195   | 20  | 114   | 4,998   |
| Guadalajara     | 212,523 | 3,705 | 4,179 | 419 | 2,441 | 106,923 |
| Querétaro       | 44,548  | 777   | 876   | 88  | 512   | 22,413  |
| León            | 79,798  | 1,391 | 1,569 | 157 | 917   | 40,147  |
| Pátzcuaro       | 4,877   | 85    | 96    | 96  | 56    | 2,454   |
| Celaya          | 78,071  | 1,361 | 1,535 | 154 | 897   | 39,279  |
| Zamora          | 31,014  | 541   | 610   | 61  | 356   | 15,604  |
| Uruapan         | 52,554  | 916   | 1,034 | 104 | 604   | 26,441  |
| Yuriria         | 11,796  | 206   | 232   | 23  | 135   | 5,935   |
| Cuitzeo         | 4,704   | 82    | 93    | 9   | 54    | 2,367   |
| Zacapu          | 12,241  | 213   | 241   | 24  | 141   | 6,159   |

FUENTE: PEMEX, (2010)

**Tabla 4.11 Demanda de agua para los consumidores de agua y máxima concentración de contaminante**

| Consumidor de agua | Demanda de agua (hm <sup>3</sup> /año) | Uso        | Máxima concentración de contaminante (Fracción masa) |
|--------------------|--|------------|--|
| Morelia            | 141                                    | Público    | 5.00x10 <sup>-07</sup>                               |
| Lázaro Cárdenas    | 23                                     | Industrial | 1.00x10 <sup>-06</sup>                               |
| Guadalajara        | 496                                    | Industrial | 1.00x10 <sup>-06</sup>                               |
| Querétaro          | 104                                    | Industrial | 1.00x10 <sup>-06</sup>                               |
| León               | 186                                    | Industrial | 1.00x10 <sup>-06</sup>                               |
| Pátzcuaro          | 17                                     | Público    | 5.00x10 <sup>-07</sup>                               |
| Celaya             | 91                                     | Industrial | 1.00x10 <sup>-06</sup>                               |
| Zamora             | 36                                     | Público    | 5.00x10 <sup>-07</sup>                               |
| Uruapan            | 61                                     | Público    | 5.00x10 <sup>-07</sup>                               |
| Yuriria            | 14                                     | Público    | 5.00x10 <sup>-07</sup>                               |
| Cuitzeo            | 5                                      | Público    | 5.00x10 <sup>-07</sup>                               |
| Zacapu             | 14                                     | Industrial | 1.00x10 <sup>-06</sup>                               |

FUENTE: NOM-001-ECOL,(1996); CONAGUA,( 2012)

Las tecnologías de tratamiento de agua consideradas para la obtención de agua limpia procedente del lirio acuático son mostradas en la Tabla 4.12, en la cual se dan los factores de

eficiencia para remover el contaminante en cada tecnología (En este caso el contaminante es Cr(VI); sin embargo, el modelo puede aplicarse para cualquier tipo de contaminante).

**Tabla 4.12 Eficiencia para remover contaminantes para cada tecnología considerada**

| Tecnología para remover Cr(VI)                 | Eficiencia | Referencia             |
|--|------------|------------------------|
| Intercambio iónico con resinas                 | 0.99       | Rengaraj y col. (2001) |
| Intercambio iónico con clinoptilolite Mexicana | 0.2        | Vaca y col. (2001)     |
| Galvanoplastia HA 216                          | 0.5        | Thomas y col. (2006)   |

La Tabla 4.13 presenta la eficiencia para obtener los productos para las diferentes tecnologías consideradas. Por otro lado, la biomasa es transportada en camión de carga por carretera; los costos unitarios para el transporte de la biomasa son mostrados en la Tabla 4.14, es importante mencionar que el transporte de agua se realiza a través de tuberías y su costo es aproximadamente \$US 1.63/m<sup>3</sup> de agua transportada para distancias de hasta 500 m.

**Tabla 4.13 Eficiencias para tecnologías de procesamiento**

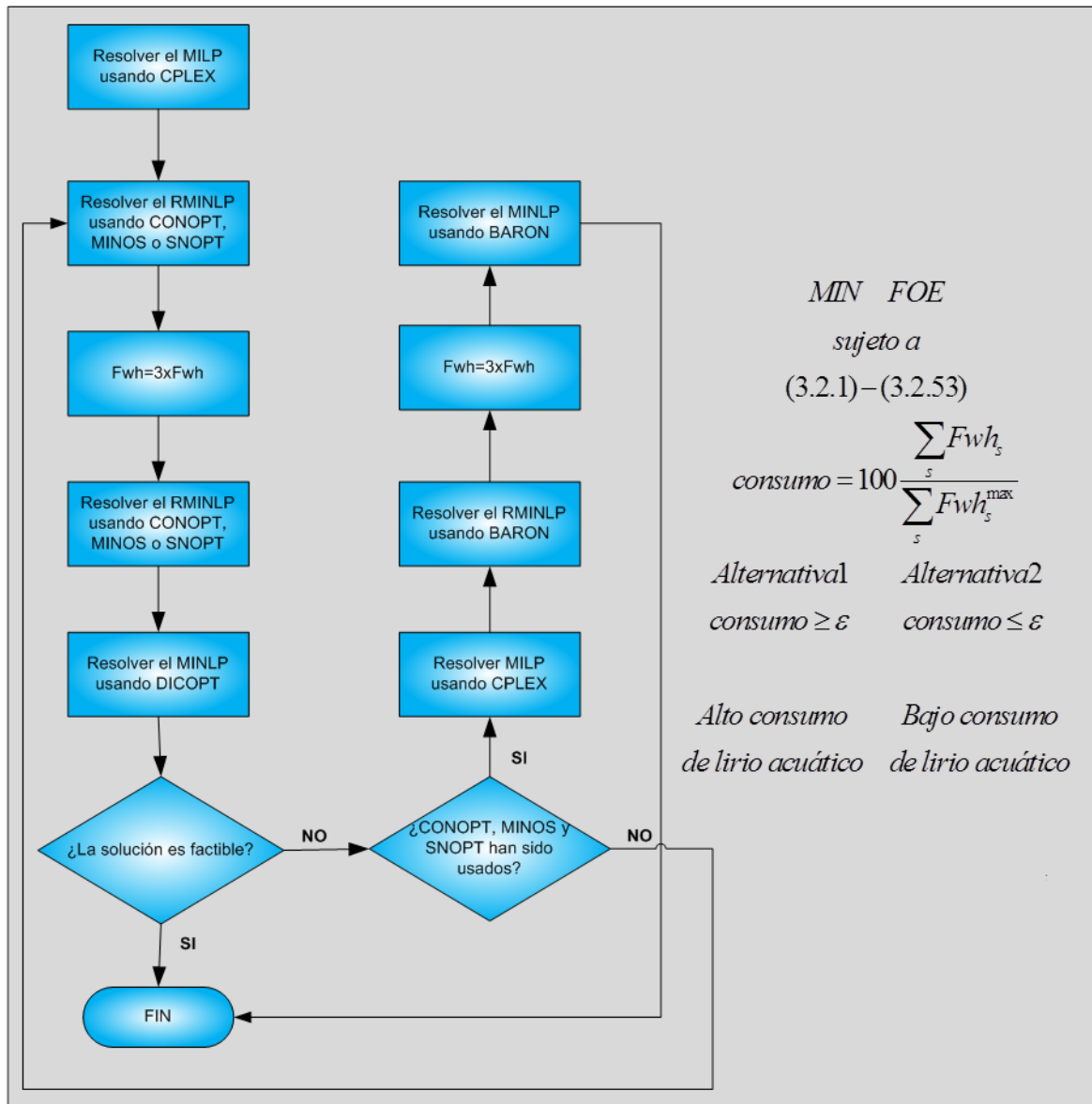
| Producto                  | Tecnología   | Factor de conversión | Unidades  | Referencias                                       |
|---------------------------|--|----------------------|-----------|---|
| Etanol                    | Hidrólisis ácida y fermentación, 10% Ácido sulfúrico | 0.19                 | g/g seco  | Isarankura-Na-Ayudhya y col. (2007), Nigam (2002) |
| Etanol                    | Hidrólisis ácida y fermentación, 1% Ácido sulfúrico  | 0.35                 | g/g seco  | Nigam (2002)                                      |
| Biogás                    | Digestión anaeróbica                                 | 291                  | mL/g seco | Chanakya (1993)                                   |
| Composta                  | Compostaje   | 0.7                  | g/g seco  | Gunnardsson y Petersen (2007)                     |
| Ácido acético             | Proceso MixAlco                                      | 0.3                  | g/g seco  | Forrest y col. (2010)                             |
| Combustible de alto valor | Deoxy licuefacción                                   | 0.05                 | g/g seco  | Lu y col. (2009)                                  |
| Energía                   | Cogeneración   | 15.23                | kJ/g seco | Lu y col. (2009)                                  |

**Tabla 4.14 Costos de transporte para la biomasa desde las fuentes de lirio acuático hasta las plantas de procesamiento. (Basado en un costo constante de transporte de \$US 0.079/ (ton km) para transportar biomasa por carretera**

| Corpo de Agua           | Chapala        |                 | Pátzcuaro      |                 | Cuitzeo        |                 | Yuriria        |                 | Sayula         |                 | Atotonilco     |                 | Balsas         |                 |
|-------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Planta de procesamiento | Distancia (km) | Transp \$US/ton | Distancia (km) | Transp \$US/ton | Distancia (km) | Transp \$US/ton | Distancia (km) | Transp \$US/ton | Distancia (km) | Transp \$US/ton | Distancia (km) | Transp \$US/ton | Distancia (km) | Transp \$US/ton |
| Motelia                 | 284            | 22.44           | 59             | 4.66            | 34             | 2.69            | 64             | 5.06            | 394            | 31.13           | 297            | 23.46           | 250            | 19.75           |
| Lázaro Cárdenas         | 555            | 43.85           | 263            | 20.78           | 341            | 26.94           | 378            | 29.86           | 427            | 33.73           | 476            | 37.60           | 67             | 5.29            |
| León                    | 253            | 19.99           | 259            | 20.46           | 178            | 14.06           | 145            | 11.46           | 329            | 25.99           | 329            | 25.99           | 456            | 36.02           |
| Querétaro               | 359            | 28.36           | 244            | 19.28           | 161            | 12.72           | 139            | 10.98           | 456            | 36.02           | 358            | 28.28           | 439            | 34.68           |
| Guadalajara             | 48             | 3.79            | 282            | 22.28           | 275            | 21.73           | 306            | 24.17           | 111            | 8.77            | 111            | 8.77            | 434            | 34.29           |
| Celaya                  | 299            | 23.62           | 194            | 15.33           | 109            | 8.61            | 67             | 5.29            | 415            | 32.79           | 317            | 25.04           | 389            | 30.73           |
| Zamora                  | 152            | 12.01           | 132            | 10.43           | 159            | 12.56           | 188            | 14.85           | 203            | 16.04           | 143            | 11.30           | 270            | 21.33           |
| Uruapan                 | 261            | 20.62           | 57             | 4.50            | 141            | 11.14           | 172            | 13.59           | 304            | 24.02           | 244            | 19.28           | 168            | 13.27           |
| Yuriria                 | 301            | 23.78           | 117            | 9.24            | 30             | 2.37            | 1              | 0.08            | 408            | 32.23           | 315            | 24.89           | 314            | 24.81           |
| Cuitzeo                 | 272            | 21.49           | 88             | 6.95            | 1              | 0.08            | 30             | 2.37            | 379            | 29.94           | 284            | 22.44           | 283            | 22.36           |
| Zacapu                  | 214            | 16.91           | 65             | 5.14            | 99             | 7.82            | 130            | 10.27           | 321            | 25.36           | 228            | 18.01           | 259            | 20.46           |

Usando estos datos, el modelo matemático fue codificado en GAMS (Brooke y col., 2012), el cual consiste de 210 variables binarias, 8,054 variables continuas y 2,958 restricciones. El problema fue resuelto usando una computadora con un procesador i7 a 2.2 GHz con 6 GB de RAM. Es importante resaltar que el MINLP (Problema Mixto Entero No Lineal por sus siglas en inglés) tiene que ser resuelto varias veces para determinar la curva Pareto de *FOE* contra el porcentaje de lirio acuático eliminado. En este sentido, se deben proporcionar buenos valores iniciales para resolver el problema MINLP. Además, se puede observar que existe un término bilineal en la Ecuación (3.2.17), el cual introduce no convexidades en el modelo del problema, es por ésta razón que es necesario proponer una estrategia de solución para generar buenos valores iniciales, ya que la calidad de la solución para el problema MINLP depende del punto de inicio para la optimización. Si el punto de inicio fuera malo, los resolvedores convencionales MINLP (DICOPT, BARON y SBB) podrían fallar para proveer una solución factible o converger a un óptimo local lejos del óptimo global.

La estrategia de solución sugerida para resolver este problema fue implementada en el lenguaje GAMS, la cual se describe como sigue: 1) El problema MILP es resuelto usando el resolvidor CPLEX. 2) La solución del problema MILP provee los valores de las variables enteras que son usadas para resolver el problema RMINLP usando cualquiera de los resolvedores CONOPT, MINOS o SNOPT. 3) La cantidad de lirio acuático eliminado es fijada como 3 veces del lirio acuático eliminado correspondiente a la solución del problema RMINLP con el fin de resolver el problema MINLP con el resolvidor DICOPT. 4) Si la estrategia previa produce una solución que no sea factible se procede a utilizar el resolvidor BARON para resolver los problemas RMINLP y MINLP. El problema fue resuelto para diferentes niveles de las restricciones para conseguir la curva Pareto; cada punto de la curva Pareto consume desde 1.39 a 4.73 segundos cuando los resolvedores CONOPT, MINOS o SNOPT son usados para resolver el RMINLP, se consume un tiempo desde 0.172 a 0.218 segundos cuando del resolvidor CPLEX es usado para resolver el problema MILP, desde 2.76 a 3.12 segundos cuando el resolvidor DICOPT es usado para resolver el MINLP y finalmente desde 548.28 a 1,203 segundos cuando el resolvidor BARON es usado para resolver los problemas RMINLP así como el MINLP. El procedimiento general de solución es presentado en la Figura 4.14.

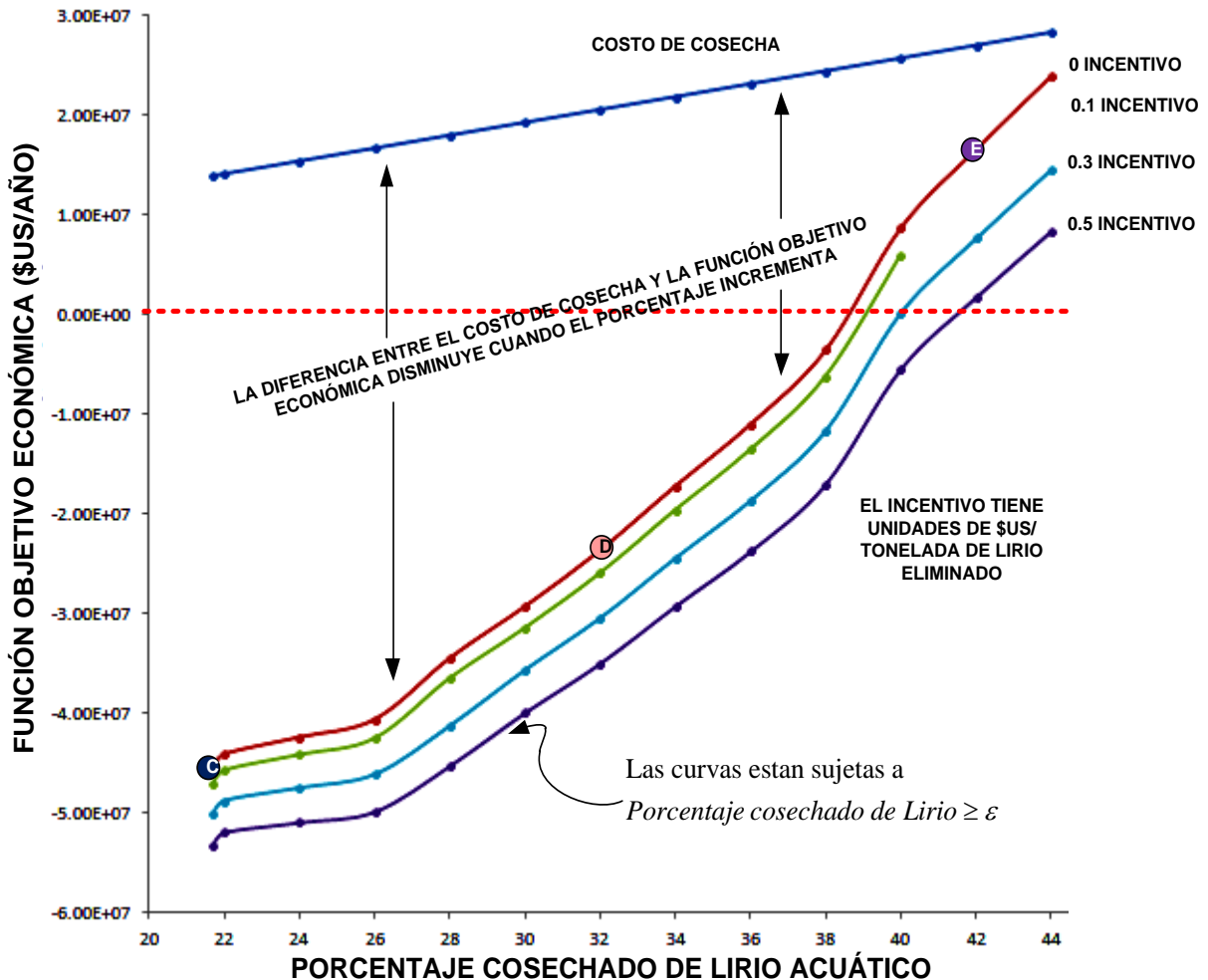


**Figura 4.14 Procedimiento general de solución para resolver el MINLP generado**

Además, el problema fue resuelto para varios incentivos, los cuales son apoyos que se otorgan por la eliminación de lirio acuático de los cuerpos de agua. En este caso, cuatro incentivos fueron considerados (0, 0.1, 0.3 y 0.5 \$US/tonelada de lirio acuático eliminado). Para cada incentivo se obtuvo una curva Pareto, las cuales son mostradas en las Figuras 4.15 y 4.16

Como se puede observar en la Figura 4.15 para la alternativa de una alta eliminación de lirio acuático, la función objetivo económica incrementa cuando la cantidad de lirio acuático eliminado incrementa, lo cual provoca que la diferencia entre el costo de cosecha y el costo total anual disminuya, mientras la cantidad de lirio eliminado aumenta. La parte de las curvas Pareto

con un costo total anual negativo representa soluciones atractivas, ya que el costo total anual es el valor negativo de la ganancia.



**Figura 4.15 Curvas Pareto para alternativa 1**

Por otra parte, en la Figura 4.16, las curvas Pareto son opuestas porque la función objetivo económica comienza en un valor de cero y éste decrece mientras el costo de cosecha aumenta. La máxima cantidad de lirio acuático eliminado es alrededor de 22% y se encuentra representado por la letra C, para un incentivo de cero. El punto C en la Figura 4.16 es la misma solución que la representada con la letra C en la Figura 4.15. Como se puede observar, el punto C representa un punto de inflexión en la curva para la función objetivo económica. La diferencia entre la Figura 4.15 y la Figura 4.16 es que la Figura 4.15 está basada en la alternativa 1 para resolver el

problema (alta eliminación de lirio acuático), de la misma manera la Figura 4.16 representa el caso cuando la cantidad eliminada de lirio acuático es baja.

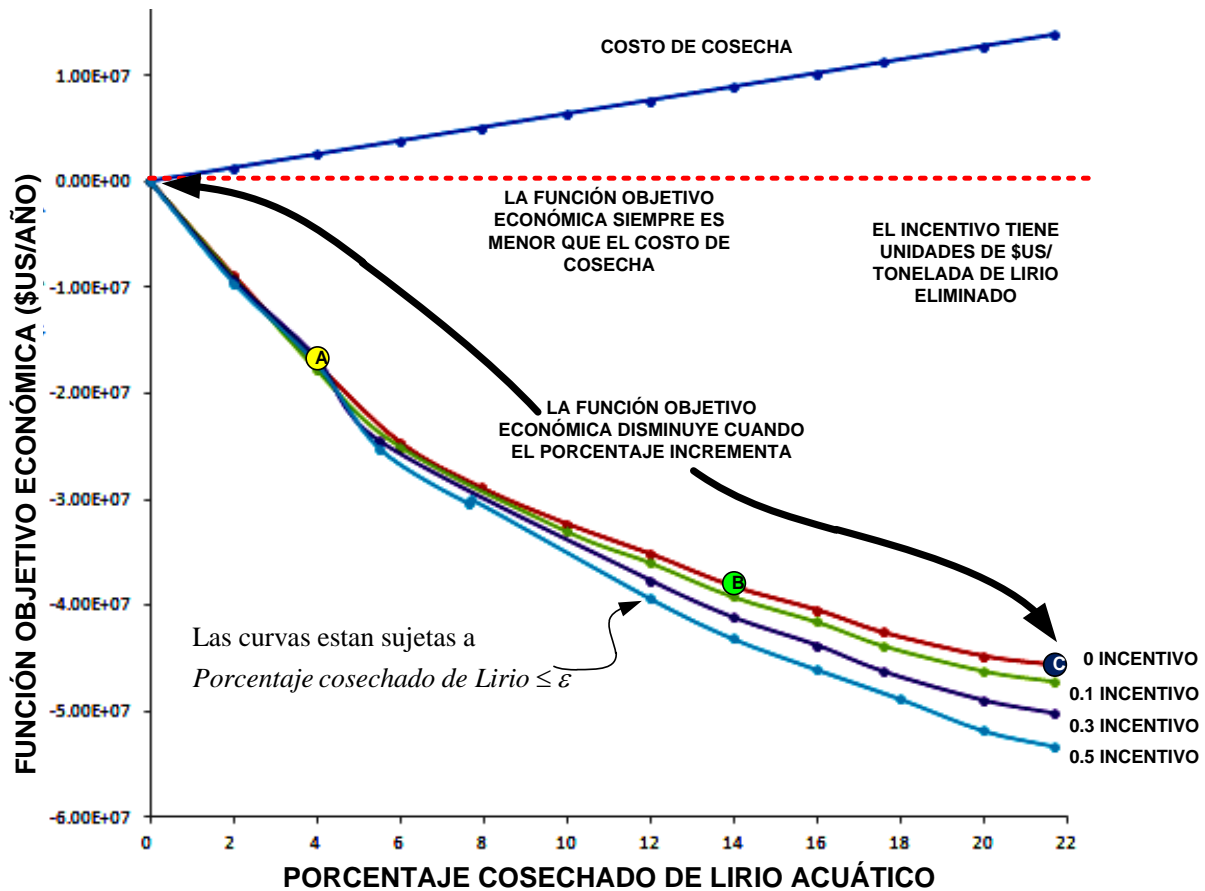


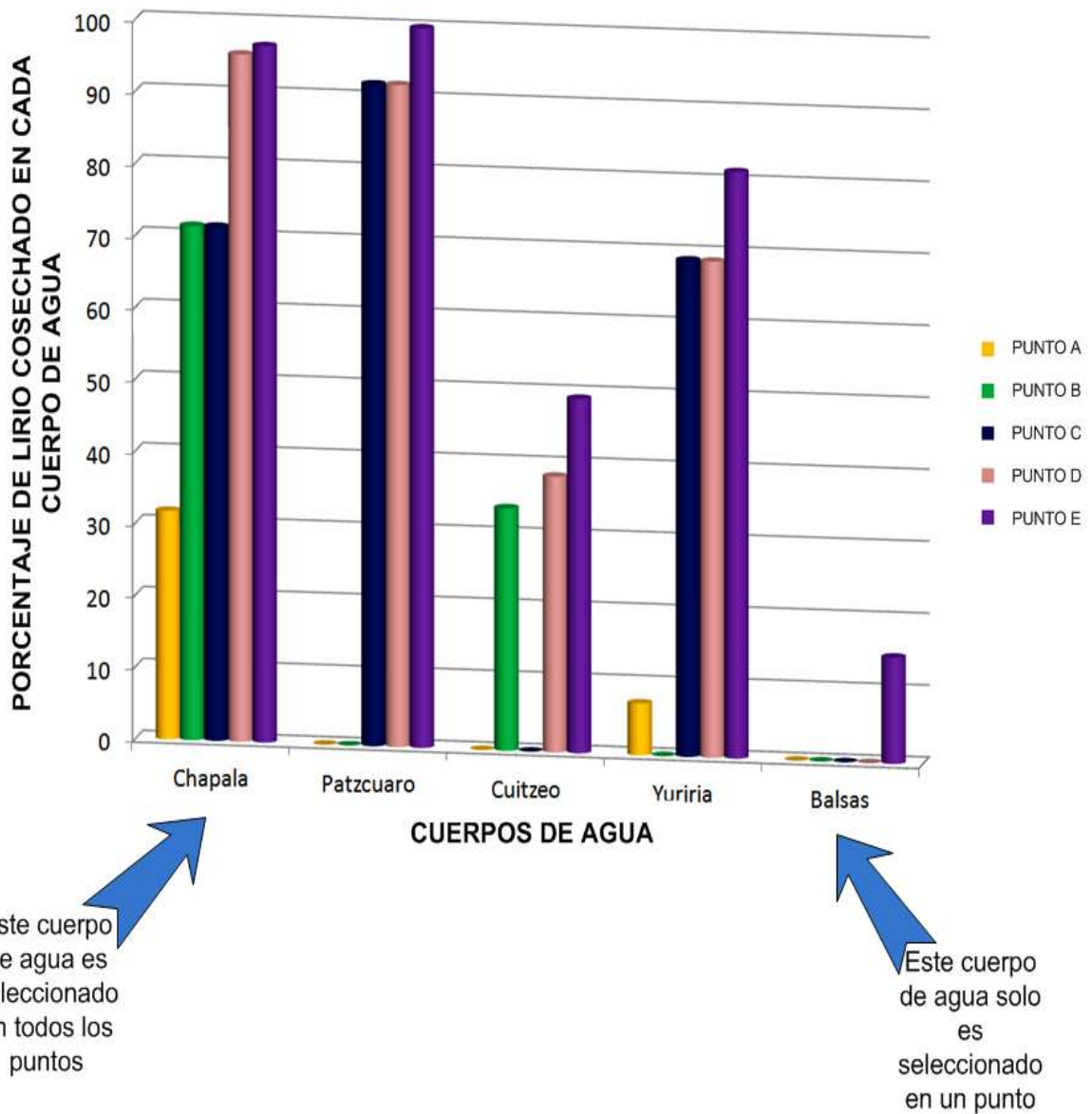
Figura 4.16 Curvas Pareto para alternativa 2

Es importante observar que el costo de cosecha, el cual representa solo la eliminación del lirio acuático, es siempre mayor que la función objetivo económica para el proceso integrado, ya que en ese caso la planta no es utilizada para obtener varios productos. Por otro lado, cuando el lirio acuático es considerado como materia prima para obtener un conjunto de productos, es posible generar soluciones económicamente atractivas.

Un conjunto de puntos fueron seleccionados para observar el cambio de la función objetivo económica respecto al costo de cosecha; por ejemplo, en el punto A el costo de cosecha es \$US 2 564 582 y la función objetivo económica es \$US  $-1.72 \times 10^7$ , entonces la diferencia entre la función objetivo económica (el negativo de la ganancia) y el costo de cosecha es cerca de 700% del costo de cosecha. Esto se explica por las grandes ganancias por la venta de los

diferentes productos producidos. Por otro lado, en el punto C el porcentaje de esta diferencia es alrededor de 400%. Finalmente, en el punto E la diferencia entre el costo de cosecha y las ventas de los productos representan casi el 40% del costo de cosecha.

Se realizó otro análisis cuando cada punto es mostrado en base al porcentaje de lirio acuático eliminado en cada cuerpo de agua, debido a que el porcentaje total eliminado puede ser alto, sin embargo, el porcentaje eliminado de lirio en un cuerpo de agua específico puede ser bajo.



**Figura 4.17 Representación de la eliminación individual de lirio acuático en cada cuerpo de agua**

La Figura 4.17 muestra el consumo individual de lirio acuático en cada cuerpo de agua. El cuerpo de agua principal para el caso de estudio es el Lago de Chapala, el cual es seleccionado en diferentes puntos con diferentes porcentajes. Por ejemplo, el punto A representa una eliminación de 30% del lirio acuático en este lago, mientras que en el punto C casi el 100% del lirio acuático es eliminado desde este cuerpo de agua. Por otra parte, el segundo cuerpo de agua más importante para el sistema en estudio es el río Balsas debido a que este cuerpo de agua tiene una gran cantidad de lirio acuático; sin embargo, el río está localizado cerca de la costa oeste de México y lejos de otros cuerpos de agua y ciudades; es por ello que la eliminación de lirio acuático a partir del río Balsas es seleccionado solo en el punto E. Se puede observar en la Figura 4.15 que éste punto representa un alto consumo de lirio acuático pero también tiene un negativo de la ganancia mayor respecto a otras soluciones. Además, en el problema abordado los cuerpos de agua seleccionados son los lagos de Pátzcuaro, Cuitzeo y Yuriria, los cuales son importantes porque ellos se encuentran localizados cerca de las principales ciudades y están relacionados significativamente con las actividades económicas.

La Figura 4.18 muestra la distribución para la demanda satisfecha de los productos en los diferentes lugares de consumo para los puntos indicados en las Figuras 3.9 y 3.10, la cual muestra que el fertilizante y la energía son los principales productos en todos los puntos se satisface su demanda. El etanol no aparece en ciudades como Pátzcuaro, Lázaro Cárdenas, Querétaro y León. Se observa que la máxima demanda satisfecha de etanol se da en el punto E; también, combustible de alto poder calorífico aparece en éste punto. Además, el proceso MixAlco es utilizado en el punto C para producir ácido acético.

Por otro lado, se realizó un análisis para identificar el impacto de la producción de agua limpia para la minimización del negativo de la ganancia incluyendo varios incentivos y dos alternativas para la producción de agua. La primera opción es cuando se tiene una baja producción de agua mientras que la segunda opción es para una alta producción de agua limpia. El comportamiento es similar para el análisis correspondiente al lirio acuático cosechado. El costo de cosecha es siempre mayor que el negativo de la ganancia, lo cual significa que para este caso siempre existe una ganancia neta positiva. Existe un punto de inflexión entre las dos opciones y se encuentra representado por el punto C de las Figuras 4.19 y 4.20.

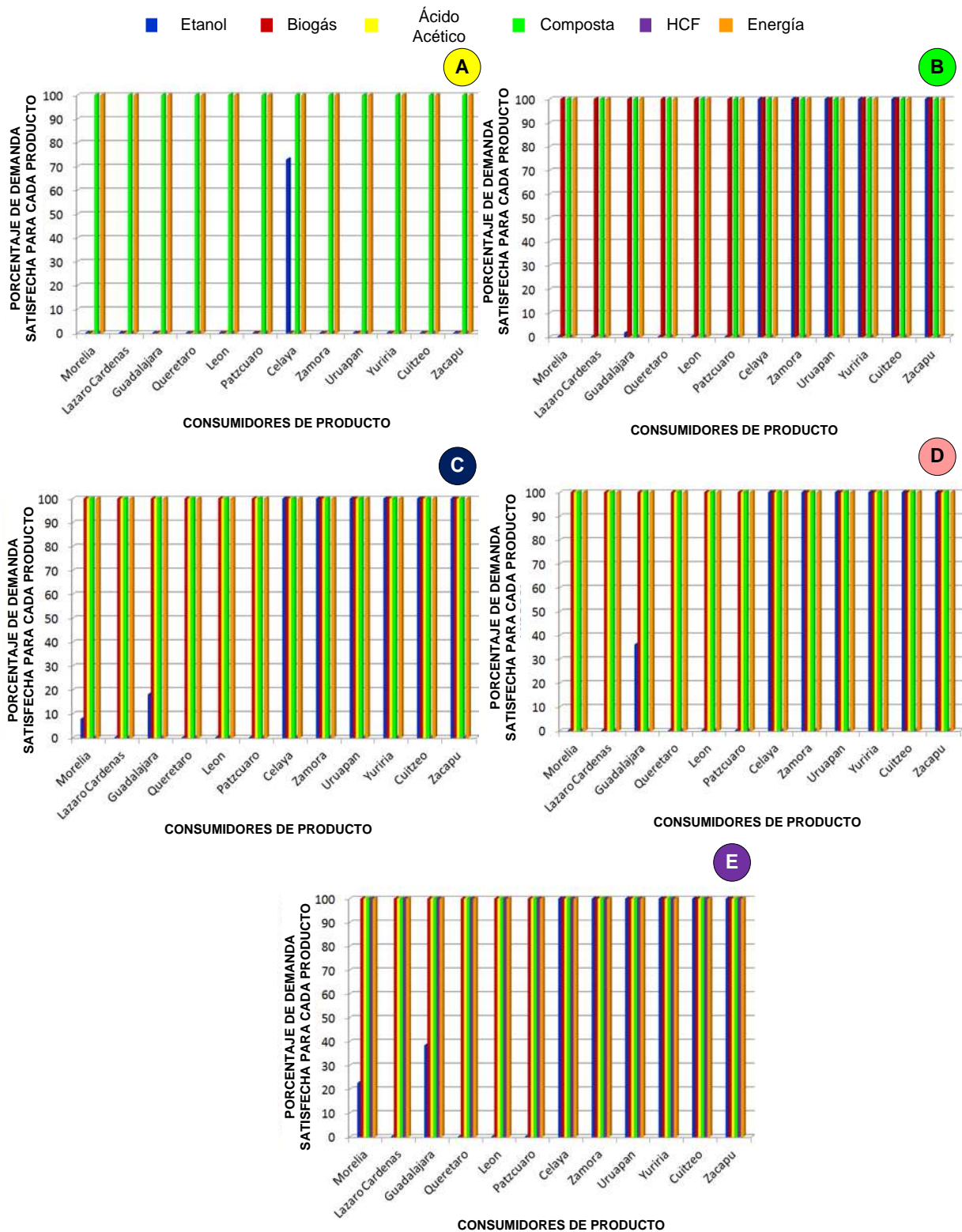
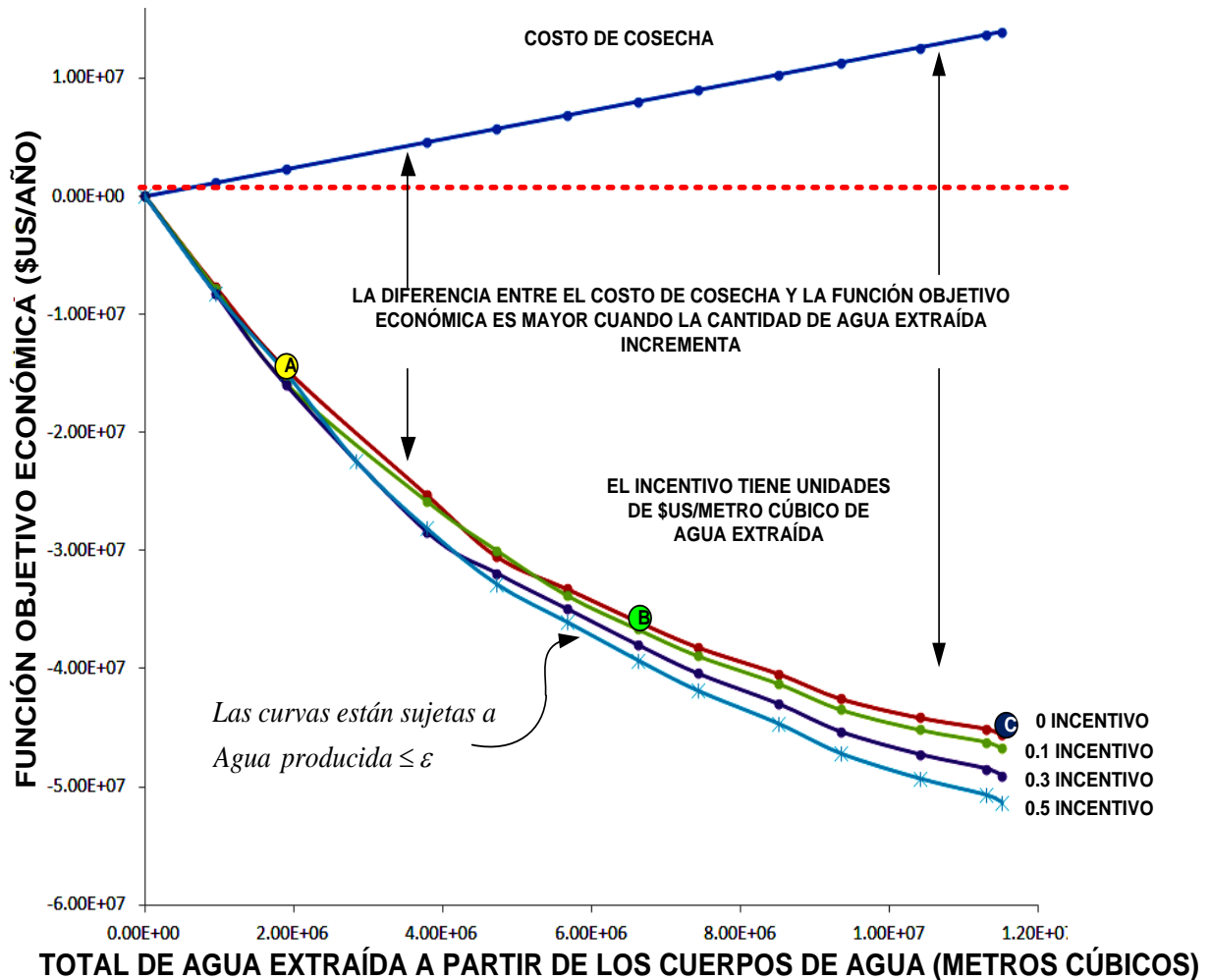


Figura 4.18 Distribución de las demandas satisfechas de productos en diferentes lugares de consumo para lo puntos de las Figuras 4.15 y 4.16



**Figura 4.19** Curvas Pareto para una alta cantidad de agua extraída proveniente del lirio acuático

Se puede observar que en la Figura 4.19 que la función objetivo económica disminuye cuando el incentivo se incrementa, además, el punto donde el negativo de la ganancia es cero corresponde a una cantidad de agua extraída de cero.

Además, es necesario un análisis para conocer los lugares en donde el lirio acuático se cosecha, el agua es extraída y hacia donde se transporta el agua. En este contexto, la Figura 4.21 muestra la distribución de los cuerpos de agua para los diferentes puntos de las curvas Pareto de las Figuras 4.19 y 4.20. La Figura 4.21 muestra también la distribución del agua limpia extraída desde los diferentes cuerpos de agua a los consumidores de agua o ciudades cercanas

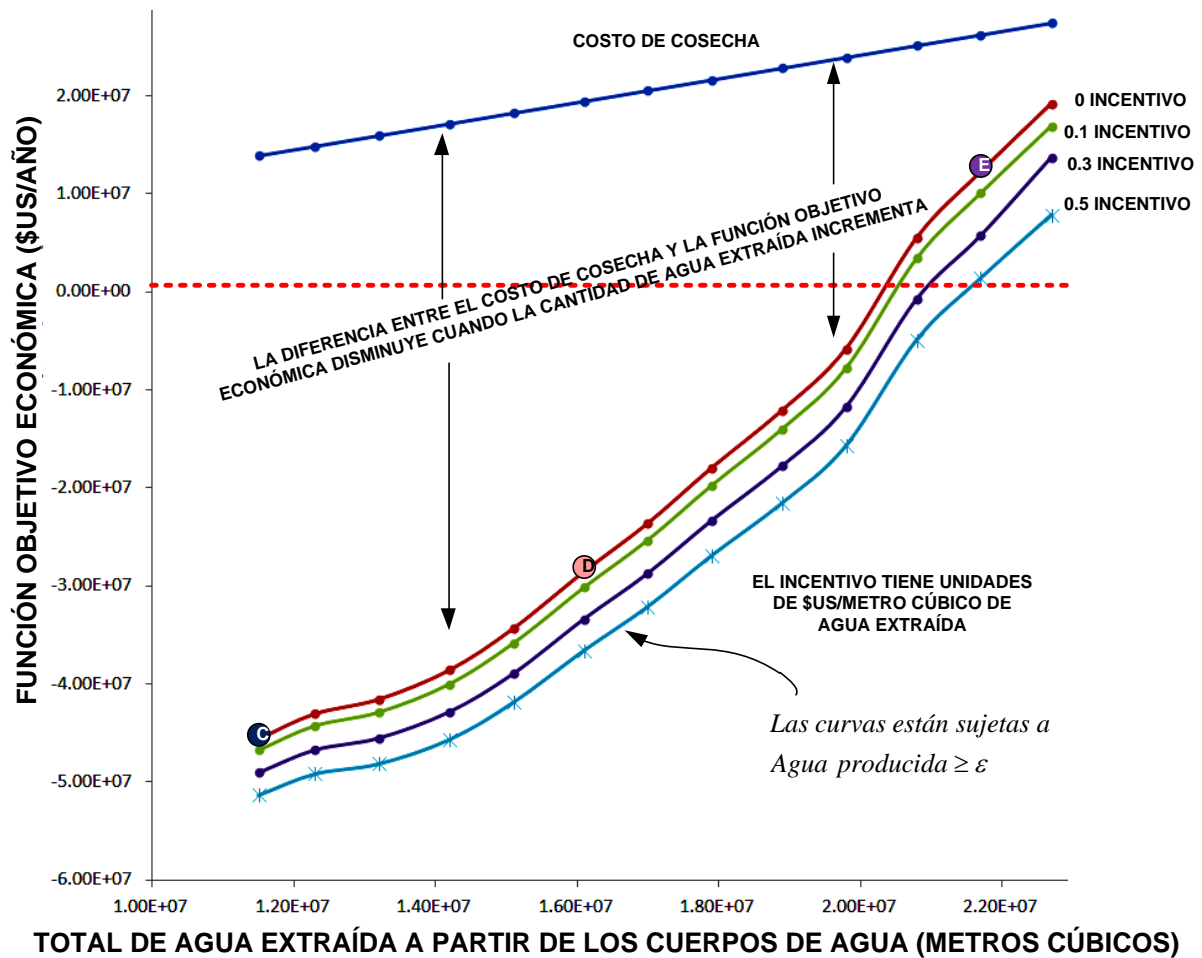
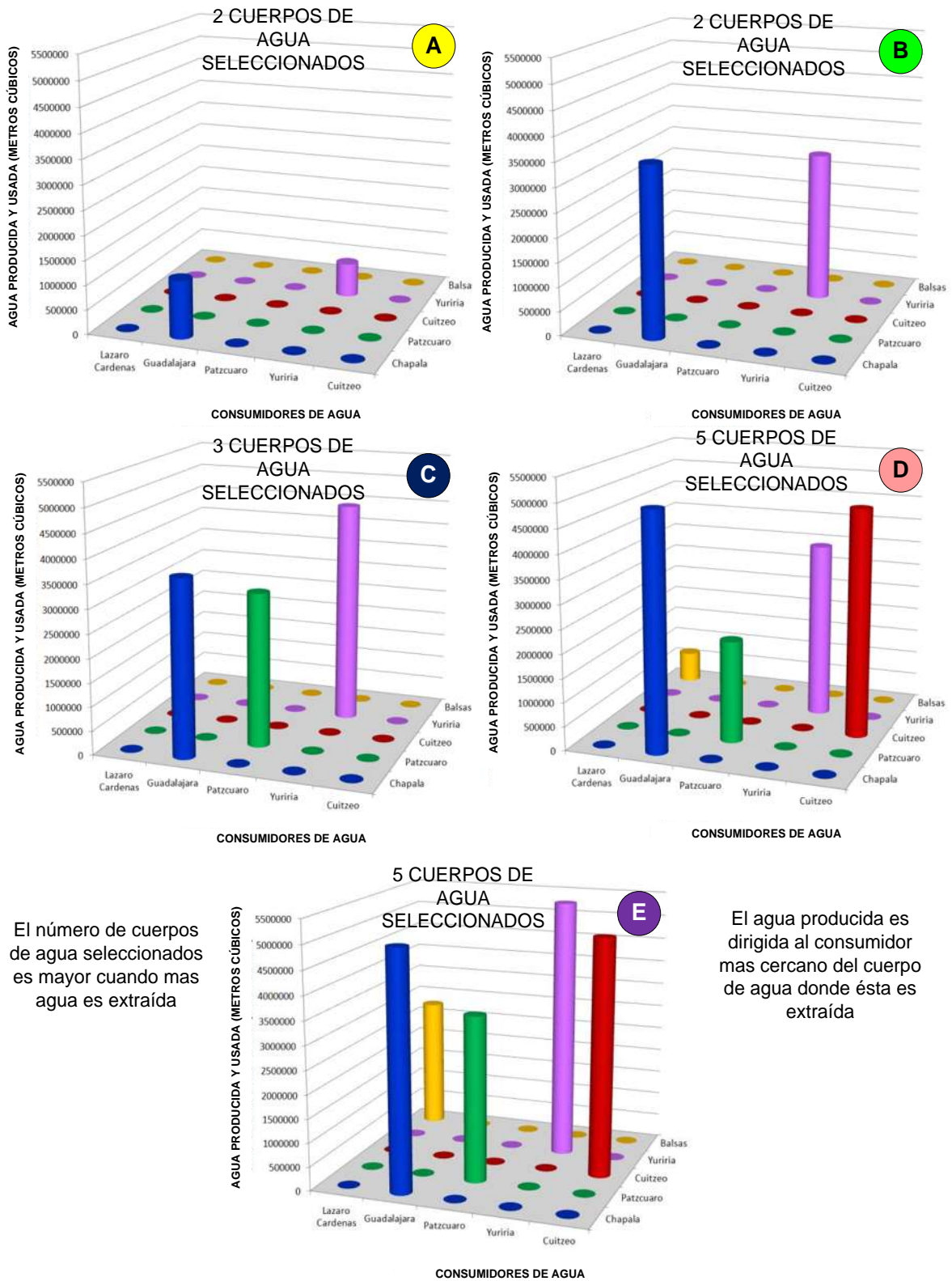


Figura 4.20 Curvas Pareto para una baja cantidad de agua extraída proveniente del lirio acuático

En este caso de estudio se ha presentado una nueva formulación para la limpieza de cuerpos de agua produciendo a partir del lirio acuático productos con valor agregado a través de un sistema de biorefinerías distribuidas que produce varios bioproductos y agua limpia. El modelo de optimización es formulado como un problema de optimización multi-objetivo, el cual, considera simultáneamente la minimización del negativo de la ganancia y la maximización de la cantidad de lirio acuático eliminado de los cuerpos de agua, o bien, la maximización de la producción de agua limpia mientras se satisfacen restricciones técnicas y ambientales. Los resultados son mostrados a través de curvas Pareto para representar el compromiso entre los objetivos y ayuda a la determinación de la solución que satisface de mejor manera los requerimientos específicos del sistema.



**Figura 4.21 Distribución de los cuerpos de agua y consumidores de agua seleccionados para los diferentes puntos en las curvas Pareto de las Figuras 4.19 y 4.20**

La metodología presentada considera la sustentabilidad del sistema en tres dimensiones, las cuales son la económica, la social y ambiental. El criterio económico consiste en la minimización del negativo de la ganancia para la eliminación del lirio acuático. La dimensión social consiste en proveer beneficios a la población mediante la generación de condiciones adecuadas para la realización de actividades humanas en los cuerpos de agua y la creación de trabajo en los sitios de cosecha del lirio acuático. Por último, la dimensión ambiental consiste en la limpieza de los cuerpos de agua que se encuentran infestados de lirio acuático.

La aplicación de la metodología propuesta a un caso de estudio que toma en cuenta dos de las regiones hidrológicas más importantes en México muestra que ésta puede ser útil para obtener soluciones económicamente atractivas para la limpieza de cuerpos de agua, para producir agua limpia y varios productos provenientes de la biomasa.

Finalmente, el modelo propuesto es general y puede ser aplicado a cualquier caso de interés que cuente con los datos apropiados para su implementación. Además el modelo propuesto puede ser extendido para considerar otros contaminantes en los cuerpos de agua.

## CONCLUSIONES

Dentro del presente proyecto se desarrollaron y aplicaron modelos para la planificación y calendarización de sistemas distribuidos de biorefinerías basado en múltiples alimentaciones considerando aspectos económicos, ambientales y sociales. En este sentido, se desarrolló y aplicó un modelo mixto entero lineal con la metodología de Redes de Tareas y Estados para la calendarización de la producción en una biorefinería.

Además, se consideraron varios criterios de sustentabilidad, entre ellos la medición del impacto ambiental por medio del Eco-indicador99, y el impacto social por el número de empleos asociados a la cadena productiva, también, el impacto ambiental y social fue considerado tomando en cuenta la eliminación de un agente dañino (como lo es el lirio acuático) para el ecosistema y actividades económicas.

Por otro lado, se desarrolló un modelo mixto entero no lineal por la consideración de sistemas de tratamiento de contaminantes; con el cumplimiento de los objetivos se pudo demostrar que es posible obtener procesos sustentables con la consideración de aspectos sociales, ambientales y económicos, por medio de modelos para la planificación y calendarización óptima de sistemas distribuidos de producción de biorefinerías.

Como resultados adicionales se han generado algunos artículos científicos; el primero de ellos se titula “*Optimal Planning of a Biomass Conversion System Considering Economic and Environmental Aspects*” y fue publicado en la revista *Industrial and Engineering Chemistry Research* (Volumen 50, Issue 14). Por otro lado, se cuenta con otro artículo publicado en la revista *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, el cual se titula “*Synthesis of Distributed Biorefining Networks for the Value-Added Processing of Water Hyacinth*” (DOI: 10.1021/sc300137a). Además, se cuenta con dos más en revisión en las revistas *Journal of Cleaner Production* e *Industrial and Engineering Chemistry Research*.

También, se produjeron varios capítulos de libro, como: “*Optimal Multi-Objective Planning of Distributed Biorefinery Systems Involving Economic Environmental and Social Aspects*”, “*Multi-objective optimization of absorption refrigeration systems involving renewable energy*”, “*Optimal biorefinery planning considering simultaneously economic and environmental objectives*”, los cuales fueron publicados por la editorial Elsevier en la obra *Computer Aided Process Engineering* ediciones de 2011 y 2012. Además, se encuentra uno en

proceso de revisión llamado “*Optimal Planning for the Supply Chain for the Future Biorefinery*”.

Con el desarrollo del proyecto se han presentado trabajos en Proceedings, entre los cuales se encuentran los trabajos “*Optimal Planning and Scheduling of a Biomass Conversion System Considering Economic and Environmental Aspects*”. “*Sustainable Processing of Water Hyacinth Through a Distributed Biorefinery System*” presentados en el *AIChE Meeting* en sus ediciones de 2011 y 2012, respectivamente.

Además, se han presentado trabajos en congresos como el Encuentro Nacional y Congreso Internacional AMIDIQ en sus ediciones 2011 y 2012. También, en el I Congreso Iberoamericano de Biorefinerías y el 7 Encuentro Estatal de Ciencia y Tecnología en Michoacán, así como, en el IX Encuentro Estatal de Profesores de Química de Nivel Medio Superior y Superior, con diferentes avances del proyecto de investigación realizado, que incluyen el apartado de sistemas distribuidos de biorefinerías y el sistema para el tratamiento del lirio acuático considerando aspectos ambientales, sociales y económicos.

En conclusión, el presente proyecto ha derivado en el desarrollo de proyectos y generación de material científico para futuras investigaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Akgul, O., Zamboni, A., Bezzo, F., Shah, N., Papageorgiou, L.G. 2011.** Optimization-based approaches for bioethanol supply chains. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 50(9), 4927-4938.
2. **Aviso, K.B., Tan, R.R., Culaba, A.B., Cruz, J.B. 2011.** Fuzzy input-output model for optimizing eco-industrial supply chains under water footprint constraints. *Journal of Cleaner Production*. 19(2-3), 187-196.
3. **Bhattacharya, A., Kumar, P. 2010.** Water hyacinth as a potential biofuel crop. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*. 9(1), 112-122.
4. **Bowling, I.M., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M. 2011.** Facility location and supply chain optimization for a biorefinery. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 50(10), 6276-6286.
5. **Brooke, A., Kendrick, D., Meeruas, A., Raman, R., 2011.** GAMS-Language guide. GAMS Development Corp. Washington, D.C.
6. **Castro, P.M., Grossmann, I.E., 2006.** An efficient MILP model for the short-term scheduling of single stage batch plants. *Computers and Chemical Engineering*. 30 (6-7), 1003-1018.
7. **Chanakya, H.N., Borgaonkar, S., Meena, G., Jagadish, K.S. 1993.** Solid-phase biogas production with garbage or water hyacinth. *Bioresource Technology*. 46(3), 227-231.
8. **Cheng, J., Xie, B., Zhou, J., Song, W., Cen, K. 2010.** Cogeneration of H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from water hyacinth by two-step anaerobic fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35(7), 3029-3035.
9. **Chouinard-Dussault, P., Bradt, L., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M. 2011.** Incorporation of process integration into life cycle analysis for the production of biofuels. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 13(5), 673-685.
10. **Chuang, Y.S., Lay, C.H., Sen, B., Chen, C.C., K, G., Wu, J.H., Lin, C.S., Lin, C.Y. 2011.** Biohydrogen and biomethane from water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) fermentation: Effects of substrate concentration and incubation temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*. 36, 14195-14203.

11. **CONAGUA. 2012.** Overall availability per capita. Atlas digital del agua México.  
<http://www.conagua.gob.mx/atlas/atlas.html?seccion=2&mapa=0#> (Accesado March 2012)
12. **Diwekar, U.M. 2003.** Introduction to applied optimization and modeling; Kluwer Academic Press: The Netherlands.
13. **Forrest, A.K., Hernandez, J., Holtzapple, M.T. 2010.** Effect of temperature and pretreatment conditions on mixed-acid fermentation of water hyacinth using a mixed culture of thermophilic microorganisms. *Bioresource Technology*. 101 (19), 7510-7515.
14. **Ganguly, A., Chatterjee, P.K., Dey, A. 2012.** Studies on ethanol production from water hyacinth-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16, 966-972.
15. **Geodkoop, M., Spriensma, R. 2001.** The eco-indicator 99, a damage oriented for life cycle impact assessment: methodology report and manual for designers. Technical report, PRe Consultants, Amersfoort. The Netherlands.
16. **Gobierno de Jalisco. 2011** Programa Especial 21 Administración y uso del agua. Primera Actualización.
17. **Goyal, H.B., Seal, D., Saxena, R.C. 2008.** Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 12(2), 504-517.
18. **Gunnardsson, C.C., Petersen, C.M. 2007.** Water hyacinth as a resource in agriculture and energy production: A literature review. *Waste Management*. 27(1), 117-129.
19. **Holtzapple, M. Granda, C., 2009.** Carboxylate platform: the mixalco process part 1: comparison of three biomass conversion platforms. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 156(1), 95-106.
20. **INE. 2012** Cuencas en México.  
<http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/>  
<http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/12A02.html>  
<http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/12D03.html>  
<http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/12D02.html>  
<http://cuencas.ine.gob.mx/cuenca/18A02.html>  
(Accesados 2012)

21. **Isarankura-Na-Ayudhya, C., Tantimongcolwat, T., Kongpanpee, T., Prabkate, P., Prachayasittikul, V. 2007.** Apropiate technology for the Bioconversion of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) to Liquid Ethanol: Future Prospects for Community Strengthening and Sustainable Development. *EXCLI Journal*. 6, 167-176.
22. **Job and Economic Development Impact Model.**  
Available at <http://www.nrel.gov/analysis/jedi/> (Accesado January, 2012).
23. **Jones, S., Zhu, Y., Valkenburg, C. 2009.** Municipal solid waste (MSW) to liquid fuels synthesis. Volume II: A techno-economic evaluation of the production of mixed alcohols. WA: Pacific Northwest National Laboratory. PNNL-18482.
24. **Lee, S., Grossmann, I.E. 2005.** Logic-based modeling and solution of nonlinear discrete/continuous optimization problems. *Annals of Operations Research*. 139(1), 267-288.
25. **Lee, S., Grossmann, I.E. 2000.** New algorithms for nonlinear generalized disjunctive programming. *Computers and Chemical Engineering*. 24(9-10), 2125-2141.
26. **López E., Bocco G. 2000.** Cambio de uso de cobertura vegetal y uso del suelo en la cuenca de lago de Cuitzeo. Tesis Doctoral en Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias, UNAM.
27. **Lozano, R. 2008.** Envisioning sustainability three-dimensionally. *Journal of Cleaner Production*. 16, 1838-1846.
28. **Lozano, R. 2012.** Towards better embedding sustainability into companies' systems: an analysis of voluntary corporate initiatives. *Journal of Cleaner Production*. 25, 14-26
29. **Lu, W., Wang, C., Yang, Z. 2009.** The preparation of High caloric fuel (HCF) from water hyacinth by deoxy-liquefaction. *Bioresource Technology*. 100(24), 6451-6456.
30. **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.
31. **Malik, A. 2007.** Environmental challenge *vis a vis* opportunity: The case of water hyacinth. *Environmental International*. 33 (1), 122-138.
32. **Maravelias, C.T., Grossmann, I.E. 2003.** New general continuous-time state-task network formulation for short-term scheduling of multipurpose batch plants. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 42(19), 3056-3074.

- 
33. **Minnesota IMPLAN Group.**  
Available at <http://www.implan.com/>.(Accesado 2012).
  34. **Mishima, D., Kuniki, M., Sei, K., Soda, S., Ike, M., Fujita, M. 2008.** Ethanol production from candidate energy crops: Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and water lettuce (*Pistia stratiotes* L. *Bioresource Technology*. 99(7), 2495-2500.
  35. **Ng, D.K.S. 2010.** Automated targeting for the synthesis of an integrated biorefinery. *Chemical Engineering Journal*. 162(1), 67-74.
  36. **Nigam, J.N. 2002.** Bioconversion of water-hyacinth (*Eichhornia crassipes*) hemicellulose acid hydrolysate to motor fuel ethanol by xylose-fermenting yeast. *Journal of Biotechnology*. 97, 107-116.
  37. **NOM-001-ECOL-1996.** Upper and lower limits for pollutants for discharge of residual water in water bodies.
  38. **O'Sullivan, C., Rounsefell, B., Grinham, A., Clarke, W., Udy, J. 2010.** Anaerobic digestion of harvested aquatic weeds: water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), cabomba (*Cabomba Caroliniana*) and salvinia (*Salvinia molesta*). *Ecological Engineering*. 36, 1459-1468.
  39. **PEMEX. 2010.** Memoria de trabajo 2010.  
[http://www.pemex.com/files/content/Version\\_completa\\_memoria\\_de\\_labores\\_2010.pdf](http://www.pemex.com/files/content/Version_completa_memoria_de_labores_2010.pdf)  
(Accesado 2012).
  40. **Pham, V., Holtzaple, M., El-Halwagi, M.M. 2010.** Techno-economic analysis of biomass to fuels conversion via the mixalco process. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 37(11), 1157-1168.
  41. **Rodríguez-Trejo E., Ducoing-Chahó, E. 2003.** Evaluation between the factors and activities in the watershed of Patzcuaro, Michoacán. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.
  42. **Rengaraj, S., Yeon, K.H., Moon, S.H. 2001.** Removal of chromium from water and wastewater by ion exchange resins. *Journal of Hazardous Materials*. B87, 273-287.
  43. **SAGARPA-SIAP. 2011.** Avance de siembras y cosechas.  
[http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=347](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=347)  
(Accesado 2012).

- 
44. **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.
  45. **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.
  46. **Sammons, Jr.N.E., Yuan, W., Eden, M.R., Aksoy, B., Cullinan, H.T. 2008.** Optimal biorefinery product allocation by combining process and economic modeling. *Chemical Engineering Research and Design*. 86(7), 800-808.
  47. **SEMARNAT. 2012.** Anuario Forestal 2011.  
<http://www.semarnat.gob.mx/tramites/gestionambiental/forestalsuelos/Anuarios/Anuario%20Forestal%202006.pdf> (Accesado 2012).  
[http://www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008e\\_bioenergia.pdf](http://www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008e_bioenergia.pdf). (Accesado 2012).
  48. **SENER. 2012.** Sistema de Información de Energía.  
<http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController?action=login> (Accesado 2012)
  49. **Singhal, V., Rai, J.P.N. 2003.** Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents. *Bioresource Technology*. 86, 221-225.
  50. **Thomas, S., Currie, A., Ltd, B., Greenock, Scotland, Arbor, Ann. 2006.** Heavy Metal Removal from Electroplating Wastewater Using HA 216. *Pollution Control*. 29-31.
  51. **Vaca Mier, M., Lopez Callejas, R., Gehr, R., Jimenez Cisneros, B.E., Alvarez, P.J.J. 2001.** Heavy metal removal with mexican clinoptilolite: Multi-component ionic exchange. *Water Research*. 35(2), 373-378.
  52. **You, F., Tao, L., Graziano, D.J., Snyder, S.W. 2011.** Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization couple with life cycle assessment and input-output analysis. *AIChE Journal*. 58(4), 1157-1180.
  53. **You, F., Wang, B. 2011.** Life Cycle optimization of biomass to liquid supply chains with distributed centralized processing networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(17), 10102-10127.

54. **Zamboni, A., Shah, N., Bezzo, F. 2009a.** Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 1. Cost minimization. *Energy and Fuels*. 23(10) 5121–5133.
55. **Zamboni, A., Bezzo, F., Shah, N. 2009b.** Spatially explicit static model for the strategic design of future bioethanol production systems. 2. Multi-objective environmental optimization. *Energy and Fuels*. 23(10), 5134-5143.
56. **Zamboni, A., Murphy, R.J., Woods, J., Bezzo, F., Shah, N. 2011.** Biofuels carbon footprints: whole-systems optimization for GHG emissions reductions. *Bioresources Technology*. 102(16), 7457-7465.
57. **Zhu, Y., Jones, S. 2009.** Techno-economic analysis for the thermochemical conversion of lignocellulosic biomass to ethanol via acetic acid synthesis. WA: Pacific Northwest National Laboratory. PNNL-18483.

APÉNDICES

A.1 Código en lenguaje GAMS del modelo para la planeación óptima de sistemas distribuidos de biorefinerías considerando aspectos ambientales, económicos y sociales

```

$TITLE PLANING BIOREFINERY
$ONEMPTY;
SETS
    M      BIORESOURCES      /1*21/
*1.- WOOD CHIPS
*2.- WHEAT STRAW
*3.- PALM OIL SHELL
*4.- RICE STRAW
*5.- SAWDUST
*6.- COMERCIAL WOOD
*7.- SUGAR CANE
*8.- WHEAT
*9.- GRAIN CORN
*10.- GRAIN SORGHUM
*11.- CASSAVA ROOT
*12.- SUGAR BEET
*13.- SWEET SORGHUM
*14.- SOY
*15.- AFRICAN PALM OIL
*16.- SUNFLOWER
*17.- CASTOR
*18.- COTTON
*19.- RAPESEED
*20.- JATROPHA
*21.- SAFFLOWER

    K      PRODUCTS      /1*3/
*1.- ETHANOL
*3.- HYDROGEN
*2.- BIODIESEL

    R      ROUTES      /1*10/
*1.- PRETREATMENT ACID HYDROLYSIS AND FERMENTATION
*2.- PRETREATMENT GASIFICATION AND BIOSYNTESIS
*3.- PRETREATMENT GASIFICATION AND CHEMICAL SYNTESIS
*4.- HYDROLYSIS AN FERMENTATION WITH BLACK FERMENTATION FOR
HYDROGEN
*5.- CATALITIC PIROLYSIS WITH LA/AL2O3
*6.- CATALITIC PIROLYSIS WITH GAMMA/AL2O3
*7.- CATALITIC PIROLYSIS WITH CR2O3
*8.- CATALITIC PIROLYSIS WITH NICKEL
*9.- CATALITIC PIROLYSIS WITH CU-MCM-41
*10.- PRETREATMENT EXTRACTION AND TRANSESTERIFICATION WITH
ETHANOL

    H      HOMES      /1*6/
*1.-ZONA NOROESTE SINALOA PRINCIPALMENTE (SONORA, DURANGO,
NAYARIT, BAJA CALIFORNIA, BC SUR)
*2.-ZONA SUR CHIAPAS PRINCIPALMENTE (TABASCO, CAMPECHE,
YUCATAN, QUINTANA ROO, OAXACA)
*3.-ZONA CENTRO OCCIDENTE (MICH, JAL, GTO, GRO, COLIMA)

*4.-ZONA NORESTE COAHUILA PRINCIPALMENTE (NUEVO LEON,
CHIHUAHUA, ZACATECAS, AGUAS CALIENTES)
*5.-ZONA ESTE VERACRUZ PRINCIPALMENTE (PUEBLA, TAMAULIPAS,
HIDALGO, SAN LUIS)
*6.-ZONA CENTRO DF PRINCIPALMENTE (EDO DE MEX, QRO,
TLAXCALA, MORELOS)

    PH     PROCESSING HUBS      /1*5/
*1.-Salamanca
*2.-Cadereyta
*3.-Cd. Madero
*4.-Minatitlan
*5.-Salina Cruz

*MAIN PROCESSING PLANT IS TULA

    MK     MARKETS      /1*5/
*1.-VALLE DE MEXICO Y MAS (EDO MEX, QRO, PUEBLA,
HGO,TLAXCALA, DF, MORELOS, VER)
*2.-NORESTE (NUEVO LEON, TAMAULIPAS, SAN LUIS, COAHUILA,
ZACATECAS, CHIHUAHUA)
*3.-CENTRO OESTE (JALISCO, NAYARIT, COLIMA, AGUAS CALIENTES,
MICHOACAN, DURANGO, GUERRERO)
*4.-NOROESTE (BAJA CALIFORNIA, BC SUR, SONORA, SINALOA)
*5.-SUR (CHIAPAS, OAXACA, TABASCO, CAMPECHE, YUCATAN,
QUINTANA ROO)

    T      TIME PERIODS      /1*12;/
ALIAS (T,T1,T2,T3,T4,T5,T6);

PARAMETERS
*FLOWS
    MAXMPROD(M,H,T)    MAXIMUM RAW MATERIAL PRODUCED IN
HOME H AT END OF TIME PERIOD T
/
*WOOD CHIPS
1.1.1*12 5083.858413
1.2.1*12 1700.698296
1.3.1*12 3310.802494
1.4.1*12 4213.213834
1.5.1*12 779.4622076
1.6.1*12 779.4622076

*COMERCIAL WOOD
6.1.1*12 1840.568359
6.2.1*12 615.7235739
6.3.1*12 1198.648313
6.4.1*12 1525.358781
6.5.1*12 282.1977639

```

6.6.1\*12 282.1977639

\*SUGAR CANE

7.1.1 533008  
7.2.1 3025668  
7.3.1 2748833  
7.5.1 6219260  
7.6.1 594493

7.1.2 395977  
7.2.2 1094683  
7.3.2 1116699  
7.5.2 4458579  
7.6.2 258901

7.1.3 775646  
7.2.3 2184954  
7.3.3 1470949  
7.5.3 5769145  
7.6.3 348528

7.1.4 529242  
7.2.4 1669491  
7.3.4 1820716  
7.5.4 5178078  
7.6.4 296504

7.1.5 744649  
7.2.5 1334888  
7.3.5 752872  
7.5.5 3426659  
7.6.5 370420

7.1.6 558202  
7.2.6 282295  
7.3.6 366686  
7.5.6 682132

7.1.7 389363  
7.2.7 113518  
7.3.7 110452  
7.5.7 1384818

\*GRAIN CORN

9.1.1 194  
9.2.1 11805  
9.3.1 1319  
9.5.1 9633

9.1.2 222  
9.2.2 58713  
9.3.2 255  
9.5.2 15896

9.1.3 29763  
9.2.3 62752  
9.3.3 5180  
9.5.3 30375

9.1.4 84305  
9.2.4 65346  
9.3.4 78290  
9.5.4 108580  
9.6.4 1490

9.1.5 1785225  
9.2.5 57243  
9.3.5 37821  
9.4.5 270  
9.5.5 237199  
9.6.5 1289

9.1.6 3224777  
9.2.6 10311  
9.3.6 1319  
9.4.6 1705  
9.5.6 85922  
9.6.6 914

9.1.7 89881  
9.2.7 16306  
9.3.7 8037  
9.5.7 242639  
9.6.7 1307

9.1.8 3778  
9.2.8 12392  
9.3.8 1079  
9.4.8 1419  
9.5.8 190775  
9.6.8 478

9.1.9 7337  
9.2.9 4203  
9.3.9 225  
9.5.9 45317  
9.6.9 170

9.1.10 281066  
9.2.10 223921  
9.3.10 603659  
9.4.10 241622  
9.5.10 304867  
9.6.10 55190

9.1.11 111428  
9.2.11 497902  
9.3.11 1787921  
9.4.11 1047587  
9.5.11 1056438  
9.6.11 612789

9.1.12 224323  
9.2.12 460400  
9.3.12 2580913  
9.4.12 110359  
9.5.12 615297  
9.6.12 995510

\*GRAIN SORGHUM

10.1.1 0  
10.2.1 0  
10.3.1 896  
10.4.1 0  
10.5.1 480  
10.6.1 0  
10.1.2 1000

|         |         |                |        |
|---------|---------|----------------|--------|
| 10.2.2  | 747     | 10.3.11        | 959629 |
| 10.3.2  | 16      | 10.4.11        | 52547  |
| 10.4.2  | 0       | 10.5.11        | 87819  |
| 10.5.2  | 0       | 10.6.11        | 191951 |
| 10.6.2  | 0       |                |        |
|         |         | 10.1.12        | 103934 |
| 10.1.3  | 9466    | 10.2.12        | 17127  |
| 10.2.3  | 7864    | 10.3.12        | 519013 |
| 10.3.3  | 1993    | 10.4.12        | 27017  |
| 10.4.3  | 0       | 10.5.12        | 329187 |
| 10.5.3  | 19865   | 10.6.12        | 41774  |
| 10.6.3  | 0       |                |        |
|         |         | *SWEET SORGHUM |        |
| 10.1.4  | 215244  | 13.1.1         | 7625   |
| 10.2.4  | 27216   | 13.3.1         | 17786  |
| 10.3.4  | 15101   |                |        |
| 10.4.4  | 0       | 13.1.2         | 58755  |
| 10.5.4  | 85780   | 13.3.2         | 6151   |
| 10.6.4  | 0       | 13.5.2         | 595    |
|         |         |                |        |
| 10.1.5  | 8045    | 13.1.3         | 12414  |
| 10.2.5  | 13364   | 13.2.3         | 4787   |
| 10.3.5  | 7849    | 13.3.3         | 38791  |
| 10.4.5  | 0       | 13.5.3         | 2755   |
| 10.5.5  | 45188   |                |        |
| 10.6.5  | 0       | 13.1.4         | 84221  |
|         |         | 13.2.4         | 1852   |
| 10.1.6  | 23186   | 13.3.4         | 113274 |
| 10.2.6  | 10315   | 13.5.4         | 4600   |
| 10.3.6  | 3680    | 13.6.4         | 225    |
| 10.4.6  | 19066   |                |        |
| 10.5.6  | 1893824 | 13.1.5         | 25722  |
| 10.6.6  | 0       | 13.2.5         | 1060   |
|         |         | 13.3.5         | 9782   |
| 10.1.7  | 394771  | 13.4.5         | 180    |
| 10.2.7  | 3773    | 13.5.5         | 7115   |
| 10.3.7  | 428     | 13.6.5         | 1105   |
| 10.4.7  | 4400    |                |        |
| 10.5.7  | 501646  | 13.1.6         | 45410  |
| 10.6.7  | 0       | 13.2.6         | 1095   |
|         |         | 13.3.6         | 10491  |
| 10.1.8  | 59919   | 13.4.6         | 50413  |
| 10.2.8  | 597     | 13.6.6         | 233    |
| 10.3.8  | 492     |                |        |
| 10.4.8  | 10059   | 13.1.7         | 48943  |
| 10.5.8  | 1821    | 13.3.7         | 3519   |
| 10.6.8  | 0       | 13.4.7         | 39083  |
|         |         | 13.5.7         | 2725   |
| 10.1.9  | 44783   | 13.6.7         | 447    |
| 10.2.9  | 130     |                |        |
| 10.3.9  | 2959    | 13.1.8         | 199258 |
| 10.4.9  | 1243    | 13.2.8         | 220    |
| 10.5.9  | 9927    | 13.3.8         | 3409   |
| 10.6.9  | 0       | 13.4.8         | 475238 |
|         |         | 13.5.8         | 4000   |
| 10.1.10 | 7791    | 13.6.8         | 4743   |
| 10.2.10 | 1117    |                |        |
| 10.3.10 | 456005  | 13.1.9         | 424088 |
| 10.4.10 | 22183   | 13.2.9         | 317    |
| 10.5.10 | 881     | 13.3.9         | 5476   |
| 10.6.10 | 13641   | 13.4.9         | 304165 |
|         |         | 13.5.9         | 7289   |
| 10.1.11 | 80092   | 13.6.9         | 1148   |
| 10.2.11 | 7023    |                |        |





|   |       |  |                                    |
|---|-------|--|------------------------------------|
| *SWEET SORGHUM                                      | 3.1*5 | 12854.75   |                                    |
| 13.1 1272264  | /     |  |                                    |
| 13.2 14361  |       | USKP (K)   | MAXIMUM STORAGE OF PRODUCT AT MAIN |
| 13.3 923955   |       | PLANT  |                                    |
| 13.4 1425714  | /     |  |                                    |
| 13.5 49230  |       | *ETHANOL   |                                    |
| 13.6 17799  | 1     | 56862.5  |                                    |
| <br>  |       |  |                                    |
| *AFRICAN PALM                                       |       | *BIODIESEL   |                                    |
| 15.2 73551  | 3     | 16068.4375   |                                    |
| 15.5 18387  | /     |  |                                    |
|   |       | USKMK (K,MK)   | MAXIMUM STORAGE OF PRODUCT IN      |
| *JATROPHA   |       | MARKET   |                                    |
| 20.2 132450   | /     |  |                                    |
| 20.3 132450   |       | *ETHANOL   |                                    |
| 20.4 132450   |       | 1.1  | 181960                             |
|   |       | 1.2  | 81091                              |
|   |       | 1.3  | 114146                             |
|   |       | 1.4  | 95858                              |
|   |       | 1.5  | 70515                              |
|   |       |  |                                    |
| *SAFFLOWER  |       | *BIODIESEL   |                                    |
| 21.1 123981   | 3.1   | 51419  |                                    |
| 21.2 0  | 3.2   | 26963  |                                    |
| 21.3 18903  | 3.3   | 40938  |                                    |
| 21.4 270  | 3.4   | 34578  |                                    |
| 21.5 29478  | 3.5   | 25261  |                                    |
| /   | /     |  |                                    |
| USMPH (M,PH)  |       |  | MAXIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL IN |
| HUB   |       |  |                                    |
| /   |       |  |                                    |
| *WOOD CHIPS   |       |  |                                    |
| 1.1*5 3812.89381                                    |       |  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *COMERCIAL WOOD                                     |       | *MINIMUM STORAGE                                     |                                    |
| 6.1*5 1380.426269                                   |       | *SE DEFINEN AL FINAL DE LOS PARAMETROS               |                                    |
|   |       | LSMH (M, H)  | MINIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M  |
|   |       | IN HOME H  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *SUGAR CANE   |       |  |                                    |
| 7.1*5 4664445                                       |       |  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *GRAIN CORN   |       | LSMPH (M, PH)  | MINIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M  |
| 9.1*5 2418582.75                                    |       | IN HUB   |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *SWEET SORGHUM                                      |       |  |                                    |
| 13.1*5 356428.5                                     |       | LSMP (M)   | MINIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M  |
|   |       | AT MAIN  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *GRAIN SORGHUM                                      |       |  |                                    |
| 10.1*5 1420368                                      |       | LSKPH (K, PH)  | MINIMUM STORAGE OF PRODUCT K IN    |
|   |       | HUB  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *SAFFLOWER  |       |  |                                    |
| 21.1*5 30995.25                                     |       | LSKP (K)   | MINIMUM STORAGE OF PRODUCT AT MAIN |
|   |       |  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *AFRICAN PALM                                       |       | LSKMK (K,MK)   | MINIMUM STORAGE OF PRODUCT IN      |
| 15.1*5 18387.75                                     |       | MARKET;  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *JATROPHA   |       | *MINIMUM STORAGES ARE 10 PERCENT OF MAXIMUM STORAGES |                                    |
| 20.1*5 33112.5                                      |       | LSMH (M, H) = 0.05*USMH (M, H) ;                     |                                    |
| /   |       | LSMPH (M, PH) = 0.05*USMPH (M, PH) ;                 |                                    |
| USMP (M)  |       | LSMPH (M, PH) = 0.05*USMPH (M, PH) ;                 |                                    |
| USMP (M) = 1.25*SUM (( PH ) , USMPH (M, PH) ) / 5 ; |       | LSMP (M) = 0.05*USMP (M) ;                           |                                    |
| PARAMETERS  |       | LSKPH (K, PH) = 0.05*USKPH (K, PH) ;                 |                                    |
| USKPH (K, PH)                                       |       | LSKP (K) = 0.05*USKP (K) ;                           |                                    |
| /   |       | LSKMK (K, MK) = 0.05*USKMK (K, MK) ;                 |                                    |
| *ETANOL   |       |  |                                    |
| 1.1*5 45490   |       |  |                                    |
|   |       |  |                                    |
| *BIODIESEL  |       |  |                                    |

|   |         |                             |             |  |
|---|---------|-----------------------------|-------------|--|
| PARAMETERS                                  |         |                             | /           |  |
| *MAXIMUM TRANSPORT                          |         |                             |             | LTKPMK (K,MK) FROM PRINCIPAL PLANT TO                        |
| UTMHPH (M,H,PH)                             |         | MAXIMUM TRANSPORT OF RAW    |             | MARKET MK  |
| MATERIAL M FROM HOME H TO PROCESSING HUB PH |         |                             | /           |  |
| /   |         |                             | 1.1*5       | 140  |
| 1*21.1*6.1*5                                | 1400000 |                             | 3.1*5       | 140  |
| /   |         |                             | /           |  |
| UTMHP (M,H)                                 |         | FROM HOME H TO PRINCIPAL    |             |  |
| PLANT                                       |         |                             |             | *CONVERSION FACTORS  |
| /   |         |                             |             | ALFA (K,M,R) CONVERSION FACTORS TO PRODUCT K                 |
| 1*21.1*6                                    | 1400000 |                             |             | FROM M BY R  |
| /   |         |                             |             | *THE FACTORS ARE IN MASS RATIO                               |
| UTKPHP1 (M,PH)                              |         | RAW MATERIAL FROM           |             |  |
| PROCESSING HUB PH TO PRINCIPAL PLANT        |         |                             | 1.1.1       | 0.1669   |
| /   |         |                             | 1.1.2       | 0.2625   |
| 1*21.1*5                                    | 1400000 |                             | 1.1.3       | 0.1887   |
| /   |         |                             | 1.2.1       | 0.2723   |
| UTKPHP2 (K,PH)                              |         | PRODUCT FROM PROCESSING HUB | 1.2.4       | 0.1314   |
| PH TO PRINCIPAL PLANT                       |         |                             | 2.3.5       | 2.6000   |
| /   |         |                             | 2.3.6       | 2.6200   |
| 1.1*5                                       | 1400000 |                             | 2.4.7       | 22.8700  |
| 3.1*5                                       | 1400000 |                             | 2.5.7       | 25.7000  |
| /   |         |                             | 2.5.8       | 5.3000   |
| UTKPHMK (K,PH,MK)                           |         | FROM PROCESSING HUB PH TO   | 2.6.9       | 0.8700   |
| MARKET MK                                   |         |                             | 1.7.1       | 0.0592   |
| /   |         |                             | 1.8.1       | 0.2857   |
| 1.1*5.1*5                                   | 1400000 |                             | 1.9.1       | 0.3149   |
| 3.1*5.1*5                                   | 1400000 |                             | 1.10.1      | 0.2999   |
| /   |         |                             | 1.11.1      | 0.2999   |
| UTKPMK (K,MK)                               |         | FROM MAIN PLANT TO MARKET   | 1.12.1      | 0.0868   |
| MK  |         |                             | 1.13.1      | 0.0553   |
| /   |         |                             | 3.14.10     | 0.1763   |
| 1.1*5                                       | 1400000 |                             | 3.15.10     | 0.2064   |
| 3.1*5                                       | 1400000 |                             | 3.16.10     | 0.2950   |
| /   |         |                             | 3.17.10     | 0.3543   |
|   |         |                             | 3.18.10     | 0.1668   |
|   |         |                             | 3.19.10     | 0.3595   |
| *MINIMUM TRANSPORT                          |         |                             | 3.20.10     | 0.3268   |
| LTMHPH (M,H,PH)                             |         | MINIMUM TRANSPORT OF RAW    | 3.21.10     | 0.2850   |
| MATERIAL M FROM HOME H TO PROCESSING HUB PH |         |                             | /           |  |
| /   |         |                             |             | *MAXIMUM PROCESSING  |
| 1*21.1*6.1*5                                | 140     |                             |             | UPMKRPH (M,K,R,PH) MAXIMUM PROCESSING OF RAW                 |
| /   |         |                             |             | MATERIAL M TO PRODUCT K THROUGH ROUTE R IN PROCESSING HUB PH |
| LTMHP (M,H)                                 |         | FROM HOME H TO PRINCIPAL    |             | /  |
| PLANT                                       |         |                             |             | 1.1.1*3.1*5  |
| /   |         |                             |             | 7625.78762   |
| 1*21.1*6                                    | 140     |                             | 7.1.1.1*5   | 9328890  |
| /   |         |                             |             |  |
| LTKPHP1 (M,PH)                              |         | RAW MATERIAL FROM           |             |  |
| PROCESSING HUB PH TO PRINCIPAL PLANT        |         |                             | 9.1.1.1*5   | 4837165.5  |
| /   |         |                             |             |  |
| 1*21.1*5                                    | 140     |                             | 10.1.1.1*5  | 2840736  |
| /   |         |                             |             |  |
| LTKPHP2 (K,PH)                              |         | PRODUCT FROM PROCESSING HUB | 13.1.1.1*5  | 712857   |
| PH TO PRINCIPAL PLANT                       |         |                             |             |  |
| /   |         |                             |             |  |
| 1.1*5                                       | 140     |                             |             |  |
| 3.1*5                                       | 140     |                             | 15.3.10.1*5 | 36775.5  |
| /   |         |                             |             |  |
| LTKPHMK (K,PH,MK)                           |         | FROM PROCESSING HUB PH TO   |             |  |
| MARKET MK                                   |         |                             | 20.3.10.1*5 | 66225  |
| /   |         |                             |             |  |
| 1.1*5.1*5                                   | 140     |                             | 21.3.10.1*5 | 61990.5  |
| 3.1*5.1*5                                   | 140     |                             | /           |  |

|   |                                   |   |   |
|---|-----------------------------------|---|---|
| UPMKRP (M, K, R)  | IN PRINCIPAL PLANT;               | / |   |
| UPMKRP (M, K, R) = 1.25 * SUM ( ( PH ) , UPMKRPH (M, K, R, PH) ) / 5; |                                   | / |   |
|   |                                   |   | CSKPH (K, PH)                               |
|   |                                   | / |   |
| PARAMETERS  |                                   | / |   |
| *MINIMUM PROCESSING   |                                   |   | CSKP (K)                                    |
| LPMKRPH (M, K, R, PH)   | MINIMUM PROCESSING OF RAW         | / |   |
| MATERIAL M TO PRODUCT K TROUGH ROUTE R IN PROCESSING HUB PH           |                                   | / |   |
|   |                                   |   | CSKMK (K, MK)                               |
|   |                                   | / |   |
| LPMKRP (M, K, R)  | IN PRINCIPAL PLANT;               | / |   |
|   |                                   |   |   |
| LPMKRPH (M, K, R, PH) = 0.01 * UPMKRPH (M, K, R, PH) ;                |                                   |   | *STORAGE COST VARIABLES                     |
| LPMKRP (M, K, R) = 0.01 * UPMKRP (M, K, R) ;                          |                                   |   | CVSMH (M, H, T)                             |
|   |                                   |   | COST VARIABLE OF STORAGE OF RAW             |
|   |                                   |   | MATERIAL M IN HOME H                        |
|   |                                   | / |   |
|   |                                   |   | 1 * 21.1 * 6.1 * 12 5                       |
|   |                                   | / |   |
| PARAMETERS  |                                   |   |   |
| *COSTS MATERIAL   |                                   |   | CVSMPH (M, PH, T)                           |
| CMPROD (M, H, T)  | COST OF RAW MATERIAL PRODUCED IN  | / |   |
| HOME H AT END OF TIME PERIOD T  |                                   |   | 1 * 21.1 * 5.1 * 12 20                      |
| /   |                                   | / |   |
| 1.1 * 6.1 * 12 86.60  |                                   |   | CVSMP (M, T)                                |
| 2.1 * 6.1 * 12 38.85  |                                   | / |   |
| 3.1 * 6.1 * 12 367.8899   |                                   |   | 1 * 21.1 * 12 15                            |
| *THE PREVIOUS COST IS BASED AT THE END OF 2005                        |                                   | / |   |
| 4.1 * 6.1 * 12 100  |                                   |   | CVSKPH (K, PH, T)                           |
| 5.1 * 6.1 * 12 0  |                                   | / |   |
| 6.1 * 6.1 * 12 60.62  |                                   |   | 1 * 3.1 * 5.1 * 12 15                       |
| 7.1 * 6.1 * 12 28.98  |                                   | / |   |
| 8.1 * 6.1 * 12 286.10   |                                   |   | CVSKP (K, T)                                |
| 9.1 * 6.1 * 12 207.40   |                                   | / |   |
| 10.1 * 6.1 * 12 167.77  |                                   |   | 1 * 3.1 * 12 10                             |
| 11.1 * 6.1 * 12 230.71  |                                   | / |   |
| 12.1 * 6.1 * 12 150.29  |                                   |   | CVSKMK (K, MK, T)                           |
| 13.1 * 6.1 * 12 31.11   |                                   | / |   |
| 14.1 * 6.1 * 12 330.58  |                                   |   | 1 * 3.1 * 5.1 * 12 5                        |
| 15.1 * 6.1 * 12 66.31   |                                   | / |   |
| 16.1 * 6.1 * 12 12.66   |                                   |   |   |
| 17.1 * 6.1 * 12 533.84  |                                   |   | *TRANSPORT COST                             |
| 18.1 * 6.1 * 12 361.89  |                                   |   | CTMHPH (M, H, PH, T)                        |
| 19.1 * 6.1 * 12 227.08  |                                   |   | COST TRANSPORT OF RAW                       |
| 20.1 * 6.1 * 12 110.40  |                                   |   | MATERIAL M FROM HOME H TO PROCESSING HUB PH |
| *THE PREVIOUS COST IS BASED AT THE END OF 2005                        |                                   |   | /   |
| 21.1 * 6.1 * 12 269.07  |                                   |   | 1 * 21.1.1.1 * 12 157.6844771               |
| /   |                                   |   | 1 * 21.2.1.1 * 12 118.3125                  |
|   |                                   |   | 1 * 21.3.1.1 * 12 17.3443785                |
| CP (K, MK, T)   | COST OF PRODUCT K IN MARKET MK AT |   | 1 * 21.4.1.1 * 12 67.03684297               |
| END OF TIME PERIOD T  |                                   |   | 1 * 21.5.1.1 * 12 13.38984017               |
| /   |                                   |   | 1 * 21.6.1.1 * 12 23.80673391               |
| 1.1 * 5.1 * 12 796.82   |                                   |   |   |
| *cambie el costo del etanol   |                                   |   | 1 * 21.1.2.1 * 12 141.6334461               |
| 2.1 * 5.1 * 12 2470   |                                   |   | 1 * 21.2.2.1 * 12 158.3906223               |
| 3.1 * 5.1 * 12 841  |                                   |   | 1 * 21.3.2.1 * 12 56.27188474               |
| /   |                                   |   | 1 * 21.4.2.1 * 12 27.42572807               |
|   |                                   |   | 1 * 21.5.2.1 * 12 34.06774986               |
| *STORAGE COST FIXED   |                                   |   | 1 * 21.6.2.1 * 12 63.88485619               |
| CSMH (M, H)   | COST FIXED OF STORAGE OF RAW      |   |   |
| MATERIAL M IN HOME H  |                                   |   | 1 * 21.1.3.1 * 12 176.2182845               |
| /   |                                   |   | 1 * 21.2.3.1 * 12 113.0840206               |
| /   |                                   |   | 1 * 21.3.3.1 * 12 49.37382271               |
| CSMPH (M, PH)   |                                   |   | 1 * 21.4.3.1 * 12 62.63658178               |
| /   |                                   |   | 1 * 21.5.3.1 * 12 27.17031385               |
| /   |                                   |   | 1 * 21.6.3.1 * 12 38.53812476               |
| CSMP (M)  |                                   |   |   |



|  |             |                        |          |   |                            |
|--|-------------|------------------------|----------|---|----------------------------|
| 3.5.1*12   | 8.81986E-11 |                        | 13       | 41.84   |                            |
| /  |             |                        | 14       | 444.06  |                            |
|  |             |                        | 15       | 14.61   |                            |
| *PROCESSING COST   |             |                        | 16       | 2.04  |                            |
| CPMKRPH (M, K, R, PH, T)                                     |             | COST PROCESSING OF RAW | 17       | 631.69  |                            |
| MATERIAL M TO PRODUCT K TROUGHT ROUTE R IN PROCESSING HUB PH |             |                        | 18       | 245.08  |                            |
| /  |             |                        | 19       | 404.00  |                            |
| *COSTO DE PROCESAMIENTO TEORICO                              |             |                        | 20       | 14.61   |                            |
| 1.1.1*3.1*5.1*12   | 100         |                        | 21       | 614.38  |                            |
| 2.1.1.1*5.1*12   | 49.777      |                        | /        |   |                            |
| 7.1.1.1*5.1*12   | 39.52       |                        |          | EIP (K)   | ECO INDICATOR OF PRODUCT K |
| 8.1.1.1*5.1*12   | 65.884      |                        | /        |   |                            |
| 9.1.1.1*5.1*12   | 72.618      |                        | 1        | 32.13   |                            |
| 10.1.1.1*5.1*12  | 56.916      |                        | 2        | 0.00  |                            |
| 11.1.1.1*5.1*12  | 114.66      |                        | 3        | 10.15   |                            |
| 12.1.1.1*5.1*12  | 35.75       |                        | /        |   |                            |
| 13.1.1.1*5.1*12  | 20.93       |                        |          |   |                            |
| 14.3.10.1*5.1*12   | 61.126      |                        |          | *ECO INDICATOR TRANSPORT                        |                            |
| 15.3.10.1*5.1*12   | 71.565      |                        |          | EITMHPH (M, H, PH)                              | ECOINDICATOR TRANSPORT OF  |
| 16.3.10.1*5.1*12   | 102.271     |                        |          | RAW MATERIAL M FROM HOME H TO PROCESSING HUB PH |                            |
| 17.3.10.1*5.1*12   | 122.85      |                        | /        |   |                            |
| 18.3.10.1*5.1*12   | 57.85       |                        | 1*21.1.1 | 2.065301474                                     |                            |
| 19.3.10.1*5.1*12   | 124.631     |                        | 1*21.2.1 | 1.549619755                                     |                            |
| 20.3.10.1*5.1*12   | 113.308     |                        | 1*21.3.1 | 0.227171191                                     |                            |
| 21.3.10.1*5.1*12   | 98.813      |                        | 1*21.4.1 | 0.878027395                                     |                            |
| /  |             |                        | 1*21.5.1 | 0.175375897                                     |                            |
| CPMKRP (M, K, R, T)  |             | IN PRINCIPAL PLANT     | 1*21.6.1 | 0.311813081                                     |                            |
| /  |             |                        |          |   |                            |
| *COSTO DE PROCESAMIENTO DE PRUEBA                            |             |                        | 1*21.1.2 | 1.85507014                                      |                            |
| 1.1.1*3.1*12   | 80          |                        | 1*21.2.2 | 2.074550341                                     |                            |
| 2.1.1.1*12   | 38.29       |                        | 1*21.3.2 | 0.737031372                                     |                            |
| 7.1.1.1*12   | 30.40       |                        | 1*21.4.2 | 0.359213524                                     |                            |
| 8.1.1.1*12   | 50.68       |                        | 1*21.5.2 | 0.446208627                                     |                            |
| 9.1.1.1*12   | 55.86       |                        | 1*21.6.2 | 0.836743668                                     |                            |
| 10.1.1.1*12  | 53.20       |                        |          |   |                            |
| 11.1.1.1*12  | 88.20       |                        | 1*21.1.3 | 2.30805143                                      |                            |
| 12.1.1.1*12  | 27.50       |                        | 1*21.2.3 | 1.481138783                                     |                            |
| 13.1.1.1*12  | 16.10       |                        | 1*21.3.3 | 0.646682735                                     |                            |
| 14.3.10.1*12   | 47.02       |                        | 1*21.4.3 | 0.820394164                                     |                            |
| 15.3.10.1*12   | 55.05       |                        | 1*21.5.3 | 0.355868189                                     |                            |
| 16.3.10.1*12   | 78.67       |                        | 1*21.6.3 | 0.504760185                                     |                            |
| 17.3.10.1*12   | 94.50       |                        |          |   |                            |
| 18.3.10.1*12   | 44.50       |                        | 1*21.1.4 | 2.77793978                                      |                            |
| 19.3.10.1*12   | 95.87       |                        | 1*21.2.4 | 0.848148963                                     |                            |
| 20.3.10.1*12   | 87.16       |                        | 1*21.3.4 | 0.933905965                                     |                            |
| 21.3.10.1*12   | 76.01       |                        | 1*21.4.4 | 1.524939711                                     |                            |
| /  |             |                        | 1*21.5.4 | 0.79760817                                      |                            |
|  |             |                        | 1*21.6.4 | 0.489697979                                     |                            |
| *ECO INDICATOR MATERIAL                                      |             |                        |          |   |                            |
| EIMPROD (M)  |             | ECO INDICATOR OF RAW   | 1*21.1.5 | 2.938991413                                     |                            |
| MATERIAL   |             |                        | 1*21.2.5 | 1.098639106                                     |                            |
| /  |             |                        | 1*21.3.5 | 1.116341503                                     |                            |
| 1  | 211.12      |                        | 1*21.4.5 | 1.682695205                                     |                            |
| 2  | 146.09      |                        | 1*21.5.5 | 0.980043707                                     |                            |
| 3  | 0.00        |                        | 1*21.6.5 | 0.672133517                                     |                            |
| 4  | 0.00        |                        | /        |   |                            |
| 5  | 211.12      |                        |          |   |                            |
| 6  | 169.32      |                        |          | EITMHP (M, H)                                   | FROM HOME H TO PRINCIPAL   |
| 7  | 12.14       |                        |          | PLANT   |                            |
| 8  | 146.09      |                        | /        |   |                            |
| 9  | 199.78      |                        | 1*21.1   | 2.248704535                                     |                            |
| 10   | 250.56      |                        | 1*21.2   | 1.367389201                                     |                            |
| 11   | 62.47       |                        | 1*21.3   | 0.410566053                                     |                            |
| 12   | 48.33       |                        | 1*21.4   | 0.156984755                                     |                            |
|  |             |                        | 1*21.5   | 0.274268258                                     |                            |

|                           |                                      |                             |   |                             |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|
| 1*21.6                    | 0.143521422                          |                             | EIPMKRPH (M,K,R,PH)                                       | ECO INDICATOR PROCESSING OF |
| /                         |                                      |                             | RAW MATERIAL M TO PRODUCT K TROUGHT ROUTE R IN PROCESSING |                             |
|                           | EITMPHP (M,PH)                       | RAW MATERIAL FROM           | HUB PH  |                             |
|                           | PROCESSING HUB PH TO PRINCIPAL PLANT |                             | /   |                             |
|                           | /                                    |                             | 7.1.1.1*5   | 1.84                        |
| 1*21.1                    | 0.185510294                          |                             | 9.1.1.1*5   | 17.16                       |
| 1*21.2                    | 0.71536049                           |                             | 8.1.1.1*5   | 13.10                       |
| 1*21.3                    | 0.435565871                          |                             | 2.1.1.1*5   | 11.84                       |
| 1*21.4                    | 0.526619652                          |                             | 11.1.1.1*5  | 42.05                       |
| 1*21.5                    | 0.7139748                            |                             | 12.1.1.1*5  | 2.75                        |
| /                         |                                      |                             | 13.1.1.1*5  | 5.85                        |
|                           | EITKPHP (K,PH)                       | PRODUCT FROM PROCESSING HUB | 10.1.1.1*5  | 5.85                        |
|                           | PH TO PRINCIPAL PLANT                |                             | 1.1.1.1*5   | 39.31                       |
| /                         |                                      |                             | 1.1.2.1*5   | 9.90                        |
| 1*3.1                     | 0.185510294                          |                             | 1.1.3.1*5   | 10.39                       |
| 1*3.2                     | 0.71536049                           |                             | 2.1.4.1*5   | 0.70                        |
| 1*3.3                     | 0.435565871                          |                             | 14.3.10.1*5   | 9.02                        |
| 1*3.4                     | 0.526619652                          |                             | 15.3.10.1*5   | 10.56                       |
| 1*3.5                     | 0.7139748                            |                             | 16.3.10.1*5   | 15.09                       |
| /                         |                                      |                             | 17.3.10.1*5   | 18.13                       |
|                           | EITKPHMK (K,PH,MK)                   | FROM PROCESSING HUB PH TO   | 18.3.10.1*5   | 8.54                        |
|                           | MARKET MK                            |                             | 19.3.10.1*5   | 18.39                       |
| /                         |                                      |                             | 20.3.10.1*5   | 16.72                       |
| 1*3.1.1                   | 0.311813081                          |                             | 21.3.10.1*5   | 14.58                       |
| 1*3.2.1                   | 0.576291315                          |                             | /   |                             |
| 1*3.3.1                   | 0.227171191                          |                             | EIPMKRP (M,K,R)   | IN PRINCIPAL PLANT          |
| 1*3.4.1                   | 2.065301474                          |                             | /   |                             |
| 1*3.5.1                   | 1.549619755                          |                             | 7.1.1   | 1.84                        |
|                           |                                      |                             | 9.1.1   | 17.16                       |
| 1*3.1.2                   | 0.836743668                          |                             | 8.1.1   | 13.10                       |
| 1*3.2.2                   | 0.02131831                           |                             | 2.1.1   | 11.84                       |
| 1*3.3.2                   | 0.737031372                          |                             | 11.1.1  | 42.05                       |
| 1*3.4.2                   | 1.85507014                           |                             | 12.1.1  | 2.75                        |
| 1*3.5.2                   | 2.074550341                          |                             | 13.1.1  | 5.85                        |
|                           |                                      |                             | 10.1.1  | 5.85                        |
| 1*3.1.3                   | 0.504760185                          |                             | 1.1.1   | 39.31                       |
| 1*3.2.3                   | 0.493158105                          |                             | 1.1.2   | 9.90                        |
| 1*3.3.3                   | 0.646682735                          |                             | 1.1.3   | 10.39                       |
| 1*3.4.3                   | 2.30805143                           |                             | 2.1.4   | 0.70                        |
| 1*3.5.3                   | 1.481138783                          |                             | 14.3.10   | 9.02                        |
|                           |                                      |                             | 15.3.10   | 10.56                       |
| 1*3.1.4                   | 0.489697979                          |                             | 16.3.10   | 15.09                       |
| 1*3.2.4                   | 1.198523588                          |                             | 17.3.10   | 18.13                       |
| 1*3.3.4                   | 0.933905965                          |                             | 18.3.10   | 8.54                        |
| 1*3.4.4                   | 2.772036248                          |                             | 19.3.10   | 18.39                       |
| 1*3.5.4                   | 0.848148963                          |                             | 20.3.10   | 16.72                       |
|                           |                                      |                             | 21.3.10   | 14.58                       |
| 1*3.1.5                   | 0.672133517                          |                             | /   |                             |
| 1*3.2.5                   | 1.380959125                          |                             | *TIME INTEGER OF ACTIVITIES                               |                             |
| 1*3.3.5                   | 1.116341503                          |                             | TT1 (H,PH)  | TIME FOR TRANSPORT FROM     |
| 1*3.4.5                   | 2.1482297                            |                             | HOME H TO HUB PH  |                             |
| 1*3.5.5                   | 1.098639106                          |                             | /   |                             |
| /                         |                                      |                             | 1*6.1*5   | 1                           |
|                           | EITKPMK (K,MK)                       | FROM PRINCIPAL PLANT TO     | /   |                             |
|                           | MARKET MK                            |                             | TT2 (H)   | TIME FOR TRANSPORT FROM     |
| /                         |                                      |                             | HOME H TO MAIN HUB  |                             |
| 1*3.1                     | 0.145912119                          |                             | /   |                             |
| 1*3.2                     | 0.750035541                          |                             | 1*6   | 1                           |
| 1*3.3                     | 0.436452572                          |                             | /   |                             |
| 1*3.4                     | 2.091520946                          |                             | TT3 (PH)  | TIME FOR TRANSPORT FROM HUB |
| 1*3.5                     | 0.858401431                          |                             | PH TO MAIN HUB  |                             |
| /                         |                                      |                             | /   |                             |
|                           |                                      |                             | 1*5   | 1                           |
|                           |                                      |                             | /   |                             |
| *ECO INDICATOR PROCESSING |                                      |                             |   |                             |

|                                    |                             |    |  |                                      |
|------------------------------------|-----------------------------|----|--|--------------------------------------|
| TT4 (PH,MK)                        | TIME FOR TRANSPORT FROM HUB | /  |  |                                      |
| PH TO MARKET MK                    |                             |    | PENALTY (K)  | PENALIZACIÓN POR DEMANDA NO          |
| /                                  |                             |    | CUBIERTA DEPENDIENDO DEL PRODUCTO                  |                                      |
| 1*5.1*5 1                          |                             | /  | 1  | 0.01                                 |
| /                                  |                             |    | 3  | 0.01                                 |
| TT5 (MK)                           | TIME FOR TRANSPORT FROM     | /; |  |                                      |
| MAIN HUB TO MARKET MK              |                             |    |  |                                      |
| /                                  |                             |    |  |                                      |
| 1*5 1                              |                             |    |  | POSITIVE VARIABLES                   |
| /                                  |                             |    |  |                                      |
| TT6 (M,K,R)                        | TIME FOR PROCESSING OF RAW  |    | *ALL ACUMULATIONS AT THE BEGAN THE HORIZON OF TIME |                                      |
| MATERIAL M TO PRODUCT K BY ROUTE R |                             |    | (DECEMBER LAST YEAR)                               |                                      |
| /                                  |                             |    | MHOME0 (M,H)                                       | ALMACENAMIENTO INICIAL,              |
| 1*21.1*3.1*10 1                    |                             |    | MHUB0 (M,PH)                                       | RAW MATERIAL M IN HUB PH AT END OF   |
| /                                  |                             |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
|                                    |                             |    | MMAIN0 (M)   | RAW MATERIAL M IN MAIN HUB AT END OF |
|                                    |                             |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
| *JOBS FOR SUPPLY CHAIN             |                             |    | PHUB0 (K,PH)                                       | PRODUCT K IN HUB PH AT END OF TIME   |
| JOBS1 (M,H)                        | EMPLEOS POR RECOLECCIÓN DE  |    | PERIOD T,  |                                      |
| MATERIA PRIMA                      |                             |    | PMAIN0 (K)   | PRODUCT K IN MAIN HUB PH AT END OF   |
| /                                  |                             |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
| *WOOD CHIPS                        |                             |    | PMARKET0 (K,MK)                                    | PRODUCT K IN MARKET MK AT END OF     |
| 1.1*6 0.00029925                   |                             |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
| *COMMERCIAL WOOD                   |                             |    |  |                                      |
| 6.1*6 0.00029925                   |                             |    | *ALMACENAMIENTO REAL                               |                                      |
| *SUGAR CANE                        |                             |    | ALMACEN (M,H)                                      | ALMACENAMIENTO REAL AL INICIO,       |
| 7.1*6 0.007665185                  |                             |    |  |                                      |
| *CORN                              |                             |    |  |                                      |
| 9.1*6 0.00000063356                |                             |    | *ALL STORAGE FOR (OUT<=IN)                         |                                      |
| *SORGHUM                           |                             |    | *RAW MATERIAL                                      |                                      |
| 10.1*6 1.90E-07                    |                             |    | MPROD (M,H,T)                                      | PRODUCTION OF RAW MATERIAL IN HOME   |
| *SWEET SORGHUM                     |                             |    | H AT END OF TIME PERIOD T,                         |                                      |
| 13.1*6 1.90E-07                    |                             |    | MHOME (M,H,T)                                      | RAW MATERIAL M IN HOME H AT END OF   |
| *AFRICAN PALM                      |                             |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
| 15.1*6 0.00029925                  |                             |    | MHUB (M,PH,T)                                      | RAW MATERIAL M IN HUB PH AT END OF   |
| *JATROPHA                          |                             |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
| 20.1*6 0.00029925                  |                             |    | MMAIN (M,T)  | RAW MATERIAL M IN MAIN HUB AT END    |
| *SAFFLOWER                         |                             |    | OF TIME PERIOD T,                                  |                                      |
| 21.1*6 1.90E-07                    |                             |    | *PRODUCT   |                                      |
| /                                  |                             |    | PHUB (K,PH,T)                                      | PRODUCT K IN HUB PH AT END OF TIME   |
|                                    |                             |    | PERIOD T,  |                                      |
|                                    |                             |    | PMAIN (K,T)  | PRODUCT K IN MAIN HUB PH AT END OF   |
| JOBS2 (H,PH)                       | EMPLEOS POR TRANSPORTE DE   |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
| MATERIA PRIMA                      |                             |    | PMARKET (K,MK,T)                                   | PRODUCT K IN MARKET MK AT END OF     |
| /                                  |                             |    | TIME PERIOD T,                                     |                                      |
| 1*6.1*5 5.8708E-4                  |                             |    |  |                                      |
| /                                  |                             |    |  |                                      |
|                                    |                             |    | *ALL FLOWS   |                                      |
|                                    |                             |    | *RAW MATERIAL IN HOME                              |                                      |
| JOBS22 (H)                         | EMPLEOS POR TRANSPORTE DE   |    | MHOMEHUB (M,H,PH,T)                                | RAW MATERIAL M FROM HOME H TO HUB    |
| MATERIA PRIMA                      |                             |    | PH (OUT),  |                                      |
| /                                  |                             |    | MHOMEMAIN (M,H,T)                                  | RAW MATERIAL M FROM HOME H TO MAIN   |
| 1*6 5.8708E-4                      |                             |    | HUB (OUT),   |                                      |
| /                                  |                             |    |  |                                      |
|                                    |                             |    | *RAW MATERIAL IN HUB                               |                                      |
| JOBS23 (PH)                        | EMPLEOS POR TRANSPORTE DE   |    | MEHOMEHUB (M,H,PH,T)                               | RAW MATERIAL M FROM HOME H TO HUB    |
| MATERIA PRIMA                      |                             |    | PH (IN),   |                                      |
| /                                  |                             |    | MHUBMAIN (M,PH,T)                                  | RAW MATERIAL M FROM HUB PH TO MAIN   |
| 1*5 5.8708E-4                      |                             |    | HUB (OUT),   |                                      |
| /                                  |                             |    | MHUBPROC (M,K,R,PH,T)                              | RAW MATERIAL M FROM HUB PH TO        |
|                                    |                             |    | PROCESSING (OUT),                                  |                                      |
|                                    |                             |    |  |                                      |
| JOBS3 (K,M,R)                      | EMPLEOS POR PROCESAMIENTO   |    | *RAW MATERIAL IN MAIN HUB                          |                                      |
| DE MATERIA PRIMA                   |                             |    | MEHOMEMAIN (M,H,T)                                 | RAW MATERIAL M FROM HOME H TO MAIN   |
| /                                  |                             |    | HUB (IN),  |                                      |
| 1.1*7.1 0.000592774                |                             |    |  |                                      |
| 1.10*13.1 0.000592774              |                             |    |  |                                      |
| 1.9.1 6.41E-06                     |                             |    |  |                                      |
| 3.14*21.10 1.19E-03                |                             |    |  |                                      |

|                            |   |                         |   |
|----------------------------|---|-------------------------|---|
| MEHUBMAIN (M, PH, T)       | RAW MATERIAL M FROM HUB PH TO MAIN HUB (IN),                                  | YSH0 (M, H)             | DEFINE IF IS NECESSARY STORAGE OF RAW MATERIAL AT TIME ZERO,              |
| MMAINPROC (M, K, R, T)     | RAW MATERIAL M FROM MAIN HUB TO PROCESSING (OUT),                             | YSPH0 (M, PH)           | DEFINE IF IS NECESSARY STORAGE OF RAW MATERIAL AT TIME ZERO,              |
| *PRODUCT IN HUB            |   | YSP0 (M)                | DEFINE IF IS NECESSARY STORAGE OF RAW MATERIAL AT TIME ZERO,              |
| PHUBMARKET (K, PH, MK, T)  | PRODUCT K FROM HUB PH TO MARKET MK (OUT),                                     | YSPH01 (K, PH)          | DEFINE IF IS NECESSARY STORAGE OF RAW MATERIAL AT TIME ZERO,              |
| PHUBMAIN (K, PH, T)        | PRODUCT K FROM HUB PH TO MAIN HUB (OUT),                                      | YSP01 (K)               | DEFINE IF IS NECESSARY STORAGE OF RAW MATERIAL AT TIME ZERO,              |
| PHUBPROC (M, K, R, PH, T)  | PRODUCT K FROM PROCESSING TO HUB PH (IN),                                     | YSMK0 (K, MK)           | DEFINE IF IS NECESSARY STORAGE OF RAW MATERIAL AT TIME ZERO,              |
| *PRODUCT IN MAIN HUB       |   |                         |   |
| PMAINMARKET (K, MK, T)     | PRODUCT K FROM MAIN HUB TO MARKET MK (OUT),                                   | *STORAGE AT TIME T      |   |
| PEHUBMAIN (K, PH, T)       | PRODUCT K FROM HUB PH TO MAIN HUB (IN),                                       | YSMHOME2 (M, H, T)      | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF RAW MATERIAL IN HOME H AT TIME T,   |
| PMAINPROC (M, K, R, T)     | PRODUCT K FROM PROCESSING TO MAIN HUB (IN),                                   | YSMHUB2 (M, PH, T)      | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF RAW MATERIAL IN HUB PH AT TIME T,   |
| *PRODUCT IN MARKET         |   | YSMMAIN2 (M, T)         | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF RAW MATERIAL IN MAIN HUB AT TIME T, |
| PEHUBMARKET (K, PH, MK, T) | PRODUCT K FROM HUB PH TO MARKET MK (IN),                                      | YSPHUB2 (K, PH, T)      | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF PRODUCT IN HUB PH AT TIME T,        |
| PEMAINMARKET (K, MK, T)    | PRODUCT K FROM MAIN HUB TO MARKET MK (IN),                                    | YSPMAIN2 (K, T)         | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF PRODUCT IN MAIN HUB AT TIME T,      |
| PSALE (K, MK, T)           | PRODCUT K SALE IN MARKET MK (OUT);  | YSPMARKET2 (K, MK, T)   | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF PRODUCT IN MARKET MK AT TIME T,     |
| BINARY VARIABLES           |   |                         |   |
| *TRANSPORT                 |   | *STORAGE COST TOTAL     |   |
| YTHOMEHUB (M, H, PH, T)    | DEFINE IF IS NECESSARY THE TRANSPORT FROM HOME H TO HUB PH,                   | CTSMH (M, H)            | COST TOTAL OF STORAGE OF RAW MATERIAL M IN HOME H,                        |
| YTHOMEMAIN (M, H, T)       | DEFINE IF IS NECESSARY THE TRANSPORT FROM HOME H TO MAIN HUB,                 | CTSMPH (M, PH)          | COST TOTAL OF STORAGE OF RAW MATERIAL M IN HUB PH,                        |
| YTHUBMAIN1 (M, PH, T)      | DEFINE IF IS NECESSARY THE TRANSPORT OF RAW MATERIAL FROM HUB PH TO MAIN HUB, | CTSM (M)                | COST TOTAL OF STORAGE OF RAW MATERIAL M IN MAIN HUB,                      |
| YTHUBMAIN2 (K, PH, T)      | DEFINE IF IS NECESSARY THE TRANSPORT OF RAW PRODUCT FROM HUB PH TO MAIN HUB,  | CTSMPH (K, PH)          | COST TOTAL OF STORAGE OF PRODUCT K IN HUB PH,                             |
| YTHUBMARKET (K, PH, MK, T) | DEFINE IF IS NECESSARY THE TRANSPORT FROM HUB PH TO MARKET MK,                | CTSKP (K)               | COST TOTAL OF STORAGE OF PRODUCT K IN MAIN HUB,                           |
| YTMAINMARKET (K, MK, T)    | DEFINE IF IS NECESSARY THE TRANSPORT FROM MAIN HUB TO MARKET MK,              | CTSKMK (K, MK)          | COST TOTAL OF STORAGE OF PRODUCT K IN MARKET MK;                          |
| *PROCESSING                |   | VARIABLES               |   |
| YPHUB (M, K, R, PH, T)     | DEFINE IF IS NECESSARY THE PROCESSING IN HUB PH,                              | *OBJECTIVE VARIABLES    |   |
| YPMAIN (M, K, R, T)        | DEFINE IF IS NECESSARY THE PROCESSING IN MAIN HUB PH,                         | PROFIT                  | NET ANNUAL GAIN,  |
| *STORAGE NECESSARY         |   | SI                      | SOCIAL IMPACT,  |
| YSMHOME1 (M, H)            | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF RAW MATERIAL IN HOME H,                 | EI                      | ENVIRONMENTAL IMPACT;   |
| YSMHUB1 (M, PH)            | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF RAW MATERIAL IN HUB PH,                 | SCALAR                  |   |
| YSMMAIN1 (M)               | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF RAW MATERIAL IN MAIN HUB,               | CONTADORSOCIAL          | CONTADOR PARA EMPLEOS,  |
| YSPHUB1 (K, PH)            | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF PRODUCT IN HUB PH,                      | MAXEI                   | MAXIMO IMPACTO AMBIENTAL,   |
| YSPMAIN1 (K)               | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF PRODUCT IN MAIN HUB,                    | CONTEI                  | CONTADOR PARA IMPACTO AMBIENTAL;  |
| YSPMARKET1 (K, MK)         | DEFINE IF IS NECESSARY THE STORAGE OF PRODUCT IN MARKET MK,                   | EQUATIONS               |   |
| *STORAGE AT TIME ZERO      |   | *ALMACENAMIENTO INICIAL |   |
|                            |   | ALMH0                   | ALMACENAMIENTO INICIAL,   |
|                            |   | ALMH0M                  | ALMACENAMIENTO INICIAL MINIMO,  |
|                            |   | ALMH01                  | ALMACENAMIENTO INICIAL,   |
|                            |   | ALMH01M                 | ALMACENAMIENTO INICIAL,   |
|                            |   | ALMH02                  | ALMACENAMIENTO INICIAL,   |
|                            |   | ALMH02M                 | ALMACENAMIENTO INICIAL,   |
|                            |   | ALMH03                  | ALMACENAMIENTO INICIAL,   |
|                            |   | ALMH03M                 | ALMACENAMIENTO INICIAL,   |

|  |  |                                    |   |
|--|--|------------------------------------|---|
| ALMH04                                 | ALMACENAMIENTO INICIAL,                    | UTHUBMAIN2                         | MAXIMUM TRANSPORT OF PRODUCT FROM HUB PH TO |
| ALMH04M                                | ALMACENAMIENTO INICIAL,                    | MAIN HUB,                          |   |
| ALMH05                                 | ALMACENAMIENTO INICIAL,                    | LTHUBMAIN2                         | MINIMUM TRANSPORT OF PRODUCT FROM HUB PH TO |
| ALMH05M                                | ALMACENAMIENTO INICIAL,                    | MAIN HUB,                          |   |
|  |  | UTHUBMARKET                        | MAXIMUM TRANSPORT FROM HUB PH TO MARKET MK, |
| ALMH06                                 | ALMACENAMIENTO INICIAL REAL,               | LTHUBMARKET                        | MAXIMUM TRANSPORT FROM HUB PH TO MARKET MK, |
|  |  | UTMAINMARKET                       | MAXIMUM TRANSPORT FROM MAIN HUB TO MARKET   |
| ALMAFIN                                | ALMACENAMIENTO AL FINAL,                   | MK,                                |   |
| ALMAFIN1                               | ALMACENAMIENTO AL FINAL,                   | LTMAINMARKET                       | MAXIMUM TRANSPORT FROM MAIN HUB TO MARKET   |
| ALMAFIN2                               | ALMACENAMIENTO AL FINAL,                   | MK,                                |   |
| ALMAFIN3                               | ALMACENAMIENTO AL FINAL,                   |                                    |   |
| ALMAFIN4                               | ALMACENAMIENTO AL FINAL,                   | *PROCESSING                        |   |
| ALMAFIN5                               | ALMACENAMIENTO AL FINAL,                   |                                    |   |
|  |  | CONVMP12                           |   |
| *PRODUCTION OF RAW MATERIAL            |  | UCONVMP1                           | MAXIMUM PROCESSING PERMITIBLE IN HUB PH,    |
| MAXPROD                                | LIMITS FOR PRODUCTION OF RAW MATERIAL,     | LCONVMP1                           | MINIMUM PROCESSING PERMITIBLE IN HUB PH,    |
|  |  |                                    |   |
| *BALANCES OF MATERIAL                  |  | CONVMP22                           | DSDSAD,                                     |
| BMHOME                                 | BALANCE OF RAW MATERIAL M IN HOME H,       | UCONVMP2                           | MAXIMUM PROCESSING PERMITIBLE IN MAIN HUB,  |
| BMHOME2                                | BALANCE OF RAW MATERIAL M IN HOME H,       | LCONVMP2                           | MINIMUM PROCESSING PERMITIBLE IN MAIN HUB,  |
| BMHUB                                  | BALANCE OF RAW MATERIAL M IN HUB PH,       |                                    |   |
| BMHUB2                                 | BALANCE OF RAW MATERIAL M IN HUB PH,       | *STORAGE COST                      |   |
| BMAIN                                  | BALANCE OF RAW MATERIAL M IN MAIN HUB,     | CSMHOME                            | STORAGE COST OF RAW MATERIAL M IN HOME H,   |
| BMAIN2                                 | BALANCE OF RAW MATERIAL M IN MAIN HUB,     | CSMHUB                             | STORAGE COST OF RAW MATERIAL M IN HUB PH,   |
| BPHUB                                  | BALANCE OF PRODUCT K IN HUB PH,            | CSMMAIN                            | STORAGE COST OF RAW MATERIAL M IN MAIN HUB, |
| BPHUB2                                 | BALANCE OF PRODUCT K IN HUB PH,            | CSPHUB                             | STORAGE COST OF PRODUCT K IN HUB PH,        |
| BPMAIN                                 | BALANCE OF PRODUCT K IN MAIN HUB,          | CSPMAIN                            | STORAGE COST OF PRODUCT K IN MAIN HUB,      |
| BPMAIN2                                | BALANCE OF PRODUCT K IN MAIN HUB,          | CSPMARKET                          | STORAGE COST OF PRODUCT K IN MARKET MK,     |
| BPMARKET                               | BALANCE OF PRODUCT K IN MARKET MK,         |                                    |   |
| BPMARKET2                              | BALANCE OF PRODUCT K IN MARKET MK,         | *STORAGE LIMITS                    |   |
|  |  | USMHOME                            | MAXIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M IN HOME   |
| *MAXIMUM SALE                          |  | H,                                 |   |
| USALE                                  | DEFINE THE MAXIMUM SALE OF PRODUCT,        | LSMHOME                            | MINIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M IN HOME   |
|  |  | H,                                 |   |
| *CONSTRAINT FOR TRANSPORT ( IN = OUT ) |  | USMHUB                             | MAXIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M IN HUB    |
| CONSTHOMEHUB                           | CONSTRAINT FOR TRANSPORT OF RAW MATERIAL   | PH,                                |   |
| FROM HOME H TO HUB PH,                 |  | LSMHUB                             | MINIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M IN HUB    |
|  |  | PH,                                |   |
| CONSTHOMEMAIN                          | CONSTRAINT FOR TRANSPORT OF RAW MATERIAL   | USMMAIN                            | MAXIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M IN MAIN   |
| FROM HOME H TO MAIN HUB,               |  | HUB,                               |   |
|  |  | LSMMAIN                            | MINIMUM STORAGE OF RAW MATERIAL M IN MAIN   |
| CONSTHUBMAIN1                          | CONSTRAINT FOR TRANSPORT OF RAW MATERIAL   | HUB,                               |   |
| FROM HUB PH TO MAIN HUB,               |  | USPHUB                             | MAXIMUM STORAGE OF PRODUCT K IN HUB PH,     |
|  |  | LSPHUB                             | MINIMUM STORAGE OF PRODUCT K IN HUB PH,     |
| CONSTHUBMAIN2                          | CONSTRAINT FOR TRANSPORT OF PRODUCT FROM   | USPMAIN                            | MAXIMUM STORAGE OF PRODUCT K IN MAIN HUB,   |
| HUB PH TO MAIN HUB,                    |  | LSPMAIN                            | MINIMUM STORAGE OF PRODUCT K IN MAIN HUB,   |
|  |  | USPMARKET                          | MAXIMUM STORAGE OF PRODUCT K IN MARKET MK,  |
| CONSTHUBMARKET                         | CONSTRAINT FOR TRANSPORT OF PRODUCT FROM   | LSPMARKET                          | MINIMUM STORAGE OF PRODUCT K IN MARKET MK,  |
| HUB PH TO MARKET MK,                   |  |                                    |   |
|  |  | *RELATIONSHIP FOR BINARY VARIABLES |   |
| CONSTMAINMARKET                        | CONSTRAINT FOR TRANSPORT OF PRODUCT FROM   | R1                                 | 1 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
| MAIN HUB TO MARKET MK,                 |  | R2                                 | 2 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R3                                 | 3 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R4                                 | 4 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R5                                 | 5 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R6                                 | 6 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R7                                 | 7 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R8                                 | 8 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R9                                 | 9 RELATION FOR BINARY VARIABLES,            |
|  |  | R10                                | 10 RELATION FOR BINARY VARIABLES,           |
|  |  | R11                                | 11 RELATION FOR BINARY VARIABLES,           |
|  |  | R12                                | 12 RELATION FOR BINARY VARIABLES,           |
| *TRANSPORT LIMITS                      |  |                                    |   |
| UTHOMEHUB                              | MAXIMUM TRANSPORT FROM HOME H TO HUB PH,   |                                    |   |
| LTHOMEHUB                              | MINIMUM TRANSPORT FROM HOME H TO HUB PH,   |                                    |   |
| UTHOMEMAIN                             | MAXIMUM TRANSPORT FROM HOME H TO MAIN HUB, |                                    |   |
| LTHOMEMAIN                             | MINIMUM TRANSPORT FROM HOME H TO MAIN HUB, |                                    |   |
| UTHUBMAIN1                             | MAXIMUM TRANSPORT OF RAW MATERIAL FROM HUB |                                    |   |
| PH TO MAIN HUB,                        |  |                                    |   |
| LTHUBMAIN1                             | MINIMUM TRANSPORT OF RAW MATERIAL FROM HUB |                                    |   |
| PH TO MAIN HUB,                        |  |                                    |   |
|  |  | *OBJECTIVE FUNCTIONS               |   |

OBJ1 OBJECTIVE FUNTION,  
 OBJ2 ENVIRONMENT IMPACT,  
 OBJ3 SOCIAL IMPACT,

\*ADDITIONAL EQUATIONS  
 ADIT ECUACION ADICIONAL,  
 ADIT2 ECUACION ADICIONAL 2;

\*EQUATIONS FOR THE MODEL

\*ALMACENAMIENTO INICIAL EN LOS DISTINTOS LUGARES

\*MATERIA PRIMA EN CADA HOME  
 ALMH0 (M, H) . .  
 MHOME0 (M, H) =L=USMH (M, H) \*YSH0 (M, H) ;  
 ALMH0M (M, H) . .  
 MHOME0 (M, H) =G=LSMH (M, H) \*YSH0 (M, H) ;

\*MATERIA PRIMA EN CADA HUB  
 ALMH01 (M, PH) . .  
 MHUB0 (M, PH) =L=USMPH (M, PH) \*YSPH0 (M, PH) ;  
 ALMH01M (M, PH) . .  
 MHUB0 (M, PH) =G=LSMPH (M, PH) \*YSPH0 (M, PH) ;

\*MATERIA PRIMA EN MAIN  
 ALMH02 (M) . .  
 MMAIN0 (M) =L=USMP (M) \*YSP0 (M) ;  
 ALMH02M (M) . .  
 MMAIN0 (M) =G=LSMP (M) \*YSP0 (M) ;

\*PRODUCTO EN HUB  
 ALMH03 (K, PH) . .  
 PHUB0 (K, PH) =L=USKPH (K, PH) \*YSPH01 (K, PH) ;  
 ALMH03M (K, PH) . .  
 PHUB0 (K, PH) =G=LSKPH (K, PH) \*YSPH01 (K, PH) ;

\*PRODUCTO EN MAIN  
 ALMH04 (K) . .  
 PMAIN0 (K) =L=USKP (K) \*YSP01 (K) ;  
 ALMH04M (K) . .  
 PMAIN0 (K) =G=LSKP (K) \*YSP01 (K) ;

\*PRODUCTO EN MARKET  
 ALMH05 (K, MK) . .  
 PMARKET0 (K, MK) =L=USKMK (K, MK) \*YSMK0 (K, MK) ;  
 ALMH05M (K, MK) . .  
 PMARKET0 (K, MK) =G=LSKMK (K, MK) \*YSMK0 (K, MK) ;

\*PARA SABER HASTA QUE CAPACIDAD ESTA EL ALMACEN AL INICIO EN CADA HOME  
 \*SI ES CERO ALMACEN (M, H) SIGNIFICA QUE NO SE TIENE AL INICIO  
 ALMH06 (M, H) . .  
 MHOME0 (M, H) =E=ALMACEN (M, H) \*USMH (M, H) ;

\*RESTRICCIONES AL FINAL PARA QUE EL COMIENZO SEA IGUAL AL FINAL  
 ALMAFIN (M, H, T) \$ (ORD (T) =12) . . MHOME (M, H, T) =E=MHOME0 (M, H) ;  
 ALMAFIN1 (M, PH, T) \$ (ORD (T) =12) . . MHUB (M, PH, T) =E=MHUB0 (M, PH) ;  
 ALMAFIN2 (M, T) \$ (ORD (T) =12) . . MMAIN (M, T) =E=MMAIN0 (M) ;  
 ALMAFIN3 (K, PH, T) \$ (ORD (T) =12) . . PHUB (K, PH, T) =E=PHUB0 (K, PH) ;  
 ALMAFIN4 (K, T) \$ (ORD (T) =12) . . PMAIN (K, T) =E=PMAIN0 (K) ;

ALMAFIN5 (K, MK, T) \$ (ORD (T) =12) . .  
 PMARKET (K, MK, T) =E=PMARKET0 (K, MK) ;

\*PRODUCTION OF RAW MATERIAL (PARA QUE LA PRODUCCIÓN DE MATERIA PRIMA SEA MENOR A SU MAXIMA PRODUCCION)  
 MAXPROD (M, H, T) . .  
 MAXMPROD (M, H, T) =G=MPROD (M, H, T) ;

\*BALANCES OF MATERIAL

\*BALACE DE MATERIA PRIMA EN HOME  
 BMHOME (M, H, T) \$ (ORD (T) >1) . .  
 MHOME (M, H, T) =E=MPROD (M, H, T) -SUM ( (PH) , MHOMEHUB (M, H, PH, T) ) -  
 MHOMEMAIN (M, H, T) +MHOME (M, H, T-1) ;  
 BMHOME2 (M, H, T) \$ (ORD (T) =1) . .  
 MHOME (M, H, T) =E=MPROD (M, H, T) -SUM ( (PH) , MHOMEHUB (M, H, PH, T) ) -  
 MHOMEMAIN (M, H, T) +MHOME0 (M, H) ;

\*BALANCE DE MATERIA PRIMA EN HUB  
 BMHUB (M, PH, T) \$ (ORD (T) >1) . .  
 MHUB (M, PH, T) =E=SUM ( (H) , MEHOMEHUB (M, H, PH, T) ) -  
 MHUBMAIN (M, PH, T) -  
 SUM ( (K, R) , MHUBPROC (M, K, R, PH, T) ) +MHUB (M, PH, T-1) ;  
 BMHUB2 (M, PH, T) \$ (ORD (T) =1) . . MHUB (M, PH, T) =E=-  
 MHUBMAIN (M, PH, T) -  
 SUM ( (K, R) , MHUBPROC (M, K, R, PH, T) ) +MHUB0 (M, PH) ;

\*BALANCE DE MATERIA PRIMA EN MAIN  
 BMMAIN (M, T) \$ (ORD (T) >1) . .  
 MMAIN (M, T) =E=SUM ( (H) , MEHOMEMAIN (M, H, T) ) +SUM ( (PH) , MEHUBMAIN (M, PH, T) ) -  
 SUM ( (K, R) , MMAINPROC (M, K, R, T) ) +MMAIN (M, T-1) ;  
 BMMAIN2 (M, T) \$ (ORD (T) =1) . . MMAIN (M, T) =E=-  
 SUM ( (K, R) , MMAINPROC (M, K, R, T) ) +MMAIN0 (M) ;

\*BALANCE DE PRODUCTO EN HUB  
 BPHUB (K, PH, T) \$ (ORD (T) >1) . .  
 PHUB (K, PH, T) =E=SUM ( (M, R) , PHUBPROC (M, K, R, PH, T) ) -  
 PHUBMAIN (K, PH, T) -  
 SUM ( (MK) , PHUBMARKET (K, PH, MK, T) ) +PHUB (K, PH, T-1) ;  
 BPHUB2 (K, PH, T) \$ (ORD (T) =1) . . PHUB (K, PH, T) =E=-  
 PHUBMAIN (K, PH, T) -  
 SUM ( (MK) , PHUBMARKET (K, PH, MK, T) ) +PHUB0 (K, PH) ;

\*BALANCE DE PRODUCTO EN MAIN  
 BPMAIN (K, T) \$ (ORD (T) >1) . .  
 PMAIN (K, T) =E=SUM ( (M, R) , PMAINPROC (M, K, R, T) ) +SUM ( (PH) , PEHUBMAIN (K, PH, T) ) -  
 SUM ( (MK) , PMAINMARKET (K, MK, T) ) +PMAIN (K, T-1) ;  
 BPMAIN2 (K, T) \$ (ORD (T) =1) . . PMAIN (K, T) =E=-  
 SUM ( (MK) , PMAINMARKET (K, MK, T) ) +PMAIN0 (K) ;

\*BALANCE DE PRODUCTO EN MARKET  
 BPMARKET (K, MK, T) \$ (ORD (T) >1) . .  
 PMARKET (K, MK, T) =E=SUM ( (PH) , PEHUBMARKET (K, PH, MK, T) ) +PEMAINMARKET (K, MK, T) -  
 PSALE (K, MK, T) +PMARKET (K, MK, T-1) ;  
 BPMARKET2 (K, MK, T) \$ (ORD (T) =1) . . PMARKET (K, MK, T) =E=-  
 PSALE (K, MK, T) +PMARKET0 (K, MK) ;

\*MAXIMUM SALE (PARA QUE LAS VENTAS NO SUPEREN LAS DEMANDAS)  
 USALE (K, MK, T) . .  
 PDEMAND (K, MK, T) =G=PSALE (K, MK, T) ;

\*CONSTRAINT FOR TRANSPORT ( IN = OUT )

```

CONSTHOMEHUB (M, H, PH, T) $ (ORD (T) <12) . .
MHOMEHUB (M, H, PH, T) -MEHOMEHUB (M, H, PH, T+1) =E=0;

CONSTHOMEMAIN (M, H, T) $ (ORD (T) <12) . .      MHOMEMAIN (M, H, T) -
MEHOMEMAIN (M, H, T+1) =E=0;

CONSTHUBMAIN1 (M, PH, T) $ (ORD (T) <12) . .      MHUBMAIN (M, PH, T) -
MEHUBMAIN (M, PH, T+1) =E=0;

CONSTHUBMAIN2 (K, PH, T) $ (ORD (T) <12) . .      PHUBMAIN (K, PH, T) -
PEHUBMAIN (K, PH, T+1) =E=0;

CONSTHUBMARKET (K, PH, MK, T) $ (ORD (T) <12) . .
PHUBMARKET (K, PH, MK, T) -PEHUBMARKET (K, PH, MK, T+1) =E=0;

CONSTMAINMARKET (K, MK, T) $ (ORD (T) <12) . .
PMAINMARKET (K, MK, T) -PEMAINMARKET (K, MK, T+1) =E=0;

*TRANSPORT LIMITS
UTHOMEHUB (M, H, PH, T) . .
MHOMEHUB (M, H, PH, T) =L=YTHOMEHUB (M, H, PH, T) *UTMHPH (M, H, PH) ;
LTHOMEHUB (M, H, PH, T) . .
MHOMEHUB (M, H, PH, T) =G=YTHOMEHUB (M, H, PH, T) *LTMHPH (M, H, PH) ;

UTHOMEMAIN (M, H, T) . .
MHOMEMAIN (M, H, T) =L=YTHOMEMAIN (M, H, T) *UTMHP (M, H) ;
LTHOMEMAIN (M, H, T) . .
MHOMEMAIN (M, H, T) =G=YTHOMEMAIN (M, H, T) *LTMHP (M, H) ;

UTHUBMAIN1 (M, PH, T) . .
MHUBMAIN (M, PH, T) =L=YTHUBMAIN1 (M, PH, T) *UTKPHP1 (M, PH) ;
LTHUBMAIN1 (M, PH, T) . .
MHUBMAIN (M, PH, T) =G=YTHUBMAIN1 (M, PH, T) *LTKPHP1 (M, PH) ;

UTHUBMAIN2 (K, PH, T) . .
PHUBMAIN (K, PH, T) =L=YTHUBMAIN2 (K, PH, T) *UTKPHP2 (K, PH) ;
LTHUBMAIN2 (K, PH, T) . .
PHUBMAIN (K, PH, T) =G=YTHUBMAIN2 (K, PH, T) *LTKPHP2 (K, PH) ;

UTHUBMARKET (K, PH, MK, T) . .
PHUBMARKET (K, PH, MK, T) =L=YTHUBMARKET (K, PH, MK, T) *UTKPHMK (K, PH,
MK) ;
LTHUBMARKET (K, PH, MK, T) . .
PHUBMARKET (K, PH, MK, T) =G=YTHUBMARKET (K, PH, MK, T) *LTKPHMK (K, PH,
MK) ;

UTMAINMARKET (K, MK, T) . .
PMAINMARKET (K, MK, T) =L=YTMAINMARKET (K, MK, T) *UTKPMK (K, MK) ;
LTMAINMARKET (K, PH, MK, T) . .
PMAINMARKET (K, MK, T) =G=YTMAINMARKET (K, MK, T) *LTKPMK (K, MK) ;

*PROCESSING EQUATIONS

CONVMP12 (M, K, R, PH, T) . .      PHUBPROC (M, K, R, PH, T+1) -
ALFA (K, M, R) *MHUBPROC (M, K, R, PH, T) =E=0;
UCONVMP1 (M, K, R, PH, T) . .
MHUBPROC (M, K, R, PH, T) =L=YPHUB (M, K, R, PH, T) *UPMKRPH (M, K, R, PH) *3
;
LCONVMP1 (M, K, R, PH, T) . .
MHUBPROC (M, K, R, PH, T) =G=YPHUB (M, K, R, PH, T) *LPMKRPH (M, K, R, PH) ;

CONVMP22 (M, K, R, T) . .      PMAINPROC (M, K, R, T+1) -
ALFA (K, M, R) *MMAINPROC (M, K, R, T) =E=0;

UCONVMP2 (M, K, R, T) . .
MMAINPROC (M, K, R, T) =G=YPMAIN (M, K, R, T) *LPMKRPH (M, K, R) ;

*STORAGE COST
CSMHOME (M, H) . .
CTSMH (M, H) =E=CSMH (M, H) *USMH (M, H) *YSMHOME1 (M, H) +SUM ( ( T) , CVSMH
(M, H, T) *MHOME (M, H, T) ) ;
CSMHUB (M, PH) . .
CTSMPH (M, PH) =E=CSMPH (M, PH) *USMPH (M, PH) *YSMHUB1 (M, PH) +SUM ( ( T)
, CVSMPH (M, PH, T) *MHUB (M, PH, T) ) ;
CSMMAIN (M) . .
CTSMP (M) =E=CSMP (M) *USMP (M) *YSMMAIN1 (M) +SUM ( ( T) , CVSMP (M, T) *MM
AIN (M, T) ) ;
CSPHUB (K, PH) . .
CTSKPH (K, PH) =E=CSKPH (K, PH) *USKPH (K, PH) *YSPHUB1 (K, PH) +SUM ( ( T)
, CVSKPH (K, PH, T) *PHUB (K, PH, T) ) ;
CSPMAIN (K) . .
CTSKP (K) =E=CSKP (K) *USKP (K) *YSPMAIN1 (K) +SUM ( ( T) , CVSKP (K, T) *PM
AIN (K, T) ) ;
CSPMARKET (K, MK) . .
CTSKMK (K, MK) =E=CSKMK (K, MK) *USKMK (K, MK) *YSPMARKET1 (K, MK) +SUM (
(T) , CVSKMK (K, MK, T) *PMARKET (K, MK, T) ) ;

*STORAGE LIMITS
USMHOME (M, H, T) . .
MHOME (M, H, T) =L=USMH (M, H) *YSMHOME2 (M, H, T) ;
LSMHOME (M, H, T) . .
MHOME (M, H, T) =G=LSMH (M, H) *YSMHOME2 (M, H, T) ;

USMHUB (M, PH, T) . .
MHUB (M, PH, T) =L=USMPH (M, PH) *YSMHUB2 (M, PH, T) ;
LSMHUB (M, PH, T) . .
MHUB (M, PH, T) =G=LSMPH (M, PH) *YSMHUB2 (M, PH, T) ;

USMMAIN (M, T) . .
MMAIN (M, T) =L=USMP (M) *YSMMAIN2 (M, T) ;
LSMMAIN (M, T) . .
MMAIN (M, T) =G=LSMP (M) *YSMMAIN2 (M, T) ;

USPHUB (K, PH, T) . .
PHUB (K, PH, T) =L=USKPH (K, PH) *YSPHUB2 (K, PH, T) ;
LSPHUB (K, PH, T) . .
PHUB (K, PH, T) =G=LSKPH (K, PH) *YSPHUB2 (K, PH, T) ;

USPMAIN (K, T) . .
PMAIN (K, T) =L=USKP (K) *YSPMAIN2 (K, T) ;
LSPMAIN (K, T) . .
PMAIN (K, T) =G=LSKP (K) *YSPMAIN2 (K, T) ;

USPMARKET (K, MK, T) . .
PMARKET (K, MK, T) =L=USKMK (K, MK) *YSPMARKET2 (K, MK, T) ;
LSPMARKET (K, MK, T) . .
PMARKET (K, MK, T) =G=LSKMK (K, MK) *YSPMARKET2 (K, MK, T) ;

*RELATIONSHIP FOR BYNARY VARIABLES
R1 (M, H) . .
YSMHOME1 (M, H) =L=SUM ( ( T) , YSMHOME2 (M, H, T) ) +YSH0 (M, H) ;
R2 (M, H) . .
12*YSMHOME1 (M, H) =G=SUM ( ( T) , YSMHOME2 (M, H, T) ) +YSH0 (M, H) ;

R3 (M, PH) . .
YSMHUB1 (M, PH) =L=SUM ( ( T) , YSMHUB2 (M, PH, T) ) +YSPH0 (M, PH) ;

```

```

R4 (M, PH) . .
12*YSMHUB1 (M, PH) =G=SUM ( ( T ) , YSMHUB2 (M, PH, T) ) +YSPH0 (M, PH) ;

R5 (M) . .
YSMMAIN1 (M) =L=SUM ( ( T ) , YSMMAIN2 (M, T) ) +YSP0 (M) ;
R6 (M) . .
12*YSMMAIN1 (M) =G=SUM ( ( T ) , YSMMAIN2 (M, T) ) +YSP0 (M) ;

R7 (K, PH) . .
YSPHUB1 (K, PH) =L=SUM ( ( T ) , YSPHUB2 (K, PH, T) ) +YSPH01 (K, PH) ;
R8 (K, PH) . .
12*YSPHUB1 (K, PH) =G=SUM ( ( T ) , YSPHUB2 (K, PH, T) ) +YSPH01 (K, PH) ;

R9 (K) . .
YSPMAIN1 (K) =L=SUM ( ( T ) , YSPMAIN2 (K, T) ) +YSP01 (K) ;
R10 (K) . .
12*YSPMAIN1 (K) =G=SUM ( ( T ) , YSPMAIN2 (K, T) ) +YSP01 (K) ;

R11 (K, MK) . .
YSPMARKET1 (K, MK) =L=SUM ( ( T ) , YSPMARKET2 (K, MK, T) ) +YSMK0 (K, MK) ;
R12 (K, MK) . .
12*YSPMARKET1 (K, MK) =G=SUM ( ( T ) , YSPMARKET2 (K, MK, T) ) +YSMK0 (K, MK) ;

*OBJECTIVE FUNCTIONS
OBJ1 . .
PROFIT=E=SUM ( ( K, MK, T ) , CP (K, MK, T) *PSALE (K, MK, T) ) -
SUM ( ( M, H, T ) , CMPROD (M, H, T) *MPROD (M, H, T) )
-
SUM ( ( M, H ) , CTSMH (M, H) ) -SUM ( ( M, PH ) , CTSMPH (M, PH) ) -
SUM ( ( M ) , CTSMP (M) )
-
SUM ( ( K, PH ) , CTSKPH (K, PH) ) -SUM ( ( K ) , CTSKP (K) ) -
SUM ( ( K, MK ) , CTSKMK (K, MK) )
-
SUM ( ( M, H, PH, T ) , CTMHP (M, H, PH, T) *MHOMEHUB (M, H, PH, T) ) -
SUM ( ( M, H, T ) , CTMHP (M, H, T) *MHOMEMAIN (M, H, T) )
-
SUM ( ( M, PH, T ) , CTMPHP (M, PH, T) *MHUBMAIN (M, PH, T) ) -
SUM ( ( K, PH, T ) , CTKPHP (K, PH, T) *PHUBMAIN (K, PH, T) )
-
SUM ( ( K, PH, MK, T ) , CTKPHMK (K, PH, MK, T) *PHUBMARKET (K, PH, MK, T) ) -
SUM ( ( K, MK, T ) , CTKPMK (K, MK, T) *PMAINMARKET (K, MK, T) )
-
SUM ( ( M, K, R, PH, T ) , CPMKRPH (M, K, R, PH, T) *MHUBPROC (M, K, R, PH, T) ) -
SUM ( ( M, K, R, T ) , CPMKRP (M, K, R, T) *MMAINPROC (M, K, R, T) )
-
SUM ( ( K, MK, T ) , PENALTY (K) *CP (K, MK, T) * ( PDEMAND (K, MK, T) -
PSALE (K, MK, T) ) ) ;

OBJ2 . .
EI=E=SUM ( ( K, MK, T ) , EIP (K) *PSALE (K, MK, T) ) +SUM ( ( M, H, T ) , EIMPROD (
M) *MPROD (M, H, T) )

+SUM ( ( M, H, PH, T ) , EITMHPH (M, H, PH) *MHOMEHUB (M, H, PH, T) ) +SUM ( ( M, H
, T ) , EITMHP (M, H) *MHOMEMAIN (M, H, T) )

+SUM ( ( M, PH, T ) , EITMPHP (M, PH) *MHUBMAIN (M, PH, T) ) +SUM ( ( K, PH, T ) , E
ITKPHP (K, PH) *PHUBMAIN (K, PH, T) )

+SUM ( ( K, PH, MK, T ) , EITKPHMK (K, PH, MK) *PHUBMARKET (K, PH, MK, T) ) +SU
M ( ( K, MK, T ) , EITKPMK (K, MK) *PMAINMARKET (K, MK, T) )

+SUM ( ( M, K, R, PH, T ) , EIPMKRPH (M, K, R, PH) *MHUBPROC (M, K, R, PH, T) ) +S
UM ( ( M, K, R, T ) , EIPMKRP (M, K, R) *MMAINPROC (M, K, R, T) ) ;

OBJ3 . .
SI=E=SUM ( ( M, H, T ) , JOBS1 (M, H) *MPROD (M, H, T) ) +SUM ( ( M, H, PH, T ) , JOB
S2 (H, PH) *MHOMEHUB (M, H, PH, T) ) +SUM ( ( M, H, T ) , JOBS22 (H) *MHOMEMAIN
(M, H, T) )

+SUM ( ( M, PH, T ) , JOBS23 (PH) *MHUBMAIN (M, PH, T) ) +SUM ( ( M, K, R, PH, T ) ,
JOBS3 (K, M, R) *MHUBPROC (M, K, R, PH, T) ) +SUM ( ( M, K, R, T ) , JOBS3 (K, M, R
) *MMAINPROC (M, K, R, T) ) ;

*ADDITIONAL EQUATION

ADIT . . EI=L=MAXEI*CONTEI;
ADIT2 . . PROFIT=G=2E5;

MODEL SCHEDULLING /ALL/;
MODEL SCHEDULLINGINITIAL /ALL/;
*
PARAMETER
JOBPROD EMPLEOS TOTALES DE LA PRODUCCION,
JOBTRANS EMPLEOS TOTALES DEL TRANSPORTE,
JOBPROCES EMPLEOS POR PROCESAMIENTO,
EIPRODM IMPACTO AMBIENTAL POR PRODUCCIÓN,
EITRANSP IMPACTO AMBIENTAL POR TRANSPORTE,
EIPROCES IMPACTO AMBIENTAL POR PROCESAMIENTO,

*%PORCENTAJES
MATERIAPRIMA (M, H, T) PORCENTAJE DEMATERIA PRODUCIDA
COMPARADA CON LA MAXIMA,
MATERIAPRIMAPROCI (M, K, PH, T) PORCENTAJE DE MATERIA PRIMA
PORCESADA CON LA MAXIMA,
MATERIAPRIMAPROCI2 (M, K, T) PORCENTAJE DE MATERIA PRIMA
PORCESADA CON LA MAXIMA,

PRODUCT (K, MK, T) PORCENTAJE DE PRODUCTO VENDIDO CON
LA DEMANDA;

CONTEI=1;
MAXEI=2E12;
SOLVE SCHEDULLINGINITIAL USING MIP MAXIMIZING SI;
DISPLAY PROFIT.L, EI.L, SI.L;
MAXEI=EI.L;

CONTEI=0;
WHILE ( (CONTEI LE 1) ,

SOLVE SCHEDULLING USING MIP MAXIMIZING SI;
*
SEPARACION DE LOS COMPONENTES DE LAS
FUNCIONES OBJETIVOS
JOBPROD=SUM ( ( M, H, T ) , JOBS1 (M, H) *MPROD.L (M, H, T) ) ;

JOBTRANS=SUM ( ( M, H, PH, T ) , JOBS2 (H, PH) *MHOMEHUB.L (M, H, PH, T) ) +SU
M ( ( M, H, T ) , JOBS22 (H) *MHOMEMAIN.L (M, H, T) ) +SUM ( ( M, PH, T ) , JOBS23 (
PH) *MHUBMAIN.L (M, PH, T) ) ;

```

```

JOBPROCES=
SUM ( ( M, K, R, PH, T ), JOBS3 ( K, M, R ) *MHUBPROC.L ( M, K, R, PH, T ) ) +SUM ( ( M
, K, R, T ), JOBS3 ( K, M, R ) *MMAINPROC.L ( M, K, R, T ) );

EIPRODM=SUM ( ( M, H, T ), EIMPROD ( M ) *MPROD.L ( M, H, T ) );

EITRANSP=SUM ( ( M, H, PH, T ), EITMHPH ( M, H, PH ) *MHOMEHUB.L ( M, H, PH, T )
) +SUM ( ( M, H, T ), EITMHP ( M, H ) *MHOMEMAIN.L ( M, H, T ) )

+SUM ( ( M, PH, T ), EITMPHP ( M, PH ) *MHUBMAIN.L ( M, PH, T ) ) +SUM ( ( K, PH, T )
, EITKPHP ( K, PH ) *PHUBMAIN.L ( K, PH, T ) )

+SUM ( ( K, PH, MK, T ), EITKPHMK ( K, PH, MK ) *PHUBMARKET.L ( K, PH, MK, T ) ) +
SUM ( ( K, MK, T ), EITKPMK ( K, MK ) *PMAINMARKET.L ( K, MK, T ) );

EIPROCES=SUM ( ( M, K, R, PH, T ), EIPMKRPH ( M, K, R, PH ) *MHUBPROC.L ( M, K,
R, PH, T ) ) +SUM ( ( M, K, R, T ), EIPMKRF ( M, K, R ) *MMAINPROC.L ( M, K, R, T ) );
        DISPLAY          CONTEI,          PROFIT.L,
EI.L, EIPRODM, EITRANSP, EIPROCES, SI.L, JOBPROD, JOBTRANS,
JOBPROCES, MEHOMEHUB.L, MHOMEMAIN.L, MHUBPROC.L, MMAINPROC.L;

        CONTEI=CONTEI+0.25E-1;
    );
        CONTEI=0.5;
SOLVE SCHEDULLING USING MIP MAXIMIZING SI;

MATERIAPRIMA ( M, H, T ) =100*MPROD.L ( M, H, T ) /MAXMPROD ( M, H, T );
MATERIAPRIMAPROC1 ( M, K, PH, T ) =SUM ( ( R ), PHUBPROC.L ( M, K, R, PH, T ) );
MATERIAPRIMAPROC2 ( M, K, T ) =SUM ( ( R ), PMAINPROC.L ( M, K, R, T ) );

PRODUCT ( K, MK, T ) =100*PSALE.L ( K, MK, T ) /PDEMAND ( K, MK, T );
DISPLAY
MATERIAPRIMA, MATERIAPRIMAPROC1, MATERIAPRIMAPROC2, PHUB.L,
PRODUCT;

```

A.2 Código en lenguaje GAMS del modelo para un sistema distribuido de biorefinerías basado en el aprovechamiento de lirio acuático

```

$TITLE TREATMENT_WATER_HYACINTH

$ONEMPTY;

*****
*****SETS*****
*****

SETS
    S          SOURCES          /1*7/
*1.- Lake of Chapala
*2.- Lake of Patzcuaro
*3.- Lake of Cuitzeo
*4.- Lake of Yuriria
*5.- Lake of Sayula
*6.- Lake of Atotonilco
*7.- Balsas River
    I          HUBS            /1*10/
*1.- Morelia
*2.- Lazaro Cardenas
*3.- Leon
*4.- Queretaro
*5.- Celaya
*6.- Zamora
*7.- Uruapan
*8.- Yuriria
*9.- Cuitzeo
*10.- Zacapu

*CENTRALIZER ES GUADALAJARA

    J          TECHNOLOGIES OF PROCESSING /1*7/
*1.- Acid Hydrolysis and fermentation with 10% Sulfuric Acid
*2.- Acid Hydrolysis and fermentation with 1% Sulfuric Acid
*3.- Anaerobic Fermentation
*4.- MixAlco Process
*5.- Composting
*6.- Deoxy liquefaction
*7.- Cogeneration
    P          PRODUCTS        /1*6/
*1.- Ethanol
*2.- Biogas
*3.- Acetic Acid
*4.- Compost
*5.- HCF
*6.- Energy

    N          TECHNOLOGIES OF WATER TREATMENT /1*4/
*1.- Ion exchange resins
*2.- Ion exchange mexican clinoptilolite
*3.- Electroplatng HA 216
*4.- Nothing (by pass)
    K          PLACES TO CONSUME PRODUCTS /1*12/
*1.- Morelia
*2.- Lazaro Cardenas
*3.- Guadalajara
*4.- Queretaro

*5.- Leon
*6.- Patzcuaro
*7.- Celaya
*8.- Zamora
*9.- Uruapan
*10.- Yuriria
*11.- Cuitzeo
*12.- Zacapu

    C          KIND OF POLLUTANT IN THE WATER /1/
*1.- Cr (VI)
    M          WATER CONSUMERS /1*12/
*1.- Morelia (Industrial)
*2.- Lazaro Cardenas (Industrial)
*3.- Guadalajara (Industrial)
*4.- Queretaro (Industrial)
*5.- Leon (
*6.- Patzcuaro
*7.- Celaya
*8.- Zamora
*9.- Uruapan
*10.- Yuriria
*11.- Cuitzeo
*12.- Zacapu

    Q          INDEX TO THE ECONOMIES OF SCALE /1*2/
*FALTA DEFINIRLOS

*****
*****PARAMETERS*****
*****

PARAMETERS
    FWHMAX(S)  AMOUNT OF WATER HYACINTH AVAILABLE IN
THE PLACE OF SOURCE
/
1      6887903
2      4648569
3      14737052
4      8908355
5      6961374
6      2308213
7      26315167.62
/,
    ZWH(S)     EFFICIENCY TO EXTRACT BIOMASS FROM THE
WATER HYACINTH AT I
/
1*7    0.076
/,
    ZW(S)      EFFICIENCY TO EXTRACT WATER FROM THE WATER
HYACINTH AT I
/
1*7    0.75
/,
    ALPHAHUB(J,P)  EFFICIENCY FACTOR IN THE HUB I FOR
THE CONVERSION OF DRY BIOMASS BY TECH J TO PRODUCT P
/
1.1    0.19

```



|  |       |                                    |              |           |  |
|--|-------|------------------------------------|--------------|-----------|--|
| 1*7.9.1  | 5E-7  |                                    | 4.1          | 5e5       |  |
| 1*7.10.1   | 5E-7  |                                    | 5.1          | 3.2E6     |  |
| 1*7.11.1   | 5E-7  |                                    | 6.1          | 3.2E6     |  |
| 1*7.12.1   | 10E-7 |                                    | 7.1          | 3.2E6     |  |
| /,   |       |                                    | /,           |           |  |
| ZWIN(S,C)  |       | INLET COMPOSITION OF THE POLLUTANT |              |           | FWTMIN(S,N,Q) MINIMAL LIMIT FOR THE AMOUNT OF  |
| C IN SOURCE S  |       |                                    |              |           | PROCESSED WATER IN THE WATER TREATMENT UNITS   |
| /  |       |                                    |              |           | /  |
| 1*7.1  | 10E-6 |                                    |              | 1*7.1*3.1 | 1E-5   |
| /,   |       |                                    |              | /,        |  |
| ZWOUT(S,N,C)   |       | OULET COMPOSITION OF THE POLLUTANT |              |           | FWTMAX(S,N,Q) MAXIMUM LIMIT FOR THE AMOUNT OF  |
| C TO THE WATER TREATMENT TECHNOLOGIES N IN SOURCE S, |       |                                    |              |           | PROCESSED BIOMASS IN THE WATER TREATMENT UNITS |
| /  |       |                                    |              |           | /  |
|  |       |                                    |              | 1*7.1*3.1 | 5e6  |
| /,   |       |                                    |              | /,        |  |
| HWMAX(S,M)   |       | MAXIMUM WATER DEMAND IN THE        |              |           |  |
| CONSUMERS M  |       |                                    |              |           | BPRODUCT(P) UNIT COST FOR THE PRODUCT          |
| /  |       |                                    |              |           | /  |
| *M^3 PER YEAR  |       |                                    | 1            | 796.82    |  |
| 1*7.1  | 141E6 |                                    | 2            | 527.49    |  |
| 1*7.2  | 23E6  |                                    | 3            | 600       |  |
| 1*7.3  | 496E6 |                                    | 4            | 280       |  |
| 1*7.4  | 104E6 |                                    | 5            | 480.33    |  |
| 1*7.5  | 186E6 |                                    | 6            | 11.47     |  |
| 1*7.6  | 17E6  |                                    | /,           |           |  |
| 1*7.7  | 91E6  |                                    |              |           | BWATER(M) UNIT COST FOR THE WATER              |
| 1*7.8  | 36E6  |                                    | /            |           | /  |
| 1*7.9  | 61E6  |                                    | 1*12         | 0.49      |  |
| 1*7.10   | 14E6  |                                    | /,           |           |  |
| 1*7.11   | 5E6   |                                    |              |           | BHARV(S) UNIT HARVESTING COST FOR              |
| 1*7.12   | 14E6  |                                    |              |           | EACH LOCATION S                                |
| /,   |       |                                    | /            |           | /  |
| FBHUBMIN(I,J,Q)                                      |       | MINIMAL LIMITS FOR THE AMOUNT OF   | 1*7          | 0.406     |  |
| PROCESSED BIOMASS IN THE HUBS                        |       |                                    |              |           | *duplicated 0.203                              |
| /  |       |                                    | /,           |           |  |
| 1*10.1*7.1   | 1E-5  |                                    |              |           | BWUTTRANSP(S,N) UNTREATED WATER UNIT COST      |
| /,   |       |                                    | /            |           | /  |
| FBHUBMAX(I,J,Q)                                      |       | MAXIMUM LIMITS FOR THE AMOUNT OF   | 1*6.1*4      | 1.63      |  |
| PROCESSED BIOMASS IN THE HUBS                        |       |                                    |              |           | *DOLLAR PER M^3 OR TONNE                       |
| /  |       |                                    | /,           |           |  |
| 1*10.1.1   | 6.5E4 |                                    |              |           | BWTTRANSP(S,N,M) TREATED WATER UNIT COST       |
| 1*10.2.1   | 6.5E4 |                                    | /            |           | /  |
| 1*10.3.1   | 15e4  |                                    | 1*6.1*4.1*12 | 1.63      |  |
| 1*10.4.1   | 15e4  |                                    | /,           |           |  |
| 1*10.5.1   | 6.2E5 |                                    |              |           | BBHUBTRANSP(S,I) UNIT TRANSPORTATION COST      |
| 1*10.6.1   | 9.2E5 |                                    |              |           | OF BIOMASS FROM THE SOURCE TO THE HUBS         |
| 1*10.7.1   | 9.2E5 |                                    | /            |           | /  |
| /,   |       |                                    |              |           | *FROM CHAPALA                                  |
| WCENMIN(J,Q)   |       | MINIMAL LIMIT FOR THE AMOUNT OF    | 1.1          | 22.44     |  |
| PROCESSED BIOMAS                                     |       |                                    | 1.2          | 43.85     |  |
| /  |       |                                    | 1.3          | 19.99     |  |
| 1.1  | 2.5E4 |                                    | 1.4          | 28.36     |  |
| 2.1  | 2.5E4 |                                    | 1.5          | 23.62     |  |
| 3.1  | 5e4   |                                    | 1.6          | 12.01     |  |
| 4.1  | 5e4   |                                    | 1.7          | 20.62     |  |
| 5.1  | 3.2E5 |                                    | 1.8          | 23.78     |  |
| 6.1  | 3.2E5 |                                    | 1.9          | 21.49     |  |
| 7.1  | 3.2E5 |                                    | 1.10         | 16.91     |  |
| /,   |       |                                    |              |           |  |
| WCENMAX(J,Q)   |       | MAXIMUM LIMIT FOR THE AMOUNT OF    |              |           | *FROM PATZCUARO                                |
| PROCESSED BIOMASS IN THE CENTRALIZER                 |       |                                    | 2.1          | 4.66      |  |
| /  |       |                                    | 2.2          | 20.78     |  |
| 1.1  | 2.5E5 |                                    | 2.3          | 20.46     |  |
| 2.1  | 2.5E5 |                                    | 2.4          | 19.28     |  |
| 3.1  | 5e5   |                                    | 2.5          | 15.33     |  |

|                            |       |                  |             |  |                             |
|----------------------------|-------|------------------|-------------|--|-----------------------------|
| 2.6                        | 10.43 | 7.10             | 20.46       |  |                             |
| 2.7                        | 4.50  |                  |             |  |                             |
| 2.8                        | 9.24  |                  |             |  |                             |
| 2.9                        | 6.95  | /,               |             |  |                             |
| 2.10                       | 5.14  |                  |             | BBCENTRANSP(S)   | UNIT TRANSPORTATION COST OF |
|                            |       |                  |             | BIOMASS FROM THE SPURCE TO THE CENTRALIZER               |                             |
|                            |       | /                |             |  |                             |
| *FROM CUITZEO              |       | 1                | 3.79        |  |                             |
| 3.1                        | 2.69  | 2                | 22.28       |  |                             |
| 3.2                        | 26.94 | 3                | 21.73       |  |                             |
| 3.3                        | 14.06 | 4                | 24.17       |  |                             |
| 3.4                        | 12.72 | 5                | 8.77        |  |                             |
| 3.5                        | 8.61  | 6                | 8.77        |  |                             |
| 3.6                        | 12.56 | 7                | 34.29       |  |                             |
| 3.7                        | 11.14 | /,               |             |  |                             |
| 3.8                        | 2.37  |                  |             | BHUBPRODT(I,J,P,K)                                       | UNIT TRANSPORTATION COST OF |
| 3.9                        | 0.08  |                  |             | PRODUCT FROM THE HUBS                                    |                             |
| 3.10                       | 7.82  | /                |             |  |                             |
|                            |       | 1*10.1*7.1*6.1*6 | 5           |  |                             |
|                            |       | /,               |             |  |                             |
|                            |       |                  |             | ECENPRODT(J,P,K)   | UNIT TRANSPORTATION COST OF |
| *FROM YURIRIA              |       |                  |             | PRODUCT FROM THE CENTRALIZER                             |                             |
| 4.1                        | 5.06  | /                |             |  |                             |
| 4.2                        | 29.86 | 1*7.1*6.1*6      | 5           |  |                             |
| 4.3                        | 11.46 | /,               |             |  |                             |
| 4.4                        | 10.98 |                  |             | BHUBOP(J)  | UNIT COST ASSOCIATED TO THE |
| 4.5                        | 5.29  |                  |             | HUB I BY THE ROUTE J                                     |                             |
| 4.6                        | 14.85 | /                |             |  |                             |
| 4.7                        | 13.59 | 1                | 104.52      |  |                             |
| 4.8                        | 0.08  | 2                | 130.65      |  |                             |
| 4.9                        | 2.37  | 3                | 28.72541348 |  |                             |
| 4.10                       | 10.27 | 4                | 20.46875    |  |                             |
|                            |       | 5                | 28.7254134  |  |                             |
|                            |       | 6                | 24.5625     |  |                             |
|                            |       | /,               |             |  |                             |
| *FROM SAYULA               |       |                  |             | BCENOP(J)  | UNIT COST ASSOCIATED TO THE |
| 5.1                        | 31.13 |                  |             | ROUTE J IN THE CANTRALIZER                               |                             |
| 5.2                        | 33.73 | /                |             |  |                             |
| 5.3                        | 25.99 | 1                | 83.616      |  |                             |
| 5.4                        | 36.02 | 2                | 104.52      |  |                             |
| 5.5                        | 32.79 | 3                | 22.98033078 |  |                             |
| 5.6                        | 16.04 | 4                | 16.375      |  |                             |
| 5.7                        | 24.02 | 5                | 22.98033078 |  |                             |
| 5.8                        | 32.23 | 6                | 19.65       |  |                             |
| 5.9                        | 29.94 | /,               |             |  |                             |
| 5.10                       | 25.36 |                  |             | BWTOP(S,N)   | UNIT COST ASSOCIATED TO THE |
|                            |       |                  |             | WATER TREATMENT  |                             |
|                            |       | /                |             |  |                             |
|                            |       | 1*7.1*3          | 5           |  |                             |
|                            |       | *supossed        |             |  |                             |
|                            |       | /,               |             |  |                             |
|                            |       |                  |             | AHUB(I,J,Q)  | VALOR TOMADO PARA EL COSTO  |
| *FROM ATOTONILCO           |       |                  |             | FIJO DEL COSTO DE CAPITAL EN LOS HUBS DEPENDIENDO DE LOS |                             |
| 6.1                        | 23.46 |                  |             | LIMITES CONSIDERADOS                                     |                             |
| 6.2                        | 37.60 | /                |             |  |                             |
| 6.3                        | 25.99 | 1*10.1.1         | 10252000    |  |                             |
| 6.4                        | 28.28 | 1*10.2.1         | 10252000    |  |                             |
| 6.5                        | 25.04 | 1*10.3.1         | 2254060     |  |                             |
| 6.6                        | 11.30 | 1*10.4.1         | 131000000   |  |                             |
| 6.7                        | 19.28 | 1*10.5.1         | 2254060     |  |                             |
| 6.8                        | 24.89 | 1*10.6.1         | 157200000   |  |                             |
| 6.9                        | 22.44 | /,               |             |  |                             |
| 6.10                       | 18.01 |                  |             |  |                             |
|                            |       |                  |             |  |                             |
| *FROM BALSAS (INFIERNILLO) |       |                  |             |  |                             |
| 7.1                        | 19.75 |                  |             |  |                             |
| 7.2                        | 5.29  |                  |             |  |                             |
| 7.3                        | 36.02 |                  |             |  |                             |
| 7.4                        | 34.68 |                  |             |  |                             |
| 7.5                        | 30.73 |                  |             |  |                             |
| 7.6                        | 21.33 |                  |             |  |                             |
| 7.7                        | 13.27 |                  |             |  |                             |
| 7.8                        | 24.81 |                  |             |  |                             |
| 7.9                        | 22.36 | /,               |             |  |                             |



|   |   |                      |   |
|---|---|----------------------|---|
| SALESPROD   | TOTAL SALES CORRESPOND TO                 | BMSWT(S,N)           | MASS BALANCE FOR THE SPLITTERS AFTER THE    |
| THE SALES FOR THE PRODUCTS,                                 |   | WATER TREATMENT,     |   |
| PROFIT  | TOTAL NET PROFIT FOR THE                  | BMIXCONS(S,M)        | MASS BALANCE FOR THE MIXERS BEFORE EACH     |
| OVERALL SYSTEM,   |   | WATER CONSUMER,      |   |
| DAHUB(I,J,Q)  | DISGREGADO DEL VALOR PARA COSTO           |                      |   |
| FIJO EN LA DISYUNCIÓN,                                      |   | *****                |   |
| DBHUB(I,J,Q)  | DISGREGADO DEL VALOR PARA COSTO           | *****                |   |
| VARIABLE EN LA DISYUNCIÓN,                                  |   | *****                |   |
| DFBHUB(I,J,Q)   | DISGREGADO PARA FLUJO DE BIOMASA AL       | *****                |   |
| HUB,  |   | *****                |   |
| DFECEN(J,Q)   | FDFD,                                     | BCMIXCONS1(S,M,C)    | COMPONENT BALANCE FOR THE MIXERS BEFORE     |
| DACEN(J,Q)  | FDFDF,                                    | EACH WATER CONSUMER, |   |
| DBCEN(J,Q)  | FDFDFDFDFDF,                              | *****                |   |
| DAWT(S,N,Q)   | DISGREGADO DEL VALOR PARA COSTO           | *****                |   |
| FIJO EN LA DISYUNCIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA,            |   | *****                |   |
| DBWT(S,N,Q)   | DISGREGADO DEL VALOR PARA COSTO           |                      |   |
| VARIABLE EN LA DISYUNCIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA,        |   | DWCONS(S,M)          | DEMAND FOR WATER CONSUMERS,                 |
| DFBWT(S,N,Q)  | DISGREGADO PARA FLUJO DE BIOMASA AL       | CONSTWQC(S,M,C)      | CONSTRAINT FOR THE WATER QUALITY FOR EACH   |
| HUB EN LA DISYUNCIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUA,             |   | CONSUMER,            |   |
| CONSUME   | PERCENTAGE OF CONSUMED WATER              |                      |   |
| HYACINTH;   |   | OPERAHUB(I,J)        | OPERATIONAL COST FOR THE HUBS,              |
| *****   |   | CAPHUB(I,J)          | CAPITAL COST FOR THE HUBS,                  |
| *****BINARY VARIABLES*****                                  |   | BIN1(I,J)            | RELATION BINARY FOR OPERATIONAL COST,       |
| *****   |   | DISGRF1(I,J)         | DISGREGATION FOR THE FLOWS,                 |
| BINARY VARIABLES  |   | DISGRA1(I,J)         | DISGREGATION FOR THE COST FIXED,            |
| YHUB(I,J,Q)   | BINARY VARIABLE TO DECIDE                 | DISGRB1(I,J)         | DISGREGATION FOR THE VARIABLE COST,         |
| WHAT ECONOMY OF SCALE IS USED,                              |   | LIMITMINF1(I,J,Q)    | LIMITS FOR THE FLOWS,                       |
| YCEN(J,Q)   | BINARY VARIABLE TO DECIDE                 | LIMITMAXF1(I,J,Q)    | LIMITS FOR THE FLOWS,                       |
| WHAT ECONOMY OF SCALE IS USED IN THE CENTRALIZER,           |   | ASIG1(I,J,Q)         | TO ASIGNE THE FIXED COST,                   |
| YWT(S,N,Q)  | BINARY VARIABLE TO DECIDE                 | ASIGB1(I,J,Q)        | TO ASIGNE THE VARIABLE COST,                |
| WHAT ECONOMY OF SCALE IS USED IN THE WATER TREATMENT UNITS; |   |                      |   |
| *****   |   | OPERACEN(J)          | OPERATIONAL COST FOR THE CENT,              |
| *****EQUATIONS*****   |   | CAPCEN(J)            | CAPITAL COST FOR THE CENT,                  |
| *****   |   | BIN2(J)              | RELATION BINARY FOR OPERATIONAL COST,       |
| EQUATIONS   |   | DISGRF2(J)           | DISGREGATION FOR THE FLOWS,                 |
| MAXBIOMASS(S)   | LIMIT FOR THE EXTRACTED,                  | DISGRA2(J)           | DISGREGATION FOR THE COST FIXED,            |
| BMHB(S)   | MASS BALANCE FOR THE HARVESTING OF WATER  | DISGRB2(J)           | DISGREGATION FOR THE VARIABLE COST,         |
| HYACINTH BIOMASS,   |   | LIMITMINF2(J,Q)      | MINIMUM LIMITS FOR THE FLOWS,               |
| BMHW(S)   | MASS BALANCE FOR THE HARVESTING OF WATER  | LIMITMAXF2(J,Q)      | MAXIMUM LIMITS FOR THE FLOWS,               |
| HYACINTH WATER,   |   | ASIGA2(J,Q)          | TO ASIGNE THE FIXED COST,                   |
| BMSH(S)   | MASS BALANCE FOR THE SPLITTERS BEFORE THE | ASIGB2(J,Q)          | TO ASIGNE THE VARIABLE COST,                |
| HUBS,   |   |                      |   |
| BMMH(I)   | MASS BALANCE FOR THE MIXERS BEFORE THE    | OPERAWT(S,N)         | OPERATIONAL COST FOR THE CENT,              |
| HUBS,   |   | CAPWT(S,N)           | CAPITAL COST FOR THE CENT,                  |
| BTCHH(I,J,P)  | MASS BALANCE FOR THE TECHNOLOGIES FOR THE | BIN3(S,N)            | RELATION BINARY FOR OPERATIONAL COST,       |
| HUBS,   |   | DISGRF3(S,N)         | DISGREGATION FOR THE FLOWS,                 |
| BMIXC   | MASS BALANCE FOR THE MIXERS BEFORE THE    | DISGRA3(S,N)         | DISGREGATION FOR THE COST FIXED,            |
| CENTRALIZERS,   |   | DISGRB3(S,N)         | DISGREGATION FOR THE VARIABLE COST,         |
| BTCHC(J,P)  | MASS BALANCE FOR THE TECHNOLOGIES FOR THE | LIMITMINF3(S,N,Q)    | MINIMAL LIMITS FOR THE FLOWS,               |
| CENTRALIZERS,   |   | LIMITMAXF3(S,N,Q)    | MAXIMUM LIMITS FOR THE FLOWS,               |
| BSHUB(I,J,P)  | MASS BALANCE FOR THE SPLITTERS AFTER EACH | ASIGA3(S,N,Q)        | TO ASIGNE THE FIXED COST,                   |
| HUBS,   |   | ASIGB3(S,N,Q)        | TO ASIGNE THE VARIABLE COST,                |
| BSCEN(J,P)  | MASS BALANCE FOR THE SPLITTERS AFTER      |                      |   |
| CENTRALIZER,  |   | COST_HARVEST         | TO CALCULATE THE HARVESTING COST,           |
| ECONS(P,K)  | MASS BALANCE FOR THE CONSUMERS,           | WATERTRANSP          | TO CALCULATE THE WATER TRANSPORTATION COST, |
| DCONS(P,K)  | DEMANDS FOR THE CONSUMERS,                | BIOMATRANSP          | TO CALCULATE THE BIOMASS TRANSPORTATION     |
| BMWT(S)   | MASS BALANCE FOR THE WATER TREATMENT IN   | COST,                |   |
| EACH SOURCE,  |   | PRODUTRANSP          | TO CALCULATE THE BIOMASS TRANSPORTATION     |
|   |   | COST,                |   |
|   |   | TOTALOP              | TO CALCULATE THE TOTAL OPERATIONAL COST,    |
|   |   | TOTALCAP             | TO CALCULATE THE TOTAL CAPITAL COST,        |
|   |   | TOTALSAL             | TO CALCULATE THE PROFIT TO SALE THE         |
|   |   | PRODUCTS,            |   |

```

NETPROFIT          THIS IS THE OBJECTIVE FUNCTION FOR THE
MODEL,

PERCENTWH          THIS IS THE PERCENTAGE OF CONSUMED WATER
HYACINTH,

CONSTRAINTCONS    THIS IS  CONTRAINT TO MINIMAL CONSUME;

*****DEVELOPED*****
*****EQUATIONS*****
*****

MAXBIOMASS (S) ..  FWH (S) =L=FWHMAX (S) ;

BMHB (S) ..        FWH (S) *ZWH (S) =E=FB (S) ;

BMHW (S) ..        FWH (S) *ZW (S) =E=FW (S) ;

BMSH (S) ..        FB (S) =E=SUM ( ( I ) , FBHUB (S, I) ) +FBCEN (S) ;

BMMH (I) ..        SUM ( ( S ) , FBHUB (S, I) ) =E=SUM ( ( J ) , FBJHUB (I, J) ) ;

BTCHH (I, J, P) .. FBJHUB (I, J) *ALPHAHUB (J, P) =E=WPRODH (I, J, P) ;

BMIXC ..           SUM ( ( S ) , FBCEN (S) ) =E=SUM ( ( J ) , WBJCEN (J) ) ;

BTCHC (J, P) ..    WBJCEN (J) *ALPHACEN (J, P) =E=WPRODC (J, P) ;

BSHUB (I, J, P) .. WPRODH (I, J, P) =E=SUM ( ( K ) , GPRODH (I, J, P, K) ) ;

BSCEN (J, P) ..    WPRODC (J, P) =E=SUM ( ( K ) , GPRODC (J, P, K) ) ;

BCONS (P, K) ..    SUM ( ( I, J ) , GPRODH (I, J, P, K) ) +SUM ( ( J ) , GPRODC (J, P, K) ) =E=GCON (P, K)
) ;

DCONS (P, K) ..    GCON (P, K) =L=GCONMAX (P, K) ;

BMWT (S) ..        FW (S) =E=SUM ( ( N ) , FWT (S, N) ) ;

BMSWT (S, N) ..    FWT (S, N) =E=SUM ( ( M ) , HW (S, N, M) ) ;

BMIXCONS (S, M) .. SUM ( ( N ) , HW (S, N, M) ) =E=HWTOTAL (S, M) ;

BCMIXCONS1 (S, M, C) ..
SUM ( ( N ) , HW (S, N, M) *ZWOUT (S, N, C) ) =E=HWTOTAL (S, M) *ZWCON (S, M, C) ;

DNCONS (S, M) ..   HWTOTAL (S, M) =L=HWMAX (S, M) ;

CONSTWQC (S, M, C) ..
ZWCON (S, M, C) =L=ZWCONMAX (S, M, C) ;

OPERAHUB (I, J) ..
COSTHUBOP (I, J) =E=FBJHUB (I, J) *BHUBOP (J) ;
CAPHUB (I, J) ..
COSTHUBCAP (I, J) =E=A_HUB (I, J) +BFHUB (I, J) ;
BIN1 (I, J) ..     SUM ( ( Q ) , YHUB (I, J, Q) ) =E=1 ;
DISGRF1 (I, J) ..
FBJHUB (I, J) =E=SUM ( ( Q ) , DFBHUB (I, J, Q) ) ;
DISGRA1 (I, J) ..   A_HUB (I, J) =E=SUM ( ( Q ) , DAHUB (I, J, Q) ) ;
DISGRB1 (I, J) ..   BFHUB (I, J) =E=SUM ( ( Q ) , DBHUB (I, J, Q) ) ;
LIMITMINF1 (I, J, Q) ..
DFBHUB (I, J, Q) =G=FBHUBMIN (I, J, Q) *YHUB (I, J, Q) ;

LIMITMAXF1 (I, J, Q) ..
DFBHUB (I, J, Q) =L=FBHUBMAX (I, J, Q) *YHUB (I, J, Q) ;

ASIGAL (I, J, Q) ..
DAHUB (I, J, Q) =E=AHUB (I, J, Q) *YHUB (I, J, Q) ;
ASIGB1 (I, J, Q) ..
DBHUB (I, J, Q) =E=BHUB (I, J, Q) *DFBHUB (I, J, Q) ;

OPERACEN (J) ..    COSTCENOP (J) =E=WBJCEN (J) *BCENOP (J) ;
CAPCEN (J) ..      COSTCENCAP (J) =E=A_CEN (J) +FBCEN (J) ;
BIN2 (J) ..        SUM ( ( Q ) , YCEN (J, Q) ) =E=1 ;
DISGRF2 (J) ..     WBJCEN (J) =E=SUM ( ( Q ) , DFBFCEN (J, Q) ) ;
DISGRA2 (J) ..     A_CEN (J) =E=SUM ( ( Q ) , DACEN (J, Q) ) ;
DISGRB2 (J) ..     FBCEN (J) =E=SUM ( ( Q ) , DBCEN (J, Q) ) ;
LIMITMINF2 (J, Q) ..
DFBFCEN (J, Q) =G=WBCENMIN (J, Q) *YCEN (J, Q) ;
LIMITMAXF2 (J, Q) ..
DFBFCEN (J, Q) =L=WBCENMAX (J, Q) *YCEN (J, Q) ;
ASIGA2 (J, Q) ..   DACEN (J, Q) =E=ACEN (J, Q) *YCEN (J, Q) ;
ASIGB2 (J, Q) ..   DBCEN (J, Q) =E=BCEN (J, Q) *DFBFCEN (J, Q) ;

OPERAWT (S, N) ..
COSTWTOP (S, N) =E=FWT (S, N) *BWTOP (S, N) ;
CAPWT (S, N) ..
COSTWTCAP (S, N) =E=A_WT (S, N) +BFWT (S, N) ;
BIN3 (S, N) ..    SUM ( ( Q ) , YWT (S, N, Q) ) =E=1 ;
DISGRF3 (S, N) .. FWT (S, N) =E=SUM ( ( Q ) , DFBWT (S, N, Q) ) ;
DISGRA3 (S, N) .. A_WT (S, N) =E=SUM ( ( Q ) , DAWT (S, N, Q) ) ;
DISGRB3 (S, N) .. BFWT (S, N) =E=SUM ( ( Q ) , DBWT (S, N, Q) ) ;
LIMITMINF3 (S, N, Q) ..
DFBWT (S, N, Q) =G=FWTMIN (S, N, Q) *YWT (S, N, Q) ;
LIMITMAXF3 (S, N, Q) ..
DFBWT (S, N, Q) =L=FWTMAX (S, N, Q) *YWT (S, N, Q) ;
ASIGA3 (S, N, Q) ..
DAWT (S, N, Q) =E=AWT (S, N, Q) *YWT (S, N, Q) ;
ASIGB3 (S, N, Q) ..
DBWT (S, N, Q) =E=BWT (S, N, Q) *DFBWT (S, N, Q) ;

COST_HARVEST ..   COSTHARVEST =E=SUM ( ( S ) , FWH (S) *BHARV (S) ) ;
WATERTRANS ..
COSTTRANSWATER =E=SUM ( ( S, N ) , FWT (S, N) *BWUTTRANS (S, N) ) +SUM ( ( S,
N, M ) , HW (S, N, M) *BWTTRANS (S, N, M) ) ;
BIOMATRANS ..
COSTTRANSBM =E=SUM ( ( S, I ) , FBHUB (S, I) *BBHUBTRANS (S, I) ) +SUM ( ( S
, FBCEN (S) *BBCENTRANS (S) ) ;
PRODUTRANS ..
COSTTRANSPROD =E=SUM ( ( I, J, P, K ) , GPRODH (I, J, P, K) *BHUBPROD (I, J,
P, K) ) +SUM ( ( J, P, K ) , GPRODC (J, P, K) *BCENPROD (J, P, K) ) ;

TOTALOP ..
COSTOPERATIONAL =E=SUM ( ( S, N ) , COSTWTOP (S, N) ) +SUM ( ( J ) , COSTCENOP
(J) ) +SUM ( ( I, J ) , COSTHUBOP (I, J) ) ;
TOTALCAP ..
COSTCAPITAL =E=SUM ( ( S, N ) , COSTWTCAP (S, N) ) +SUM ( ( I, J ) , COSTHUBCAP
(I, J) ) +SUM ( ( J ) , COSTCENCAP (J) ) ;
TOTALSAL ..
SALESPROD =E=SUM ( ( P, K ) , GCON (P, K) *BPRODUCT (P) ) +SUM ( ( S, M ) , HWTOT
AL (S, M) *BWATER (M) ) ;

NETPROFIT ..      PROFIT =E=SALESPROD -COSTHARVEST -
COSTTRANSWATER -COSTTRANSBM -COSTTRANSPROD -COSTOPERATIONAL -
COSTCAPITAL +10*SUM ( ( S ) , FWH (S) ) ;

```

```

PERCENTWH..
CONSUME=E=100*SUM((S),FWH(S))/SUM((S),FWHMAX(S));

CONSTRAINTCONS.. CONSUME=G=PERCENT;

*****SOLUTION*****
*****MODEL*****
*****

MODEL                                WATERHYACINTHL
/MAXBIO MASS, BMHB, BMHW, BMSH, BMMH, BTCHH, BMIXC, BTCHC, BSHUB, BSCE
N,

BCONS, DCONS, BMWT, BMSWT, BMIXCONS, DWCONS, CONSTWQC, OPERAHUB, CAP
HUB,

BIN1, DISGRF1, DISGRA1, DISGRB1, LIMITMINF1, LIMITMAXF1, ASIGA1, AS
IGB1,

OPERACEN, CAPCEN, BIN2, DISGRF2, DISGRA2, DISGRB2, LIMITMINF2, LIMI
TMAXF2,

ASIGA2, ASIGB2, OPERAWT, CAPWT, BIN3, DISGRF3, DISGRA3, DISGRB3, LIM
ITMINF3,

LIMITMAXF3, ASIGA3, ASIGB3, COST_HARVEST, WATERTRANSP, BIOMATRANS
P,

PRODUTRANSP, TOTALOP, TOTALCAP, TOTALSAL, NETPROFIT, PERCENTWH, CO
NSTRAINTCONS/;
MODEL WATERHYACINTH /ALL/;

*$ONTEXT
OPTION MINLP = BARON;
OPTION NLP = CONOPT;
OPTION MIP = CPLEX;
*$OFFTEXT

*****
*****AUXILIARS PARAMETERS*****
*****

*1.- DICOPT
*2.- BARON

PARAMETERS

PLANTAS(I,J)      PRODUCTION IN SECONDARY PLANTS,
CENTRAL(J)        PRODUCTION IN MAIN PLANT,
CONS(S)           CONSUMING OG WATER HYACINTH FROM SOURCES,
DEMAND(P,K)       UNMET DEMAND OF PRODUCT P IN PRODUCT
CONSUMER K,
DEMANDW(M)        UNMET DEMAND OF WATER IN WATER CONSUMER
M,
RESOLVEDOR        DICE CUAL RESOLVEDOR SE UTILIZO;
PERCENT=0;
WHILE ((PERCENT LE 60),
OPTION MIP=CPLEX;
SOLVE WATERHYACINTHL USING MIP MAXIMAZED PROFIT;
OPTION RMINLP=SNOPT;
SOLVE WATERHYACINTH USING RMINLP MAXIMAZED PROFIT;

FWH.L(S)=3*FWH.L(S);
YHUB.L(I,J,'1')=1;
YCEN.L(J,'1')=1;
YWT.L(S,N,'1')=1;
OPTION MINLP=DICOPT;
SOLVE WATERHYACINTH USING MINLP MAXIMAZED PROFIT;

PLANTAS(I,J)=100*FBJHUB.L(I,J)/SUM((Q),FBHUBMAX(I,J,Q));
CENTRAL(J)=100*WBJCEN.L(J)/SUM((Q),WBCENMAX(J,Q));
CONS(S)=100*FWH.L(S)/FWHMAX(S);
DEMAND(P,K)=100*GCON.L(P,K)/GCONMAX(P,K);

DEMANDW(M)=100*SUM((S),HWTOTAL.L(S,M))/SUM((S),HWMAX(S,M));

DISPLAY PERCENT, PROFIT.L, PLANTAS, CENTRAL, CONS,
DEMAND, DEMANDW;

PERCENT=PERCENT+2;

);

```