



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**INSTALACIÓN ÓPTIMA DE COMPLEJOS INDUSTRIALES
CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES**

TESIS presentada por:

IQ. DULCE CELESTE LÓPEZ DÍAZ

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.C. José María Ponce Ortega

Co-Asesor: Dr.C. Eusiel Rubio Castro

Morelia, Michoacán, México

Febrero 2016

Resumen

INSTALACIÓN ÓPTIMA DE COMPLEJOS INDUSTRIALES CONSIDERANDO ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES

Por: IQ. Dulce Celeste López Díaz

Febrero 2016

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr.C. José María Ponce Ortega y Dr.C Eusiel Rubio Castro

A lo largo del desarrollo industrial, la gran demanda de recursos y la contaminación que propicia este sector ha generado una enorme problemática actual, con ello ha surgido la necesidad del aprovechamiento óptimo de los recursos naturales y mitigar la contaminación que ha generado numerosas afectaciones a las cuencas hídricas alrededor del mundo. En este proyecto de investigación se aborda el desarrollo de dos modelos matemáticos basados en programación matemática. En el primer modelo se considera la integración másica de parques eco-industriales mediante el reuso y reciclaje de corrientes de proceso para la reconfiguración de la red de distribución de agua en plantas industriales permitiendo un uso más eficiente del recurso, a su vez se considera el comportamiento de la trayectoria de los contaminantes descargados al ambiente mediante la implementación de la técnica de MFA (*Material Flow Analysis*), el cual incluye el análisis de los procesos físicos (evaporación, filtración) y químicos (reacción química debido a la degradación natural de los contaminantes) a lo largo de la cuenca hidrológica en balances globales de materia incluyendo la interacción con otras descargas o extracciones procedentes de actividades humanas que tienen lugar a lo largo del sistema hidrológico de análisis (industriales, domésticas, etc.) para cuantificar el impacto ambiental asociado a la instalación de estos complejos industriales. En tanto que en el segundo modelo, la técnica MFA aporta un análisis ambiental tal que permite establecer la repercusión ambiental en la instalación óptima de un sistema de biorefinerías para satisfacer los grandes requerimientos de agua aunados a la actividad industrial y agrícola inminente en la producción de biocombustibles.

En ambos modelos desarrollados en la presente tesis el objetivo es determinar la localización óptima en términos ambientales y económicos de los sistemas industriales (parques eco-industriales y sistema de biorefinerías) con la finalidad de aproximar los sistemas industriales a la sustentabilidad.

Palabras Clave: Parques eco-industriales, Biorefinerías, Integración másica, MFA, Optimización.

Abstract

Optimal location of industrial complexes involving economic and environmental aspects

By: Ch.E. Dulce Celeste López Díaz

February 2016

Master in Sciences in Chemical Engineering

Supervised by: PhD. José María Ponce Ortega and PhD. Eusiel Rubio Castro

Through the industrial development, the great demand of resources and generated pollution that sector yields have generated and enormous problem, and this has promoted the development of proper methodologies for the optimal use of natural resources and to mitigate the pollution of watersheds. In this project there are presented two mathematical programming models. The first one considers the mass integration in eco-industrial parks through the recycling and reusing of process streams to reconfigure the water network and considering the tracking of pollutants through the surrounding watershed, which includes physical (evaporation and filtration) and chemical processes (chemical reactions to model the pollutant degradation) through the watershed accounting for the global balances to quantify the environmental impact due to the installation of these industrial complexes. In the second model, it is used this methodology to analyze the environmental impact due to the installation of biorefineries to satisfy the biofuel demands due to the great demand of fresh water for the industrial and agricultural activities associated. The objective in both models is to determine the optimal location of the industrial plants (eco-industrial parks and biorefineries) with respect to the existing industrial plants through a watershed at the minimum cost and with the minimum environmental impact to yield sustainable processes.

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a:

A Mi madre *Gloria Esther Díaz Álvarez*

Que gracias a su esfuerzo, consejos y apoyo incondicional me permitieron ser la persona que soy hoy, siempre motivándome a continuar con mis estudios para llegar a ser cada vez mejor.

Mi padre *Salvador Lopez Córdova*

Por su cariño y por ser una persona muy importante en la vida de la que aprendido muchas cosas.

A mi hermana *Reyna Elizabeth López Díaz*

Por estar siempre a mi lado y ser además de una hermana la mejor amiga para mí.

A mi hermano *Fernando Alexis López Díaz*

Por ser una gran fuerza que motivarme a ser dar el mejor de los ejemplos.

En general a toda mi familia y amigos que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme, motivarme y siempre apoyarme en los momentos difíciles, así como acompañarme en los mejores momentos.

Contenido

Índice de tablas	viii
Índice de Figuras	ix
Nomenclatura.....	xi
Agradecimientos	xxiv
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3 Justificación	3
1.4 Antecedentes	4
1.5 Alcance	6
1.6 Hipótesis	7
Capítulo II. Marco teórico	8
2.1 Integración másica en la reconfiguración de redes de distribución en la conformación de parques eco-industriales.....	11
2.2 Integración másica aplicada a la distribución óptima de un sistema de biorefinerías.	13
2.3 Modelo MFA (<i>Material Flow Analysis</i>).	16
Capítulo III. Metodología	17
3.1 Formulación del modelo para óptima localización de parques eco-industriales onsiderando la interacción con el medio ambiente.	18
3.1.1 Reconfiguración de redes de intercambio de agua en parques eco-industriales.	19
3.1.2 Análisis ambiental empleando la técnica de MFA (<i>Material Flow Analysis</i>) para el sistema de parques eco-industriales.	25

3.2 Formulación del modelo para óptima localización de un sistema de biorefinerías considerando aspectos económicos y ambientales.	29
3.2.1 Análisis del impacto ambiental por la instalación óptima de biorefinerías.....	30
3.2.2 Operación de biorefinerías	34
Capítulo IV. Resultados.....	42
4.1 Análisis de resultados en el reajuste de redes de agua en parques eco-industriales considerando la trayectoria de los contaminantes.....	42
4.2 Análisis de resultados obtenidos a partir del modelo propuesto para la instalación óptima de un sistema de biorefinerías sustentable.	52
Conclusiones.....	60
Bibliografía.....	62
Apéndices	69
Apéndice A. Configuraciones de parques eco-industriales.	69
Apéndice B. Datos agrícolas empleados en el modelo matemático para la instalación de un sistema de biorefinerías.	73

Índice de tablas

Tabla	Nombre de la Tabla	Página
4.1	Especificaciones de las plantas industriales en el caso de estudio	47
4.2	Demanda estimada de biocombustibles por los consumidores en el mercado	54
a	Rendimiento de los cultivos para la producción de bioetanol	73
b	Rendimiento de los cultivos para la producción de biodiesel	73
c	Rendimiento de los cultivos para la producción de biomasa	73
d	Rendimiento en la producción de granos	74
e	Factor de conversión para la demanda de agua necesaria en la producción de biomasa	74
f	Costo unitario para la biomasa para cada tipo de cultivo	74
g	Costo unitario para la producción de granos	75

Índice de Figuras

Figura	Nombre de la Figura	Página
2.1	Diagrama de proceso con recicló y reuso de corrientes	10
2.2	Configuración general de un parque eco-industrial	11
2.3	Superestructura para redes de distribución de agua en un parque eco-industrial	13
2.4	Concepto de una biorefinería	14
2.5	Esquema de la metodología MFA (<i>Material Flow Analysis</i>)	16
3.1	Metodología propuesta para el proyecto de investigación	17
3.2	Superestructura para la conformación de parques eco-industriales considerando la interacción con el medio ambiente	18
3.3	Superestructura para la localización óptima de biorefinerías considerando la interacción con la cuenca hidrológica	29
4.1	Cuenca del Río Balsas	44
4.2	Localización de las plantas industriales del caso de estudio	46
4.3	Grafica Pareto para el escenario 1	48
4.4	Gráfica Pareto para el escenario 2	49
4.5	Gráfica Pareto para el escenario 3	50
4.6	Representación del escenario 4 (instalación de 4 parques eco-industriales)	51

4.7	Área potencial para especies de cultivo aptas para la producción de biocombustibles en México	52
4.8	Solución óptima para la distribución de un sistema de biorefinerías	55
4.9	Distribución de bioetanol desde las biorefinerías a los consumidores	56
4.10	Distribución de biodiesel desde las biorefinerías a los consumidores	56
4.11	Porcentaje de abastecimiento de demanda de biocombustibles por el sistema de biorefinerías	57
4.12	Distribución de biomasa cultivada en los campos a lo largo de la cuenca hidrológica	58
4.13	Distribución de biomasa cultivada en los campos a lo largo de la cuenca hidrológica	59
A	Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 1	69
B	Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 2	70
C	Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 3	71
D	Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 4	72

Nomenclatura

A continuación, se describen la nomenclatura que se emplea durante el desarrollo de los modelos desarrollados en esta tesis.

Instalación óptima de parques eco-industriales

$A_{r,t}$	Área cultivada asociada al tributario t en el tramo de río r , ha
C	Conjunto de contaminantes $\{c \mid c=1, \dots, Nc\}$
$CD_{c,r}$	Concentración del contaminante c por descarga directa al tramo de río r , ppm
$CD_{c,r,t}$	Concentración del contaminante c en las descargas de origen agrícola en el tributario t del tramo de río r , ppm
$CEP_{c,p}$	Concentración del contaminante c en las descargas desde el parque eco-industrial p después de la reconfiguración, ppm
$CH_{c,r}$	Concentración del componente c en las descargas totales en el tramo de río r , ppm
$CI_{c,r,t}$	Concentración del contaminante c para las descargas industriales en el tributario t del tramo de río r , ppm
$CIP_{c,p}$	Concentración del contaminante c para las descargas del parque p antes de la reconfiguración, ppm
$ci_{c,int,p}^{in}$	Concentración que entra del componente c en el interceptor int para el parque industrial p , ppm

$ci_{c,int,p}^{out}$	Concentración a la salida del componente c en el interceptor int para el parque industrial p , ppm
$cim_{c,int,p}$	Carga removida del componente c en el interceptor int para el parque industrial p , g/s
$CL_{c,r}$	Concentración del componente c de las pérdidas totales en el tramo de río r , ppm
$CL_{c,r,t}$	Concentración del componente c para las pérdidas en el tributario t del tramo de río r , ppm
$CP_{c,r}$	Concentración del componente c para la precipitación que se descarga en el tramo de río r , ppm
$CP_{c,r,t}$	Concentración del componente c para la precipitación que se descarga en el tributario t del tramo de río r , ppm
c_{pp}	Parámetro para el costo de capital por tuberías en la reconfiguración de los parques industriales
$CQ_{c,r}$	Concentración del componente c en el tramo de río r , ppm
$CS_{c,i,p}$	Concentración del componente c en la corriente de proceso i en el parque industrial p , ppm
$CS_{l,r,t}^{treated}$	Concentración del componente c para la descarga de efluentes residuales tratados en el tributario t del tramo de río r , ppm
$CS_{c,r,t}^{untreated}$	Concentración del componente c para la descarga de efluente residual sin tratamiento al tributario t del tramo de río r , ppm
$CT_{c,r,t}$	Concentración del componente c para el flujo que es descargado desde el tributario t al tramo de río r , ppm
$CU_{c,r}$	Concentración del componente c del agua usada desde el tramo de río r , ppm
$CU_{c,r,t}$	Concentración del componente c del agua usada desde el tributario t del tramo de río r , ppm

$cu_{c,j,p}$	Concentración del componente c para el <i>sink</i> j en el parque industrial p , ppm
$CUM_{c,int}$	Costo unitario por remover al componente c en el interceptor int , US\$/kg
CU	Costo unitario por tubería, US\$
CU_{int}	Costo unitario de interceptor int , US\$
CU_w	Costo unitario por agua fresca w , US\$/m ³
$cw_{c,w,p}$	Concentración del componente c para la corriente de agua fresca w en el parque p , ppm
D	Longitud de segmento de tubería, m
D_r	Descargas directas al tramo de río r , m ³ /s
$D_{r,t}$	Descargas de origen agrícola en el tributario t del tramo r , m ³ /s
Dsh	Factor de conversión para cambiar de segundos a horas, 3600 s/h
EP_p	Descargas que vienen desde los parques eco-industriales p después de la reconfiguración, m ³ /s
EOF	Función objetivo ambiental, ppm
$FT_{r,t}$	Descargas desde el tributario t al tramo r , m ³ /s
$fie_{int,p}$	Flujo enviado desde el interceptor int a la cuenca hidrológica del parque p , m ³ /s
$FI_{int,p}$	Flujo en el interceptor int del parque p , m ³ /s
$fii_{int,p}$	Flujo interno para el interceptor int del parque p , m ³ /s

$fis_{int,j,p}$	Flujo enviado desde el interceptor <i>int</i> al <i>sink j</i> en el parque <i>p</i> , m ³ /s
$FS_{i,p}$	Flujo de la corriente de proceso <i>i</i> en el parque <i>p</i> , m ³ /s
FU_j	Flujo entrante al requerimiento de proceso <i>j</i> en el parque <i>p</i> , ton/h
$fse_{i,p}$	Flujo de la corriente de proceso <i>i</i> que se descarga al medio ambiente en el <i>p</i> , m ³ /s
$fsi_{i,int,p}$	Flujo enviado en la corriente de proceso <i>i</i> al interceptor <i>int</i> en el parque <i>p</i> , m ³ /s
$fss_{i,j,p}$	Flujo enviado directamente en la corriente de proceso <i>i</i> hacia el requerimiento de proceso <i>j</i> en el parque <i>p</i> , m ³ /s
FWC	Costo por agua fresca, US\$/año
$fws_{w,j,p}$	Flujo de agua fresca <i>w</i> que se envía al <i>sink j</i> en el parque <i>p</i> , m ³ /s
H_r	Descarga total (industrial, residencial, etc.) al tramo de río <i>r</i> , m ³ /s
H_Y	Horas anuales trabajadas, h/año
I	Conjunto de corrientes de procesos $\{i \mid i=1, \dots, Ni\}$
$I_{r,t}$	Corriente industrial descargada hacia la tributaria <i>t</i> del tramo de río <i>r</i> , m ³ /s
INT	Conjunto de interceptores $\{int \mid int=1, \dots, Nint\}$
IP_p	Descargas que vienen desde el parque industrial <i>p</i> antes de la reconfiguración, m ³ /s
J	Conjunto de requerimientos de procesos $\{j \mid j=1, \dots, Nj\}$
K_F	Factor usado para anualizar la inversión, año ⁻¹

k_c	Constante cinética para la degradación del contaminante c
L_r	Pérdidas totales (filtración y evaporación) en el tramo de río r , m ³ /s
$L_{r,t}$	Pérdidas totales (filtración y evaporación) en el tributario t al tramo de río r , m ³ /s
M	Valores máximos y mínimos respecto a una variable específica
P	Conjunto de parques industriales $\{p \mid p=1, \dots, Np\}$
P_r	Precipitación descargada en el tramo de río r , m ³ /s
$P_{r,t}$	Precipitación que se descarga en el tributario t del tramo de río r , m ³ /s
PC	Costo de capital de tubería en la reconfiguración de la planta US\$/año
Q_r	Flujo que deja el tramo de río r , m ³ /s
$r_{c,r}$	Reacción que ocurre en el tramo de río r del componente c , g/s
$r_{c,r,t}$	Reacción que se lleva a cabo en el tributario t del tramo de río r del componente c , g/s
R	Conjunto de tramos de río $\{r \mid r=1, \dots, Nr\}$
$RR_{c,int}$	Factor de conversión para el contaminante c en el interceptor int , adimensional
$S_{r,t}^{untreated}$	Efluente descargado sin tratamiento a la tributaria t del tramo de río r , m ³ /s
$S_{r,t}^{treated}$	Descarga de agua residual tratada a la tributaria t del tramo de río r , m ³ /s
T	Conjunto de tributarias $\{t \mid t=1, \dots, Nt\}$
TAC	Costo total anual, US\$/año

TC	Costo de tratamiento, US\$/año
U_r	Agua usada desde el tramo de río r , m ³ /s
$U_{r,t}$	Agua usada de la tributaria t que se descarga al tramo de río r , m ³ /s
V_r	Volumen del tramo de río r , m ³
$V_{r,t}$	Volumen del tributario t del tramo de río r , m ³
W	Conjunto para las entradas de agua fresca al sistema $\{w \mid w=1, \dots, Nw\}$

Símbolos Griegos

$\alpha_{r,t}$	Relativo al flujo de descarga agrícola al tributario t que descarga al tramo de río r , m ³ /ha s
$\beta_{r,t}$	Relación del flujo de descarga agrícola al tributario t que descarga en el tramo de río r , m ³ /ha s
σ_c	Orden de reacción del componente c
ρ	Densidad, kg/m ³
v	Velocidad, m/s

Variables Binarias

$X_{i,j,p}^1$	Usado para determinar la existencia de tubería desde las corrientes de proceso i a los requerimientos del proceso j en el parque p
$X_{i,int,p}^2$	Usado para determinar la existencia de tubería para el intercambio de la corriente de proceso i al interceptor int en el parque p

$x_{int,j,p}^3$	Usado para determinar la existencia de tubería desde el interceptor <i>int</i> al requerimiento de proceso <i>j</i> en el parque <i>p</i>
$x_{int,p}^4$	Usado para determinar la existencia de tubería desde el interceptor <i>int</i> al medio ambiente en el parque <i>p</i>
$z_{int,p}^{treat}$	Usado para determinar la existencia del interceptor <i>int</i> en el parque <i>p</i>

Subíndices

<i>c</i>	Componente o contaminante
<i>i</i>	Sources o corriente de proceso que puede ser intercambiada
<i>j</i>	Sinks o requerimiento de proceso
<i>int</i>	Interceptor
<i>p</i>	Parque industrial
<i>r</i>	Tramo de río
<i>t</i>	Tributario
<i>w</i>	Agua fresca

Superíndices

in	Entrada
max	Límite máximo
min	Límite mínimo
out	Salida

Óptima instalación de biorefinerías

$a_{m,r}^{exist}$	Área existente donde se cultiva materia prima, ha
$a_{m,r}^{max}$	Área máxima para cultivar materia prima, ha
$a_{m,r}^{new}$	Área nueva para cultivar materia prima, ha
$A_{r,t}^{agriculture}$	Área cultivada asociada al tributario t en el tramo de río (“reach”) r , ha
$CapCost^{Biorefineries}$	Costo de capital para la instalación de un sistema de biorefinerías, US\$
D_r	Descargas directas a los tramos de río (“reach”) r , m ³ /s
$D_{r,t}$	Descargas agrícolas en el tributario t del tramo de río r , m ³ /s
$f_{m,r,r'}$	Materia prima producida m para la biorefinería en la localización r' en el campo en r , ton/año
$f_{m,r}^{Prod-grains}$	Flujo de granos producidos m en el campo r , ton/año
$f_{m,r,j}^{grain-market}$	Flujo de granos producidos m en el campo en r enviado a los consumidores j , ton/año
$f_{m,j}^{grain-market-Max}$	Máximo flujo de granos m enviado al consumidores j , ton/año
$f_{m,r}^{Prod-feedstocks}$	Flujo de materia prima producida m en el campo en r , ton/año
$F_{m,r'}$	Flujo de materia prima producida m enviada a la biorefinería localizada en r' , ton/y

$F_{m,r'}^{\max}$	Flujo máximo de materia prima m que es producida en el campo r' , ton/y
$FC_{m,r'}^{\text{Biorefinery}}$	Costo fijo total para la instalación de biorefinerías, US\$
$FT_{r,t}$	Flujo de descarga desde la tributaria t al tramo de río r , m ³ /s
G^{grains}	Ganancias obtenidas de la venta de granos, US\$/año
G^{products}	Ganancias obtenidas por la venta de productos, US\$/año
H_r	Flujo de descarga total (i.e., industrial, residencial) al tramo de río (“reach”) r , m ³ /s
I	Conjunto de corrientes de proceso $\{i \mid i=1\dots, Ni\}$
$I_{r,t}$	Corriente de descarga residencial al tributario t del tramo de río r , m ³ /s
L_r	Flujo de pérdidas totales (filtración and evaporación) para el tramo de río r , m ³ /s
$L_{r,t}$	Pérdidas totales (filtración and evaporación) en la tributaria t para el tramo de río r , m ³ /s
$OpCost^{\text{Biorefineries}}$	Costo de operación para las biorefinerías, US\$/año
$OpCost^{\text{Feedstocks}}$	Costo de operación por materia prima, US\$/año
$OpCost^{\text{water-biorefineries}}$	Costo de operación por consumo de agua en las biorefinerías, US\$/m ³ /año
$OpCost^{\text{water-feedstocks}}$	Costo de operación por agua consumida en los campos de cultivo para la producción de materia prima, US\$/m ³ /año
$P_{k,r'}$	Flujo de biocombustibles k producido en la biorefinería localizada en r' , ton/año

$P_{k,m,r'}^{Bio}$	Flujo de biocombustibles k producidos a partir de la materia prima m en la biorefinería localizada en r' , L/año
$P_{k,r',j}^{prod-market}$	Flujo total de biocombustibles k producidos en la biorefinería en r' enviado al consumidor j , L/año
$P_{k,j}^{prod-market-Max}$	Flujo de producto máximo k enviado al consumidor j , L/año
P_r	Flujo de descarga por precipitación en el tramo de río r , m ³ /s
$P_{r,t}$	Flujo de descarga por precipitación en la tributaria t del tramo de río r , m ³ /s
<i>Profit</i>	Ganancia total anual, US\$/año
Q_r	Flujo que deja el tramo de río r , m ³ /s
Q_{r-1}	Flujo que deja el tramo de río $r-1$, m ³ /s
$Q_r^{Initial}$	Flujo inicial que deja el tramo de río r , m ³ /s
$Q_{r-1}^{Initial}$	Flujo inicial que deja el tramo de río $r-1$, m ³ /s
R	Conjunto de tramos de río $\{r \mid r=1, \dots, Nr\}$
R'	Conjunto de posibles localizaciones de biorefinerías $\{r' \mid r'=1, \dots, Nr'\}$
$S_{r,t}^{untreated}$	Flujo de efluentes sin tratamiento descargado a la tributaria t del tramo de río r , m ³ /s
$S_{r,t}^{treated}$	Flujo de efluentes tratados descargados en la tributaria t del tramo de río r , m ³ /s
T	Conjunto de tributarios $\{t \mid t=1, \dots, Nt\}$
$TCost^{feedstocks}$	Costo de transporte para materia prima, US\$/km

$TCost^{grains}$	Costo de transporte para granos, US\$/km
$TCost^{products}$	Costo de transporte para biocombustibles, US\$/km
U_r	Flujo de agua usada en el tramo de rio r , m ³ /s
$U_{r,t}$	Flujo de agua usada de la tributaria t del tramo de rio r , m ³ /s
$UC^{Biorefinery}$	Costo unitario total por biorefinería, US\$/ton/año
$UC_{m,r}^{feedstocks}$	Costo unitario total para producir materia prima m en el campo de cultivo en r , US\$/ton/año
UC_m^{grains}	Precio unitario para el grano m , US\$/ton
$UC_k^{product}$	Precio unitario para el biocombustible k , US\$/ton
$UC_{m,r}^{water-feedstocks}$	Costo unitario de agua para uso agrícola m en el campo de cultivo r , US/m ³
$UC_{k,r'}^{water-used-biorefineries}$	Costo unitario del agua para uso industrial para las biorefinerías en r' , US\$/m ³
$UTC_{m,r,r'}^{feedstocks}$	Costo unitario de transporte para materia prima m desde el campo de cultivo r a la biorefinería en r' , US\$/km/ton/año
$UTC_{m,r,j}^{grains}$	Costo unitario de transportación para granos m producidos en el campo de cultivo en r enviados al consumidor j , US\$/km/ton/año
$UTC_{k,r',j}^{products}$	Costo unitario de transporte de biocombustibles k producidos en la biorefinería enviados al consumidor j , US\$/km/ton/año
$VC_{m,r'}^{Biorefinery}$	Costo variable para la instalación de biorefinerías en r' , US\$/ton/año
$Water^{required}$	Flujo total de agua requerida para satisfacer la demanda de agua por el sistema de biorefinerías, m ³ /s

$W_{k,r'}^{discharge-biorefinery}$	Flujo de agua descargada por las biorefinerías para producir biocombustibles k localizadas en r' , m^3/s
$W_{k,r'}^{used-biorefinery}$	Flujo de agua usada por las biorefinerías para producir biocombustibles k en la locación r' , m^3/s
$W_{m,r}^{discharge-feedstock}$	Flujo de agua descargada para producir materia prima m en el campo de cultivo en r , m^3/s
$W_{m,r}^{used-feedstock}$	Flujo de agua usada para producir materia prima m en el campo de cultivo en r , m^3/s
$W_{m,r}^{discharge-feedstocks_Initial}$	Descarga de agua inicial total para producir materia prima m en el campo de cultivo del tramo de río r , m^3/s
$W_{m,r}^{used-feedstocks_Initial}$	Descarga de agua inicial para producir materia prima m en campo de cultivo del tramo de río r , m^3/s

Símbolos griegos

$\alpha_{r,t}^{agriculture}$	Factor de conversión del flujo de agua requerido para la actividad agrícola en el tributario t que descarga en el tramo de río r , $m^3/ha\ s$
$\alpha_{k,m}^{Bioref}$	Factor de conversión relativo a la producción de biocombustible k desde materia prima m
$\alpha_{m,r}^{feedstock}$	Factor de conversión para producir materia prima m en el campo de cultivo en el tramo de río r
$\alpha_{m,r}^{grains}$	Factor de conversión para granos m cultivados en el campo del tramo de río r
$\alpha_{k,m}^{ww-biorefinery}$	Factor de conversión para los efluentes de las biorefinerías que producen biocombustibles k a partir de materia prima k
$\alpha_{k,m}^{used-biorefinery}$	Factor de conversión para el agua usada para la biorefinería en r'

$\beta_{r,t}^{agriculture}$	Factor de conversión al flujo de descarga de agua de uso agrícola al tributario t que se descarga al tramo de río r m ³ /ha s
$\beta_{m,r}^{feedstocks}$	Factor de conversión que representa el flujo total de agua usada para producir materia prima m en el campo de cultivo r
$\gamma_{m,r}^{discharge}$	Factor de conversión que representa la relación con la descarga de agua y la extracción de agua para producir materia prima m en el campo de cultivo en r
$\sigma_{m,r'}^{Biorefinery}$	Coeficiente de escala para el costo variables al instalar una biorefinería en r' alimentada por materia prima m

Variables Binarias

$y_{m,r'}^{Biorefinery}$	Variable binaria para la instalación de biorefinerías
--------------------------	---

Subíndices

k	Productos (Biocombustibles)
m	Materia prima
j	Consumidor
r	Tramo de río
r	Posible localización de una biorefinería
t	Tributaria

Agradecimientos

Al Dr. José María Ponce Ortega

Mi asesor, por su paciencia, apoyo y sabiduría al trasmitirme sus conocimientos que contribuyeron enormemente a mi formación profesional durante esta etapa.

A mi comité tutorial:

*Dr. Eusiel Rubio Castro, Dr. Fabricio Nápoles Rivera y Dr. Medardo Serna
González y al Dr. Agustín Jaime Castro Montoya*

Por sus correcciones, contribuciones a las mejoras en este proyecto de investigación.

Por el apoyo económico recibido que me ayudo enormemente para la finalización de este proyecto:

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)

Dulce Celeste López Díaz

Capítulo I. Introducción

En este capítulo se define el problema que se aborda en este proyecto de investigación. Para esto, en las generalidades se da a conocer el campo de estudio en el que se desenvuelve el proyecto, en los objetivos se define concretamente lo que se busca alcanzar, con la justificación se expresa la importancia de llevarlo a cabo, los antecedentes nos muestran el panorama de lo realizado anteriormente y que se pretende mejorar, en el alcance se establece el área llegan los resultados obtenidos y el campo de aplicación, al finalizar se encuentra la hipótesis que es la que dictamina lo que se espera obtener una vez culminado el proyecto.

1.1 Generalidades

La actividad industrial repercute indudablemente en el desarrollo económico y social, ya que provee de una economía sólida dependiendo del grado de desarrollo que presente. Sin embargo, la actividad industrial en una región propicia la explotación de recursos naturales (minerales, agua, alimentos, entre otros). Dicha explotación en algunos casos ha llevado al deterioro del medio ambiente de manera irreparable, por ejemplo, con la extinción de flora y fauna., así como a graves problemas de contaminación del suelo, el aire y el agua. Como es conocida la localización óptima de una nueva planta industrial o un sistema industrial, los sitios cercanos a las cuencas hidrológicas (ríos y lagos) presentan la mejor opción por fácil acceso de materias primas y agua fresca. No obstante, asociado a la actividad industrial se encuentra la contaminación de grandes volúmenes de agua tanto del punto de vista de fuentes como de descargas; ya que los estos sistemas hídricos son emplean de manera invariable como receptores de descargas y como suministro para otras actividades indispensables para el ser humano, como es el caso de la agricultura, ganadería, uso doméstico, actividades recreativas, entre otras. En ese sentido, la sobreexplotación de agua en las cuencas hidrológicas principalmente por el sector industrial ha ocasionado la reducción de los niveles de mencionado recurso, provocando la destrucción de ecosistemas y poca disponibilidad de los recursos. Esto aunado a los problemas ya existentes por el cambio climático que han ocasionado la escasez de lluvias.

Debido a lo anterior, recientemente se han desarrollado metodologías para el uso óptimo del agua y la reducción de las descargas de efluentes contaminantes al medio ambiente que por décadas ha sido un problema que los gobiernos de todo el mundo buscan combatir, ya que en base a proyecciones en términos económicos y sociales la actividad industrial seguirá creciendo en los próximos años.

1.2 Objetivos

En esta sección se definen de forma precisa la finalidad de la presente tesis. Para esto en primer lugar se presenta al objetivo general y posteriormente se describe la ruta a seguir para alcanzar a este por medio de los objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología para determinar la localización óptima de complejos industriales considerando simultáneamente aspectos económicos y ambientales.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo basado en programación matemática para determinar la localización óptima de sistemas industriales optimizando el uso de agua restringida a una función objetivo económica.
- Definir con la técnica MFA (*Material Flow Analysis*) un análisis ambiental a lo largo de la cuenca hidrológica que estudie la repercusión de la actividad industrial en la instalación de sistemas industriales.
- Implementar el modelo desarrollado en la plataforma GAMS para determinar la localización óptima de los sistemas industriales para casos de estudio específicos.

1.3 Justificación

Actualmente en el sector industrial el concepto de sustentabilidad es prioridad. Esto debido a los problemas de contaminación que son inherentes a la actividad industrial (contaminación y sobreexplotación de recursos naturales). Particularmente, el sector industrial demanda grandes cantidades de agua fresca por la naturaleza de sus procesos (por ejemplo, en procesos de destilación, extracción líquido-líquido, torres de enfriamiento, reactores, lavado de equipos, etc.). Y en estos días, donde la escasez de los recursos naturales es un problema de gran relevancia, el innovar metodologías y modificar procesos industriales que busquen una forma más eficiente del uso de este recurso es de vital importancia. Para esto, la integración másica ha sido una técnica que ha permitido minimizar la cantidad de agua que es empleada en las industrias y aumentar la eficiencia de los procesos industriales; además que ha brindado una reducción en los costos de tratamiento de los efluentes utilizados para cumplir con las restricciones ambientales que se imponen, por lo que la aplicación de estas tecnologías provoca la reducción en los costos de operación en las industrias, ayudando así a alcanzar la sostenibilidad económica. Por lo tanto, es indispensable el estudio de la repercusión de los sistemas industriales que se planean instalar, ya que el no considerar este aspecto podría ser seriamente perjudicial. Dentro de las metodologías de análisis ambiental, la técnica del MFA brinda un análisis y representación confiable de lo que globalmente ocurre. Sin embargo, esto no es suficiente para mantener la sostenibilidad ambiental; en otras palabras, la integración másica dentro de las industrias no es suficiente, ya que se requiere saber que ocurre con los contaminantes una vez descargados, realizar modificaciones en los procesos y adaptar el sistema. Todo esto demanda que aunado al modelo de integración de redes de intercambio de agua se incluyan y se resuelvan simultáneamente modelos para el seguimiento de contaminantes, los cuales permiten conocer las interacciones de los contaminantes con el ambiente a fin reconfigurar los sistemas industriales que presenten un equilibrio en aspectos económicos y ambientales. En base a lo anterior es importante mencionar que el tener complejos industriales sustentables producen una serie de beneficios no sólo en el reconocimiento de la empresa, si no que se contribuye al desarrollo de otras actividades humanas que se realizan a lo largo de la cuenca donde se asientan los sistemas industriales (parques eco-industriales o sistema de biorefinerías) como lo son la agricultura, la actividad residencial, la actividad industrial existente, entre otras.

1.4 Antecedentes

Dentro de la Ingeniería Química, el poder desarrollar procesos más eficientes y que cumplan con los requerimientos operacionales y de diseño es el objetivo principal. Para llevar a cabo esta tarea, se ha recurrido a estrategias de modelación matemática, a la codificación y solución de estos modelos y en ocasiones a la simulación de los diseños obtenidos con la idea de identificar escenarios óptimos.

En ese sentido, las estrategias de optimización han sido ampliamente usadas para la síntesis (El-Halwagi y Monousiouthakis, 1989; El-Halwagi y col., 1996; Gabriel y El-Halwagi, 2005; Karuppiah y Grossman, 2006), reajuste (Lim y col., 2010; Rubio-Castro y col., 2012) y diseño (Burgara-Montero y col., 2012) de procesos químicos. En esta parte podemos encontrar metodologías que se basan en métodos algorítmicos, métodos gráficos, algebraicos y de programación matemática. Para el primero de los casos encuentran los trabajos realizados por: Salvalski y Bagajewicz (2001), Eusuff y Lansey (2003), Kadu y col. (2008). En cuanto a los métodos gráficos basados en el punto de pliegue, están los realizados por Sorin y Bedard (1999) y Foo (2009). Y en torno a trabajos basados en programación matemática se encuentran trabajos de Ponce-Ortega y col. (2010), Lira-Barragán y col. (2011a), Rubio-Castro y col. (2013a), entre otros.

Por otra parte, la integración de procesos se divide en tres categorías: integración energética (ver Rubio-Castro y col., 2013b; Hipólito-Valencia y col. 2014), integración másica (ver Gabriel y El-Halwagi, 2005, Foo y col., 2006b, Yoo y col., 2007) e integración de propiedades (ver El-Halwagi y col., 2004). Para el caso de la integración másica en redes de distribución de agua en las industrias se han analizado y aplicado distintas metodologías para encontrar la red óptima de distribución de corrientes. Por ejemplo, El-Halwagi y col. (2003) desarrollaron una metodología empleando la tecnología del punto de pliegue para minimizar uso de agua de alimentación (agua fresca) por medio de una estrategia de reciclaje y reuso mediante el mezclado y segregación de estas corrientes. Foo y col. (2006a) presentaron una metodología numérica usando el análisis de cascada para optimizar redes de distribución de agua.

Por otra parte, el estudio del comportamiento de sistemas industriales recientemente ha tomado gran impulso debido a la importancia de analizar de forma global al conjunto de plantas a fin de rediseñarlas y optimizar el uso de recursos (materias primas, agua y energía). Dentro de estos sistemas se incluyen a los parques eco-industriales y el inminente interés en los biocombustibles con la instalación de biorefinerías, que son plantas industriales complejas. Por ejemplo el uso de parques eco-industriales ha mostrado una reducción en el consumo de agua fresca. En este contexto, Ponce-Ortega y col. (2010) y Rubio-Castro y col. (2013a) propusieron modelos de integración másica en parque eco-industriales a través de superestructuras que consideran el reuso de corrientes de proceso en la misma planta, además implementaron un conjunto de unidades de tratamiento con la finalidad de intercambiar corrientes hacia procesos de otras plantas. Donde la red de distribución permite satisfacer los requerimientos en unidades de proceso y las restricciones ambientales.

Así también, la integración de sistemas industriales pueden ser analizada desde una perspectiva global, donde un conjunto de industrias pueden ser instaladas en una región con la finalidad de satisfacer alguna demanda de productos y donde sus interacciones con el medio ambiente, principalmente en la explotación de recursos naturales, pueden originar un estudio exhaustivo de las repercusiones del sector industrial al medio ambiente en el diseño de un sistema industrial sostenible. Dentro de esta categoría, las biorefinerías se encuentran en las investigaciones más recientes al respecto. Aquí cabe mencionar Que el diseño e instalación de biorefinerías considera varios factores, por ejemplo: la disponibilidad de la materia prima, energía y agua, a fin de seleccionar la ubicación óptima. Dicha ubicación debe ser tal que permita satisfacer la demanda de biocombustibles mediante una cadena de suministro adecuada. Al respecto, Bowling y col. (2011), De Meyer y col. (2015), Marvin y col. (2013), Santibáñez-Aguilar y col. (2015) y Zhang y col. (2012) desarrollaron metodologías para encontrar la mejor localización de biorefinerías mediante el análisis de la cadena de suministro óptima. Algunas otras investigaciones se han centrado a la disponibilidad de la biomasa y suelo como lo propuesto por Murillo-Alvarado y col. (2014) y Yeh y col. (2015).

Respecto al diseño óptimo de cadenas de suministro considerando a la par aspectos económicos y ambientales tenemos los trabajos realizados por Osmani y col. (2014), Santibáñez-Aguilar y col. (2011 y 2014), You y col. (2012) que llevan a sistemas donde los criterios de sustentabilidad determinan sistemas industriales muchos más eficientes (Ba y col. (2015), Corsano y col. (2011), Giarola y col. (2015), Santibáñez-Aguilar y col. (2015). Para Guillén-Gosálbez (2010), Kim y col. (2011), Ruiz-Femenia y col. (2013) y Tong y col. (2012) incorporar metodologías que consideren la incertidumbre en las cadenas de suministros en la producción de biocombustibles es de vital importancia. Cucek y col. (2013 y 2014) y Yue y col. (2014) desarrollaron trabajos donde en cadenas de suministro incorporaron integración másica e integración energética en conjunto. En tanto que para considerar el seguimiento de las extracciones y descargas de efluentes por los sistemas industriales Lovelady y col. (2009), Burgara-Montero y col. (2013a), Lira-Barragán y col. (2013) y López-Villareal y col. (2014) propusieron modelos de optimización con el objetivo de analizar el comportamiento de los contaminantes a lo largo de una cuenca hidráulica mediante un tratamiento distribuido de efluentes y emplearon el análisis de flujo de materiales (MFA) para llevar a cabo el rastreo. Posteriormente, Burgara-Montero y col. (2013b) desarrollaron un modelo de optimización para el tratamiento distribuido utilizando un sistema de discos auto-rotatorios para la oxigenación de agua en corrientes que se depositan de un río con la finalidad de alcanzar la sustentabilidad del sistema en la disposición final. En este trabajo se encontró que es muy importante la ubicación estratégica de unidades de tratamiento adicionales a las ya existentes en las plantas industriales para mantener su sustentabilidad.

1.5 Alcance

La aportación de este trabajo consiste en generar una herramienta teórica en la toma de decisiones respecto a la instalación de sistemas industriales que se aproximen a la sustentabilidad, al considerar dos aspectos tan importantes como lo son el económico y ambiental, el tercero para finalizar la pirámide esta próximo, el aspecto social. Es de suma importancia considerar en la infraestructura industrial actual el empleo del rediseño con la finalidad de conseguir procesos industriales más eficientes en base al uso óptimo de los recursos, como los que se proponen en este trabajo, donde a su vez se consigue una remuneración económica como incentivo para llevarlo a cabo acompañado de un beneficio ambiental importante.

1.6 Hipótesis

La metodología propuesta para la formulación de modelos matemáticos permitirá la localización óptima de complejos industriales mediante la integración de procesos, optimizando el uso del agua lo que representará un beneficio económico en base la reducción de los costos anuales totales y la maximización de las ganancias, y simultáneamente incluir un análisis ambiental que permita ajustar a los modelos a producir el mínimo impacto ambiental.

Capítulo II. Marco teórico

La demanda creciente de productos para satisfacer las necesidades de la sociedad actual ha provocado un crecimiento acelerado del sector industrial, lo que representa la necesidad del diseño, rediseño y por ende la instalación de nuevas plantas industriales. Para tal tarea una gran variedad de factores deben ser tomados en cuenta, entre los principales encontramos: la disponibilidad de materias primas, energía y agua. Los elevados requerimientos en estos factores han propiciado durante muchos años la explotación de recursos naturales a gran escala ocasionando grandes problemas ambientales. El explotado por el sector industrial, es requerida para un gran número, tratamiento de materias primas, obtención de productos y purificación son algunos de ellos. La sobreexplotación de este recurso ha repercutido considerablemente en la constante subsistencia de los ecosistemas (extinción de flora y fauna por escasez de agua), la contaminación y el cambio climático.

En base a lo anterior, la necesidad de los gobiernos por mitigar la contaminación de origen industrial ocasionó el establecimiento de una normativa ambiental para regular las concentraciones en las descargas de compuestos altamente perjudiciales en los cuerpos hídricos y los volúmenes en las descargas de los efluentes. En esta parte podemos encontrar las normas mexicanas para regular la calidad del agua que son impuestas por autoridades como SEMARNAT. Por lo que, para cumplir con estas disposiciones las industrias se ven obligadas a tratar sus efluentes en unidades especializadas dependiendo de los compuestos a ser eliminados, generando elevados costos de capital y operación debido la naturaleza y complejidad de los procesos en la remoción de contaminantes.

Sin embargo, algunas corrientes de proceso que anteriormente eran consideradas de residuo pueden emplearse en otros procesos dentro de la misma planta industrial si cumple con las condiciones en la calidad de agua necesaria. Lo que permite a las industrias implementar estrategias de reciclo y reuso de corrientes procedentes de algunas etapas de procesos a otras que no necesitan de una elevada calidad de agua para llevarse a cabo, reduciendo de esta manera la alimentación de recursos “frescos” así como las descargas al ambiente (ver Figura 2.1 en El-Halwagi y col., 2003); surgiendo así la aplicación de la metodología para la integración de los procesos.

Particularmente, la integración de procesos es una herramienta de optimización crítica en el diseño, rentabilidad económica y sustentabilidad de los procesos (El-Halwagi, 1997). Se clasifica en 3 categorías: integración de masa, integración de energía e integración de propiedades:

- Integración másica: es una metodología sistemática que provee un entendimiento de flujo total de masa dentro de los procesos, identificando el rendimiento y optimizando la generación y el transporte de las especies a lo largo de estos.
- Integración de energía: es una metodología sistemática que provee un entendimiento general del aprovechamiento de la energía, de la recuperación de calor y la utilización de la energía en los procesos.
- Integración de propiedades: es una nueva categoría dentro de la integración de procesos. Debido a que las corrientes pueden estar compuestas de una gran variedad de sustancias, suele ser complejo si se analizan en base a su composición, por lo que esta metodología considera para el análisis propiedades como: pH, densidad, viscosidad, toxicidad, color, demanda química de oxígeno, etc. Además, la anterior metodología permite el rastreo, ajuste, asignación de las sustancias que componen a las corrientes a lo largo de los procesos, que prácticamente son empleadas en numerosas restricciones operacionales en el reajuste de corrientes de proceso en la aplicación de esta metodología (El-Halwagi y col., 2004).

Siendo la integración másica la metodología que se emplea en este trabajo a fin de diseñar sistemas óptimos en términos del uso eficiente del agua en sus procesos mediante la reconfiguración de las redes de distribución interna y global de las corrientes de proceso. Y de manera simultánea ocasionar la menor repercusión posible al medio ambiente. Por un lado, se encuentra la aplicación de esta metodología en la modalidad de ajuste interplanta y en la red de distribución de agua en plantas industriales para la conformación de parques eco-industriales, por otro tenemos la aplicación de esta metodología global con el estudio de un sistema de biorefinerías, sistemas complejos donde los balances macroscópicos de las plantas que conforman un sistema industrial a instalar es la parte fundamental.



2.1 Integración másica en la reconfiguración de redes de distribución en la conformación de parques eco-industriales.

En cuanto al reciclaje y reuso del agua de proceso, esto han desarrollado estrategias para la integración de una sola planta y/o a la integración entre plantas. Entre las técnicas de optimización para el uso de agua aplicada a establecer redes óptimas de distribución de agua entre un conjunto de plantas industriales los beneficios económicos y ambientales aunados a la reducción del agua alimentada son relevantes. Actualmente, el concepto de parques eco-industriales permite desarrollar este tipo de estrategias (ver Figura 2.2). Un parque eco-industrial es una comunidad industrial y de negocios que buscan un alto desempeño económico y ambiental a través de la colaboración en la gestión de recursos (materias primas, energía, etc.) y de aspectos ambientales (Lowe, 1997).

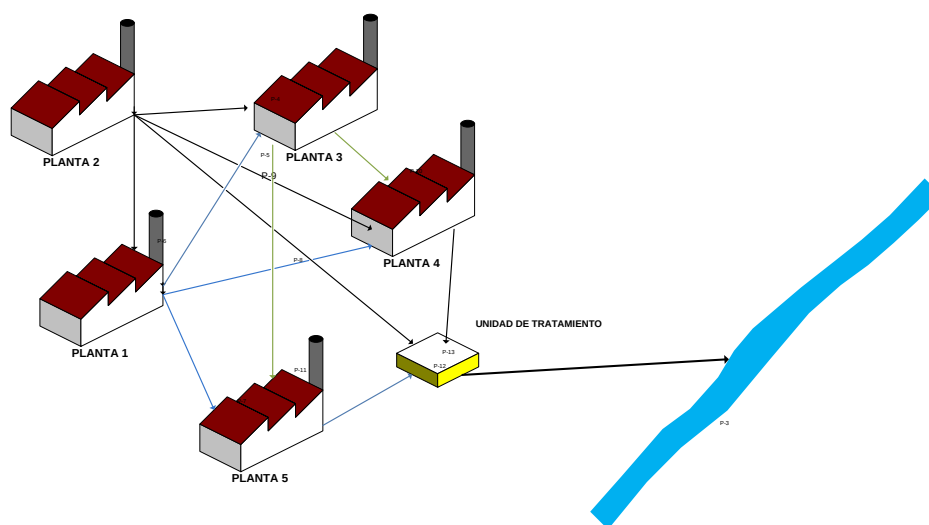


Figura 2.2 Configuración general de un parque eco-industrial.

Respecto al desarrollo de estrategias para la síntesis y diseño de parques eco-industriales, actualmente se han publicado una cantidad significativa de metodologías para este fin (Chew y col., 2008; Lovelady y El-Halwagi, 2009; Lim y Park, 2010; Rubio-Castro y col., 2010). En estos trabajos se han implementado estrategias basadas en la tecnología del punto de pliegue (Olesen y Polley, 1996; Yoo y col., 2007; Foo, 2009) o programación matemática (Liao y col., 2007; Cheng-Liang y col., 2011; Rubio-Castro y col., 2011; Boix y col., 2012; Rubio-Castro y col., 2012; Rubio-Castro y col., 2013 a y b).

En particular, las metodologías basadas en programación matemática ofrecen la ventaja de que permiten incorporar diversas restricciones técnicas y operacionales además de conducir a la solución óptima basada en un criterio específico. Por otro lado, las metodologías reportadas hasta la fecha para la síntesis de un parque eco-industrial no han considerado el seguimiento de los contaminantes descargados al ambiente ni su interacción con otras descargas en el contexto global. En torno a esto, recientemente El-Baz y col. (2005), Lira-Barragán y col. (2011a, b) y Burgara-Montero y col. (2012) han propuesto metodologías para el seguimiento de los contaminantes descargados al ambiente en el contexto de la síntesis óptima de redes de agua en una sola industria. Mismas que han permitido incorporar el efecto global de los contaminantes descargados por las industrias al ambiente, lo cual ha modificado significativamente la configuración de la red óptima al incorporar restricciones de sustentabilidad ambiental. Por lo tanto, en el presente proyecto se propone desarrollar un modelo de optimización para la síntesis y reajuste óptimo de redes de agua en parques eco-industriales considerando la trayectoria e interacción con el ambiente de los contaminantes descargados. Este enfoque permitirá identificar a aquellas empresas que conviene reajustar e incluir en el parque eco-industrial de acuerdo a su localización en base al comportamiento del seguimiento de sus contaminantes y de los costos asociados, simultáneamente.

En la figura 2.3 se presenta la supestructura que ilustra de manera más precisa el concepto que se propone en este proyecto de investigación para un parque industrial, con la finalidad de usar más eficientemente el agua fresca; agua fresca es un término empleado para nombrar al flujo de agua que se alimenta a las plantas industriales procedentes de servicios públicos o privados de abastecimiento de agua. Las diferentes combinaciones de intercambio de las corrientes en las diversas plantas que conforman al parque eco-industrial originan una configuración en ocasiones muy compleja, lo que implica que para poder obtener la mejor es necesario la implementación de estrategias y plataformas computacionales de optimización. Misma que es usada en la ingeniería química para resolver problemas tanto de diseño como de rediseño.

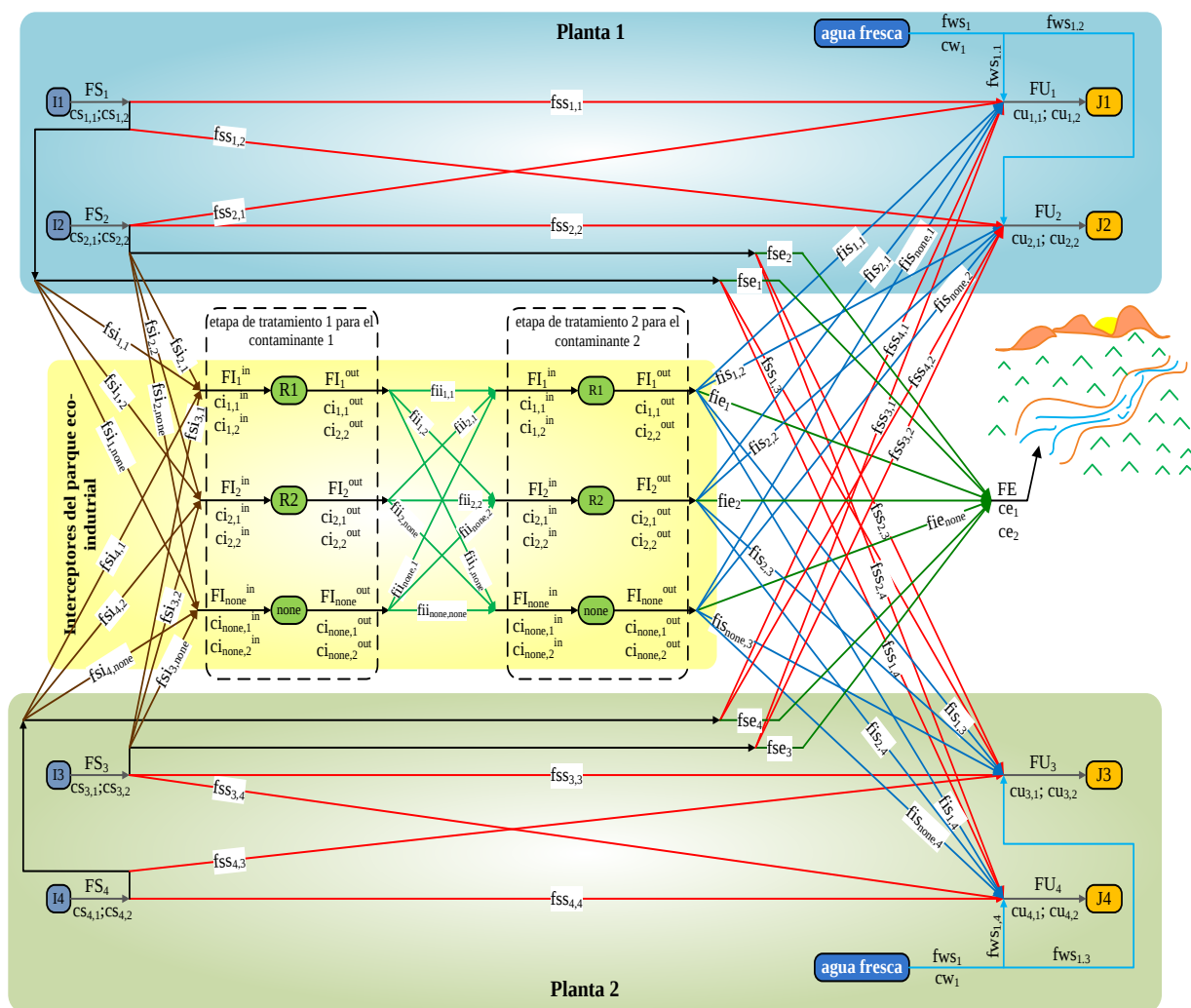


Figura 2.3 Superestructura para redes de distribución de agua en un parque eco-industrial.

2.2 Integración másica aplicada a la distribución óptima de un sistema de biorefinerías.

En estos días, con el gran interés de los biocombustibles, la instalación de biorefinerías es un escenario cercano. En una biorefinería se lleva a cabo el procesamiento sustentable de biomasa a un espectro de productos (alimentos, materiales y químicos) de alto valor agregado y energía (combustibles, potencia y calor). Las biorefinerías se han identificado por ser atractivas fuentes para satisfacer la demanda energética por el decreciente uso de los combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

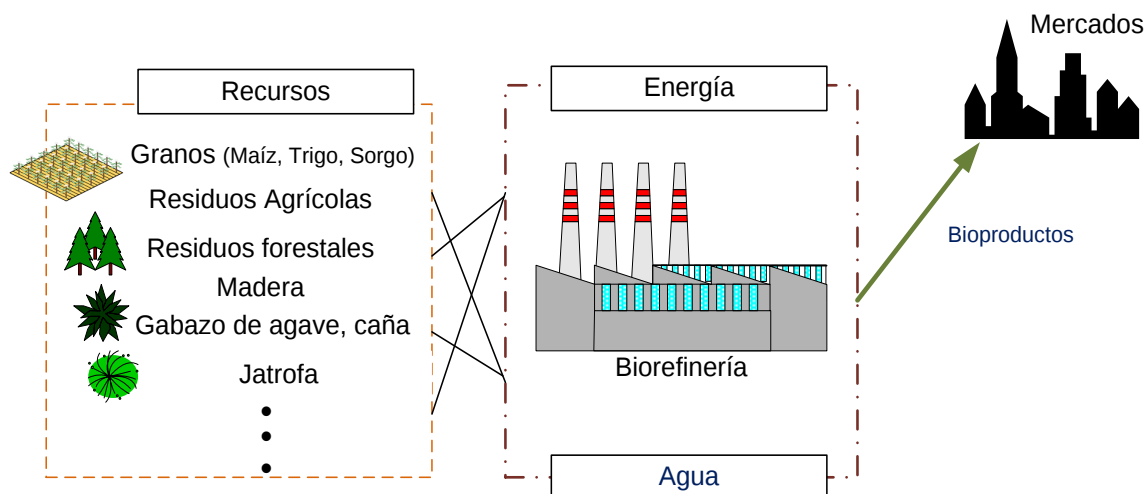


Figura 2.4 Concepto de una biorefinería.

La disponibilidad de biomasa y la factibilidad económica en la producción de biocombustibles son los principales obstáculos para este tipo de industrias. Los biocombustibles se clasifican de acuerdo al tipo de biomasa:

- Biocombustibles de primera generación: referente a biocombustibles como etanol y biodiesel producidos de biomasa agrícola (maíz, remolacha, aceite vegetal, caña de azúcar). Esta clase de biomasa es rica en azúcar, lo que provoca un alto rendimiento en la producción. Aunque esta alternativa proporciona importantes ventajas, la tecnología provoca problemas ambientales y sociales, tales como: riesgo creciente a la competencia entre la demanda alimentaria y biomasa, riesgo de deforestación por la sobreexplotación del suelo, así como el riesgo ambiental por el uso de fertilizantes y pesticidas. En el análisis del ciclo de vida el costo para la producción de biocombustibles excede en algunos casos los costos de combustibles fósiles.
- Biocombustibles de segunda generación: son producidos a partir de materiales lignocelulósicos incluyendo a paja de cereales, residuos forestales, bagazo, etc. Debido a los bajos precios por la abundancia de este tipo de biomasa, por los costos mínimos de materia prima es conveniente su empleo en la producción de biocombustibles.

- Biocombustibles de tercera generación: su producción emplea como materia prima a los cultivos acuáticos. En esta parte, las algas tienen un elevado potencial en la producción de biocombustibles debido a la cantidad de aceite vegetal que pueden producir en cada célula.

Para el caso de las biorefinerías de primera generación se ha tenido un gran debate por la competencia con el sector alimentario por la disposición de cereales, ya que el abastecimiento para consumo humano se vería comprometido por el aumento de demanda de biocombustibles a gran escala. En biorefinerías de tercera generación, la complejidad de las tecnologías se encuentra en desarrollo y por consiguiente tienen costos de operación y de capital muy alto, y en ocasiones con bajos rendimientos de producción de bioproductos. En las biorefinerías de segunda generación la flexibilidad en el tipo de biomasa que se puede alimentar puede permitir el empleo de residuos agrícola, estos tienen un costo de adquisición muy bajo ya que comúnmente no son aprovechados. Además que los rendimientos que han reportado algunas investigaciones sobre el rendimiento de residuos lignocelulósicos en la obtención de biocombustibles u otros productos son generalmente altos, dependiendo de la tecnología que se aplique.

Un punto particular para las biorefinerías es el uso de grandes cantidades de biomasa, misma que está disponible en cierta temporada o dependen de la ubicación de recursos naturales. Reciente, algunas investigaciones han sugerido el uso de algunos cultivos específicos para la producción de biocombustibles debido a sus altos rendimientos, con lo que el satisfacer la elevada demanda de biocombustibles requiere de grandes áreas de cultivo para estas especies de cultivo. Algunos países, debido a sus características climáticas y suelo, son clasificados como potenciales productores de biomasa para producir biocombustibles. Aunque algunos factores deben ser considerados simultáneamente, como: la disponibilidad de tierras de cultivo, agua, energía e infraestructura, así como incluir los aspectos económicos, sociales y ambientales para garantizar la sustentabilidad de estos sistemas industriales. Así también, debe considerarse que esta industria consume grandes volúmenes de agua para las diferentes etapas de proceso (cultivo de biomasa, pretratamiento de materia prima, fermentación y separación, así como en las etapas finales en la producción de biocombustibles y bioproductos), de igual manera se produce unas elevadas descargas de efluentes que son vertidos a lo largo de la cuenca hidrológica donde las biorefinerías se encuentran localizadas.

Por lo que es necesario cuantificar la interacción por el uso del agua y las descargas de efluentes con las otras actividades humanas que se desarrollan en la misma cuenca (agricultura, industria, actividad doméstica, etc.) a fin de determinar los lugares óptimos para instalar biorefinerías, así como áreas de cultivo para la generación de biomasa.

2.3 Modelo MFA (*Material Flow Analysis*).

En la parte de garantizar la sustentabilidad de la red de distribución de agua en el parque eco-industrial se utilizará el modelo de optimización MFA para el rastreo del comportamiento de los contaminantes desechados al medio ambiente. El modelo MFA por sus siglas en inglés *Material Flow Analysis*, lleva a cabo la cuantificación y valoración de materia usando el flujo másico de sustancias (nitrógeno, fosforo, carbón, etc.) y procesos, en un sistema (rio, lago) durante un periodo definido. El principio del modelo MFA está basado en la ley de la conservación de la materia, los de resultados pueden ser manipulados por un simple balance de materia comparando todas las entradas y salidas de un proceso. La aplicación del método consiste en identificar problemas y cuantificar el impacto de las posibles medidas en la recuperación de los recursos y la contaminación ambiental. Es usado para comparar diversas opciones de saneamiento de diversas tecnologías mediante aspectos económicos y ambientales, así como para evaluar la sustentabilidad y efectividad de las tecnologías para la toma de decisiones.

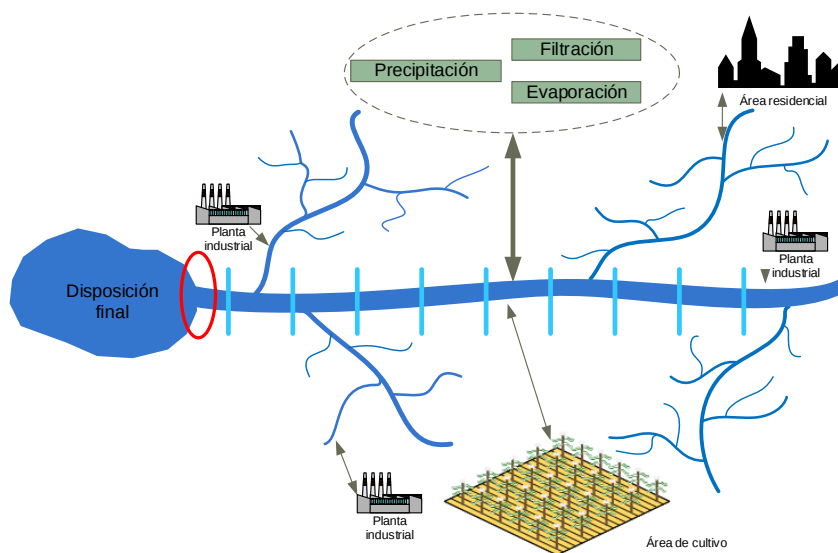


Figura 2.5 Esquema de la metodología MFA (*Material Flow Analysis*)

Capítulo III. Metodología

La metodología utilizada para realizar este proyecto de investigación se conforma por las etapas que se muestran en la Figura 3.1. La primera etapa indudablemente consiste en proponer, habiendo consultado previamente bibliografía reciente en el campo de estudio, en este caso principalmente sobre integración másica y la técnica del MFA para el análisis del impacto ambiental que produce la conformación o instalación de sistemas industriales que son abordados.

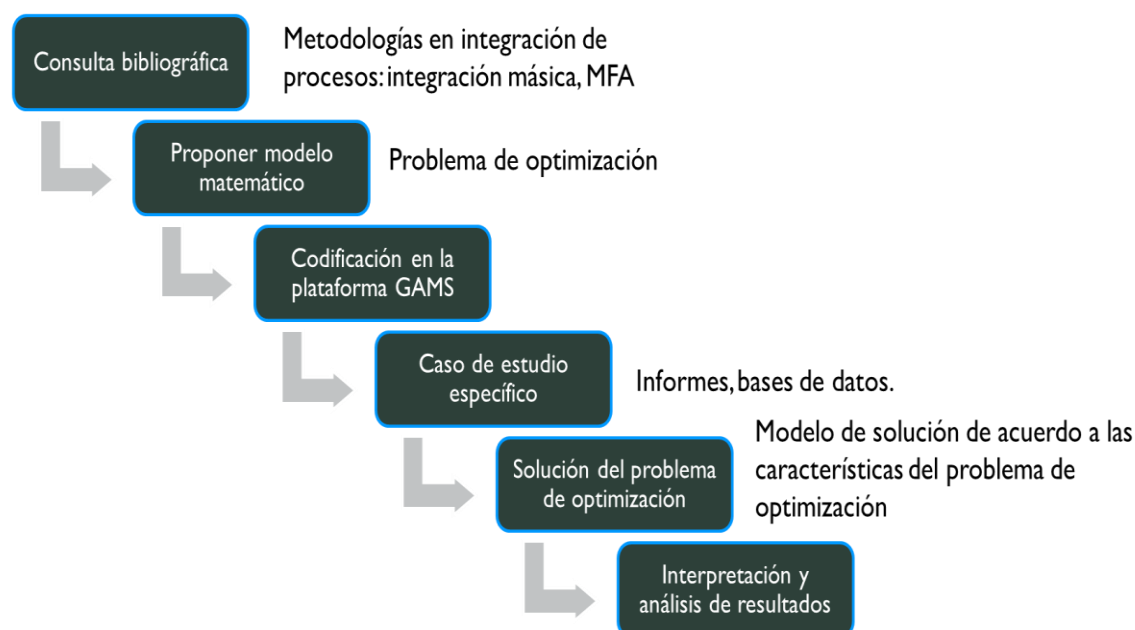


Figura 3.1 Metodología propuesta para el proyecto de investigación.

La formulación de los modelos matemáticos en la segunda etapa es propuesta para el desarrollo en el proyecto. Con una serie de ecuaciones y expresiones matemáticas se define el complejo sistema industrial que se desea instalar considerándose ambos objetivos buscados (económicos y ambientales), consecuentemente en base a un modelo desarrollado y codificado en la plataforma de GAMS un caso de estudio específico es definido. Principalmente se busca que el caso sea pertinente en la región para generar un beneficio local, el conjunto de datos que involucran un caso de estudio deben de ser de fuentes confiables, por ejemplo, de bases de datos gubernamentales o privadas con reconocimiento.

En la siguiente etapa se establece la estrategia de solución para el problema. Para lo cual, el modelo matemático a optimizar se codifica a la plataforma computacional y posteriormente son cargados los datos del caso de estudio para encontrar la solución óptima.

3.1 Formulación del modelo para óptima localización de parques eco-industriales considerando la interacción con el medio ambiente.

La formulación del modelo matemático se realiza en base a la superestructura propuesta en la Figura 3.2, debido al empleo de las dos metodologías mencionadas anteriormente, el modelo se presenta en dos secciones. En la primera se aborda la reconfiguración de redes de distribución de agua con el objetivo de diseñar parques eco-industriales y en la segunda parte se aborda la modelación de la cuenca hidrológica para el análisis de los contaminantes a lo largo de la misma, considerando así el análisis del impacto ambiental.

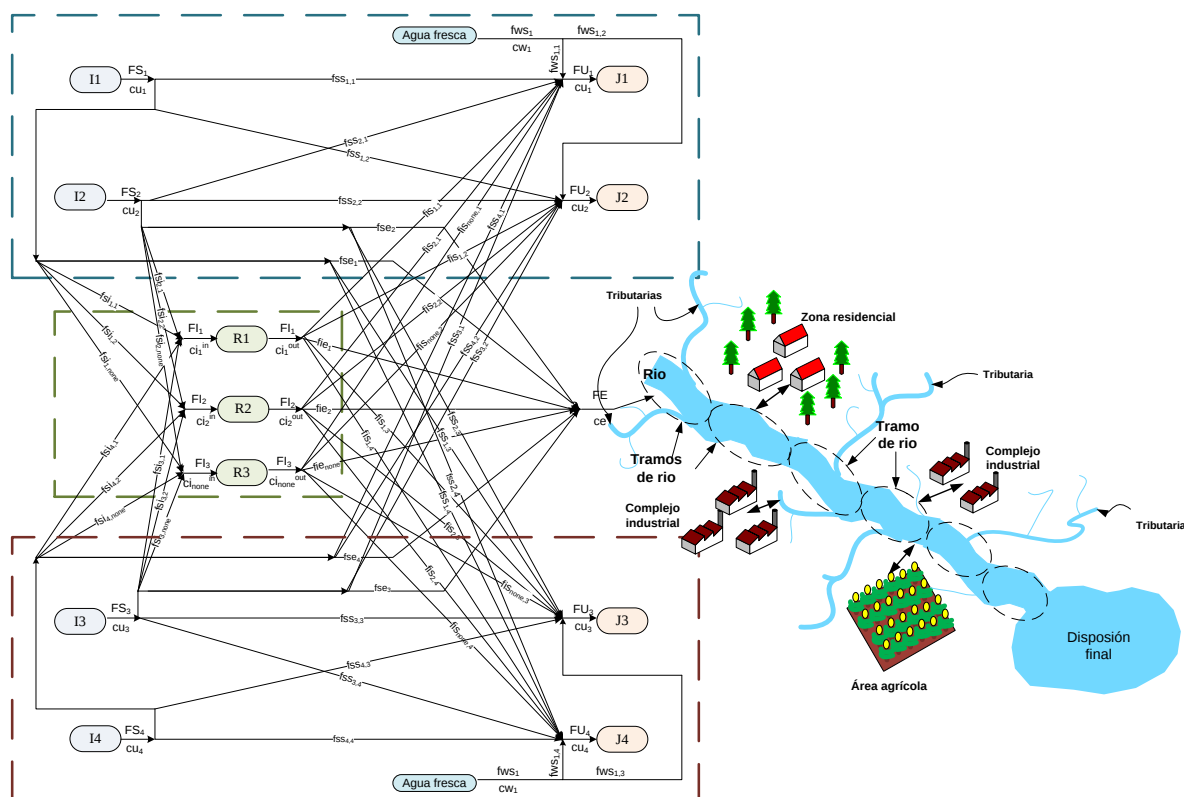


Figura 3.2 Superestructura para conformación de parques eco-industriales considerando la interacción con el medio ambiente.

3.1.1 Reconfiguración de redes de intercambio de agua en parques eco-industriales.

En la modelación se consideran las corrientes de proceso en las unidades que son excedentes y presentan las condiciones (calidad del agua) aptas para ser recicladas o reusadas a fin de satisfacer requerimientos presentes en otros procesos o unidades de proceso. Tal integración másica poder ser de forma directa y/o indirecta. El primer caso se presenta cuando las unidades de proceso intercambian materia de forma directa sin que existan otras unidades en el trayecto de las corrientes a reusar, en tanto que la integración indirecta es llevada a cabo cuando previo al empleo de una corriente en una unidad de proceso es tratada en unidades de tratamiento (interceptores). Estos con la finalidad de cumplir con la normativa ambiental y ser descargados o simplemente ser reusadas en otras etapas de proceso.

Balance de masa global para en cada corriente de proceso

El flujo de cada corriente de proceso i que es posible intercambiar en cada conjunto industrial disponible p ($FS_{i,p}$) puede ser segregado y enviado a requerimientos de proceso ($fss_{i,j,p}$), a los interceptores ($fsi_{i,int=1,p}$) y/o ser descargados al medio ambiente ($fse_{i,p}$).

$$FS_{i,p} = \sum_{j=1}^J fss_{i,j,p} + \sum_{int=1}^{INT} fsi_{i,int=1,p} + fse_{i,p}, \quad \forall i \in I, p \in P \quad (3.1)$$

Balance global de masa para cada requerimiento de proceso

El flujo para abastecer los requerimientos en cada proceso j en cada parque industrial p ($FU_{j,p}$) proviene de los flujos de las corrientes de proceso ($fss_{i,j,p}$), de las salidas de las redes de distribución de los interceptores ($fis_{int=NT,j,p}$) y ser abastecidas con agua fresca ($fws_{w,j,p}$), como se representa a continuación:

$$FU_{j,p} = \sum_{i=1}^I fss_{i,j,p} + \sum_{int=NT}^{INT} fis_{int=NT,j,p} + \sum_{w=1}^W fws_{w,j,p}, \quad \forall j \in J, p \in P \quad (3.2)$$

Balance por componente para cada requerimiento de proceso

Se estima de la misma manera que el balance global solo que cada término se multiplica por la concentración de dicho contaminante con la siguiente expresión:

$$FU_{j,p}cu_{c,j,p} \geq \sum_{i=1}^I fss_{i,j,p}cs_{c,i,p} + \sum_{int=NT}^{INT} fsi_{int=NT,j,p}ci_{c,int=NT,p}^{out} + \sum_{w=1}^W fws_{w,j,p}cw_{c,w,p}, \quad \forall c \in C, j \in J, p \in P \quad (3.3)$$

Donde $cu_{c,j,p}$ es la concentración de cada contaminante, $ci_{c,int=NT,p}^{out}$ representa la concentración del contaminante a la salida de la red de intercepción y finalmente la concentración del contaminante en agua fresca es representada por $cw_{c,w,p}$.

Balance global de masa en los interceptores

El flujo que entra en los interceptores ($FI_{int=1,p}$) se conforma por los flujos que son segregados desde las unidades de proceso hacia la zona de regeneración ($fssi_{i,int,p}$):

$$FI_{int,p} = \sum_{i=1}^I fsi_{i,int,p}, \quad \forall int = 1, p \in P \quad (3.4)$$

Balance por componente en los interceptores

El balance por componente en los interceptores en la red de intercepción es requerido para determinar la concentración de los contaminantes a la entrada de estos ($ci_{c,int,p}^{in}$):

$$FI_{int,p}ci_{c,int,p}^{in} = \sum_{i=1}^I fsi_{i,int,p}cs_{c,i,p}, \quad \forall c \in C, int \in INT; p \in P \quad (3.5)$$

Balance global de masa en la red de intercepción después de la etapa 1

De acuerdo con el modelo formulado, sólo un contaminante es tratado en cada etapa en la red de intercepción, donde el número de etapas requeridas es el mismo que el número de contaminante a trata. De esta manera, el flujo en cada etapa en la red de intercepción incluyendo la primera etapa ($FI_{int \neq 1,p}$), es determinada por la sumatoria de flujos que son enviados de la en la etapa anterior ($fii_{int=int-1,p}$). Esto queda definido de la manera siguiente:

$$FI_{int,p} = \sum_{int=int-1}^{int=NT} fii_{int,p}, \quad \forall int \neq 1, p \in P \quad (3.6)$$

Por otra parte el flujo que sale de la última etapa es dividido y enviado a las etapas donde existe requerimientos de agua en las etapas de procesamiento ($fis_{int=NT,p}$) y/o al medio ambiente ($fie_{int=NT,p}$):

$$FI_{int,p} = \sum_{j=1}^J fis_{int,j,p} + fie_{int,p}, \quad \forall int = NT, p \in P \quad (3.7)$$

De igual manera, la relación siguiente es usada para determinar la concentración en las etapas internas de la red de intercepción:

$$FI_{int,p} ci_{c,int,p}^{in} = \sum_{int=int-1}^{int=NT} fii_{int,p} ci_{c,int,p}^{out}, \quad \forall c \in C, int \neq 1, p \in P \quad (3.8)$$

Donde $ci_{c,int,p}^{in}$ representa la concentración del contaminante en la entrada del interceptor int y $ci_{c,int,p}^{out}$ es la concentración del contaminante en la salida del interceptor int .

Es importante resaltar que un interceptor ficticio es colocado al final de las unidades de tratamiento con la finalidad de que funcione como un derivador o *bypass*; por lo que el interceptor tiene un costo de cero y no remueve ningún contaminante.

Balances de intercepción

En este trabajo se considera al factor $(RR_{c,int})$ para presentar la eficiencia de cada tecnología int para remover el contaminante c . Este factor es determinado previo al proceso de optimización y es usado para determinar la concentración del contaminante a la salida de cada interceptor ($ci_{c,int,p}^{out}$):

$$ci_{c,int,p}^{out} = ci_{c,int,p}^{in} (1 - RR_{c,int}), \quad \forall c \in C, int \in INT, p \in P \quad (3.9)$$

Para el cálculo de los costos de operación del sistema es necesario conocer la masa que es removida ($cim_{c,int,p}$), donde puede usarse la siguiente ecuación:

$$cim_{c,int,p} = FI_{int,p} (ci_{c,int,p}^{in} - ci_{c,int,p}^{out}), \quad \forall c \in C, int \in INT, p \in P \quad (3.10)$$

Balance global en el mezclador en la descarga de efluentes

El flujo que es descarga al medio ambiente por el parque eco-industrial reconfigurado (FE_p) está en función de las proporciones de flujo provenientes de las unidades de proceso ($fse_{i,p}$) y desde la zona de regeneración ($fie_{int,p}$):

$$EP_p = \sum_{i=1}^I fse_{i,p} + \sum_{int=1}^{INT} fie_{int,p}, \quad \forall p \in P \quad (3.11)$$

Balance por componente en el mezclador en la descarga de efluentes

Esta ecuación se obtiene multiplicando los términos del balance previo por la concentración:

$$EP_p CEP_{c,p} = \sum_{i=1}^I fse_{i,p} cs_{c,i,p} + \sum_{int=NT}^{NT} fie_{int,p} ci_{c,int,p}^{out}, \quad \forall c \in C, p \in P \quad (3.12)$$

Se puede apreciar que el flujo (EP_p) y la concentración de los contaminantes ($CEP_{c,p}$) descargados al medio ambiente están relacionados a la técnica del MFA ya que estas descargas son las que impactan en la cuenca hidrológica más severamente.

Restricciones ambientales en la cuenca hidrológica

La industria está restringida a cumplir con la normativa ambiental asociada a los contaminantes que descarga al medio ambiente dependiendo del impacto que estos tienen en el mismo. La normativa ambiental para los efluentes se maneja en concentración permitida, por lo cual las descargas no deben ser superiores a estas concentraciones.

$$CEP_{c,p} \leq CEP_{c,p}^{\max} \quad (3.13)$$

Tuberías

Este trabajo considera los costos de tubería, el cual es muy importante para la reconfiguración en la conformación de parques eco-industriales (involucra las largas distancias a las que pueden ser transportados los flujos entre una planta y otra), ya que el modelo matemático determina aquellas corrientes que pueden ser intercambiadas y a cuáles plantas industriales. La siguiente expresión determina la existencia de tuberías entre *sources* y *sinks* en los procesos industriales.

$$M_{fss_{i,j,p}}^{\min} x_{i,j,p}^1 \leq fss_{i,j,p} \leq M_{fss_{i,j,p}}^{\max} x_{i,j,p}^1, \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P \quad (3.14)$$

Donde $x_{i,j,p}^1$ es una variable binaria usado por el modelo para establecer la existencia de tubería entre los procesos en un parque eco-industrial p .

Para la tubería entre las corrientes de proceso (*sources*) y la red de intercepción en el parque eco-industrial se emplea la siguiente expresión:

$$M_{fsi_{i,int,p}}^{\min} x_{i,int,p}^2 \leq fsi_{i,int,p} \leq M_{fsi_{i,int,p}}^{\max} x_{i,int,p}^2, \quad \forall i \in I, \text{int} = 1, p \in P \quad (3.15)$$

Donde $x_{i,int,p}^2$ es una variable binaria asociada a la existencia de mencionado tramo de tuberías.

Una vez que el tratamiento se lleva a cabo en la unidad central, se debe considerar la tubería en la salida de la red de interceptación a los sumideros de proceso:

$$M_{fis_{int,j,p}}^{\min} x_{int,j,p}^3 \leq fis_{int,j,p} \leq M_{fis_{int,j,p}}^{\max} x_{int,j,p}^3, \quad \forall \text{int} = NT, j \in J, p \in P \quad (3.16)$$

Donde $x_{int,j,p}^3$ es la variable binaria para este caso.

La tubería entre la salida de la unidad de tratamiento y el mezclador antes de la descarga al medio ambiente es considerada:

$$M_{fie_{int,p}}^{\min} x_{int,p}^4 \leq fie_{int,p} \leq M_{fie_{int,p}}^{\max} x_{int,p}^4, \quad \forall \text{int} = NT, p \in P \quad (3.17)$$

Donde $x_{int,p}^4$ es la variable binaria que determina la existencia de la tubería entre la red de interceptación y la corriente de descarga. En la relación anterior, $M^{\min}$ representa el valor mínimo de flujo requerido para considerar esa existencia, $M^{\max}$ es el valor máximo para el flujo asociado a cada sección de las tuberías.

Función objetivo económica

La función objetivo para el aspecto económico consiste en la minimización del costo anual total (TAC), que incluye los costos por agua fresca (FWC), costo de tratamiento (TC) y costos de tubería (PC); los términos que están incluidos en el TAC se describen a continuación.

Costos de agua fresca

El costo para agua fresca, según a los requerimientos del sistema, es estimado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$FWC = H_Y Dsh \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{w=1}^W CU_w fws_{w,j,p} \quad (3.18)$$

Donde H_Y son las horas de operación anuales de los parques eco-industriales, Dsh representa un factor de conversión de segundos a horas y CU_w es el costo unitario del tipo de agua fresca w .

Costos de tratamiento

La función de costo para los interceptores incluye costos fijos y variables de la siguiente manera:

$$TC = K_F \sum_{p=1}^P \sum_{int=1}^{INT} CU_{int} z_{int,p}^{treat} + H_Y \sum_{p=1}^P \sum_{int=1}^{INT} \sum_{c=1}^C CUM_{c,int} cim_{c,int,p} \quad (3.19)$$

Donde K_F es un factor usado para la inversión, CU_{int} es el costo fijo para el interceptor int , $z_{int,p}^{treat}$ representa la variable binaria asociada a la existencia de los interceptores y $CUM_{c,int}$ es el costo unitario para la masa removida del contaminante c en cada interceptor.

Obsérvese que un par de restricciones es necesaria para activar las variables empleadas para determinar la existencia de los interceptores.

$$M_{FI_{int,p}}^{\min} z_{int,p}^{treat} \leq FI_{int,p} \leq M_{FI_{int,p}}^{\max} z_{int,p}^{treat}, \quad \forall int \in INT, p \in P \quad (3.20)$$

Costos de tubería

Los costos para cada tramo de tubería están determinados como sigue:

$$PC = K_F \sum_{p=1}^P \left[cpp \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{D_{i,j,p}^1 fss_{i,j,p}}{3600\rho v} + x_{i,j}^1 D_{i,j,p}^1 CUP + cpp \sum_{int=1}^{INT=1} \sum_{i=1}^I \frac{D_{i,int,p}^2 fsi_{i,int,p}}{3600\rho v} + x_{i,int}^2 D_{i,int,p}^2 CUP + \right. \\ \left. cpp \sum_{int=NT}^{INT=NT} \sum_{j=1}^J \frac{D_{int,j,p}^3 fis_{int,j,p}}{3600\rho v} + x_{int,j}^3 D_{int,j,p}^3 CUP + cpp \sum_{int=NT}^{INT=NT} \frac{D_{int,p}^4 fie_{int,p}}{3600\rho v} + x_{int}^4 D_{int,p}^4 CUP \right] \quad (3.21)$$

Donde D representa la longitud de cada segmento de tubería, ρ es la densidad, v es la velocidad, cpp es un parámetro para los costos de tubería entre planta y CUP representa el costo unitario de la tubería.

En base a lo anterior el TAC es igual a su suma de los términos anteriores:

$$TAC = FWC + TC + PC \quad (3.22)$$

3.1.2 Análisis ambiental empleando la técnica de MFA (Material Flow Analysis) para el sistema de parques eco-industriales.

MFA (*Material Flow Analysis*, de sus siglas en inglés) es una técnica comúnmente utilizada para establecer el impacto ambiental en cuentas hidrológicas. Determina que para el análisis ambiental la cuenca hidrológica debe ser dividida en tramos. En cada tramo se realiza una estimación de la concentración de los contaminantes y de esta manera se obtiene el perfil de concentración de los componentes que son de interés en el análisis a lo largo de toda la cuenca, estableciendo con ello la repercusión ambiental que producen. En la formulación de esta técnica se obtiene con siguientes expresiones matemáticas:

Balance global para cada tramo

El flujo en cada tramo r (Q_r) debe de ser igual al flujo que entra en el mismo tramo r (Q_{r-1}), más la precipitación (P_r), las descargas industriales directas (D_r), las descargas residenciales (H_r), la suma de los flujos de los tributarios que entran al tramo ($FT_{r,t}$), las descargas industriales que provienen de los parques industriales (conjunto de industrias cercanas) a reconfigurarse para conformar parques eco-industriales p asociados a cada tramo de la cuenca hidrológica r ($IP_{p(r)}$) y las descargas de los parques eco-industriales p al tramo r después de la reconfiguración ($EP_{p(r)}$), menos aquellos términos que representan extracciones de la cuenca (filtración y evaporación) (L_r) y usos (U_r) en los r tramos de río. Lo anterior se representa matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$Q_r = Q_{r-1} + P_r + D_r + H_r + \sum_{t=1}^{N_{t(r)}} FT_{r,t} + IP_{p(r)} + EP_{p(r)} - L_r - U_r, \forall r \in R \quad (3.23)$$

Donde $N_{t(r)}$ se refiere al número total de tributarios que son descargadas en el tramo r . En la relación anterior, el flujo que abandona el tramo $r-1$ es el mismo que el flujo que entra en el tramo r , así como el que es requerido para hacer una asociación entre el parque industrial disponible a ser reconfigurado y el tramo donde el parque descarga sus efluentes.

Balance por componente para cada tramo

Para el balance de componente para cada tramo, cada término de la ecuación anterior es multiplicado por la concentración del contaminante estudiado para obtener un balance en términos de masa en lugar de flujo. Además es necesario el termino reactivo ($\int_{V=0}^{V_r} r_{c,r} dV_r$), el cual considera las reacciones químicas que ocurren en cada tramo; usualmente las reacciones químicas degradan a los componentes en el sistema. El balance por componente para cada tramo puede ser escrito:

$$Q_r CQ_{c,r} = Q_{r-1} CQ_{c,r-1} + P_r CP_{c,r} + D_r CD_{c,r} + H_r CH_{c,r} + \sum_{t=1}^{N_{t(r)}} FT_{r,t} CT_{c,r,t} + IP_{p(r)} CIP_{c,p(r)} + EP_{p(r)} CEP_{c,p(r)} - L_r CL_{c,r} - U_r CU_{c,r} - \int_{V=0}^{V_r} r_{c,r} dV_r, \quad \forall c \in C, r \in R \quad (3.24)$$

Balance global en cada tributaria

En base a la técnica MFA, cada tramo puede recibir flujos desde algunos tributarios; estos tributarios son canales o riachuelos que no pertenecen estrictamente a la cuenca hidráulica principal. Sin embargo, pueden arrastrar contaminantes que al recibir la cuenca principal tienen repercusión. El flujo total descargado desde el tributario t al tramo r ($FT_{r,t}$) es igual a la suma de los siguientes tipos de descargas: descargas residuales sin tratamiento ($S_{r,t}^{untreated}$), con tratamiento ($S_{r,t}^{treated}$), descargas industriales ($I_{r,t}$), descargas de origen pluvial ($P_{r,t}$), descargas directas ($D_{r,t}$), descargas procedentes desde industrias dentro de los parques industriales seleccionados a ser reajustadas como un parque eco-industrial p descargando al tributario d del tramo r ($IP_{p(r)}$) y los efluentes de los parques eco-industriales p descargados al tributario t del tramo r ($EP_{p(r)}$), menos las pérdidas ($L_{r,t}$) y uso o extracción ($U_{r,t}$) de agua. En base a lo anterior, el balance queda definido como sigue:

$$FT_{r,t} = S_{r,t}^{untreated} + S_{r,t}^{treated} + I_{r,t} + P_{r,t} + D_{r,t} + IP_{p(r,t)} + EP_{p(r,t)} - L_{r,t} - U_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.25)$$

Balance por componente para cada tributaria

De la misma manera que para el caso de los tramos de río, la siguiente relación es obtenida multiplicando el balance para cada tributario por la concentración del contaminante, llevándonos a obtener la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 FT_{r,t}CT_{c,r,t} = & S_{r,t}^{untreated}CS_{c,r,t}^{untreated} + S_{r,t}^{treated}CS_{c,r,t}^{treated} + I_{r,t}CI_{c,r,t} + P_{r,t}CP_{c,r,t} + D_{r,t}CD_{c,r,t} \\
 & + IP_{p(r,t)}CIP_{c,p(r,t)} + EP_{p(r,t)}CEP_{c,p(r,t)} - L_{r,t}CL_{c,r,t} - U_{r,t}CU_{c,r,t} - \int_{V=0}^{V_{r,t}} r_{c,r,t}dV_{r,t}, \quad \forall c \in C, r \in R, t \in T
 \end{aligned} \quad (3.26)$$

Términos reactivos

Estos términos representan las reacciones químicas y bioquímicas que ocurren en la cuenca hidrológica incluido en las ecuaciones (3.23) y (3.25) están son descritas a continuación:

$$\int_{V=0}^{V_r} r_{c,r}dV_r = k_c (CQ_{c,r})^{\sigma_c} V_r, \quad \forall c \in C, r \in R \quad (3.27)$$

$$\int_{V=0}^{V_{r,t}} r_{c,r,t}dV_{r,t} = k_c (CT_{c,r,t})^{\sigma_c} V_{r,t}, \quad \forall c \in C, r \in R, t \in T \quad (3.28)$$

Donde k_c es la constante cinética para el contaminante c , σ_c es el orden de reacción para cada componente, $CQ_{c,r}$ es la concentración de los contaminantes en el tramo r y V_r es el volumen del tramo; mientras que $CT_{c,r,t}$ es la concentración del contaminante c en el tributario t descargada al tramo r y $V_{r,t}$ es el volumen en el tributario. Cabe resaltar que los parámetros k_c , σ_c , V_r y $V_{r,t}$ deben ser obtenidos experimentalmente.

Descargas y usos de origen agrícola

El sector agrícola demanda enormes cantidades de agua. Misma que es tomada de la cuenca hidrológica. Además, que las tierras de cultivo presentan filtración donde una parte del agua empleada para esta actividad es vertida a la cuenca por este fenómeno. Considerando estos puntos, las ecuaciones que modelan las descargas y extracciones por la actividad agrícola son representadas como sigue:

$$D_{r,t} = \alpha_{r,t}A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.29)$$

$$U_{r,t} = \beta_{r,t} A_{r,t}, \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.30)$$

Donde $\alpha_{r,t}$ es un parámetro conocido para el agua requerida por área cultivada en unidades de $m^3/acre$ s, $\beta_{r,t}$ ese el agua descargada por área cultivada en unidades de $m^3/acre$ s. $A_{r,t}$ es el área cultivada relativa al tributario t que descarga al tramo r en m^3 .

Función Objetivo Ambiental

La función ambiental considerada para establecer la sustentabilidad de la cuenca hidrológica en la disposición final, se determina con la minimización de la concentración de los contaminantes descargados en el área de captación para asegurar la degradación de los contaminantes:

$$EOF = CQ_{c,R} \quad (3.31)$$

Optimización Multi-objetivo

El problema es formulado como un modelo de programación multi-objetivo, donde uno de ellos es la minimización del TAC y el otro la minimización de EOF , de la siguiente manera:

$$\text{Objective Function} = \text{Min } TAC; \text{Min } EOF \quad (3.32)$$

3.2 Formulación del modelo para óptima localización de un sistema de biorefinerías considerando aspectos económicos y ambientales.

El planteamiento de este modelo resulta de la propuesta que se define en la superestructura que se muestra en la Figura 3.3. Los índices más importantes son: r' para segmento de la cuenca hidrológica donde es posible localizar una biorefinería, k para el tipo de biocombustible producido (bioetanol y biodiesel) y j es el conjunto de consumidores donde los biocombustibles son distribuidos.

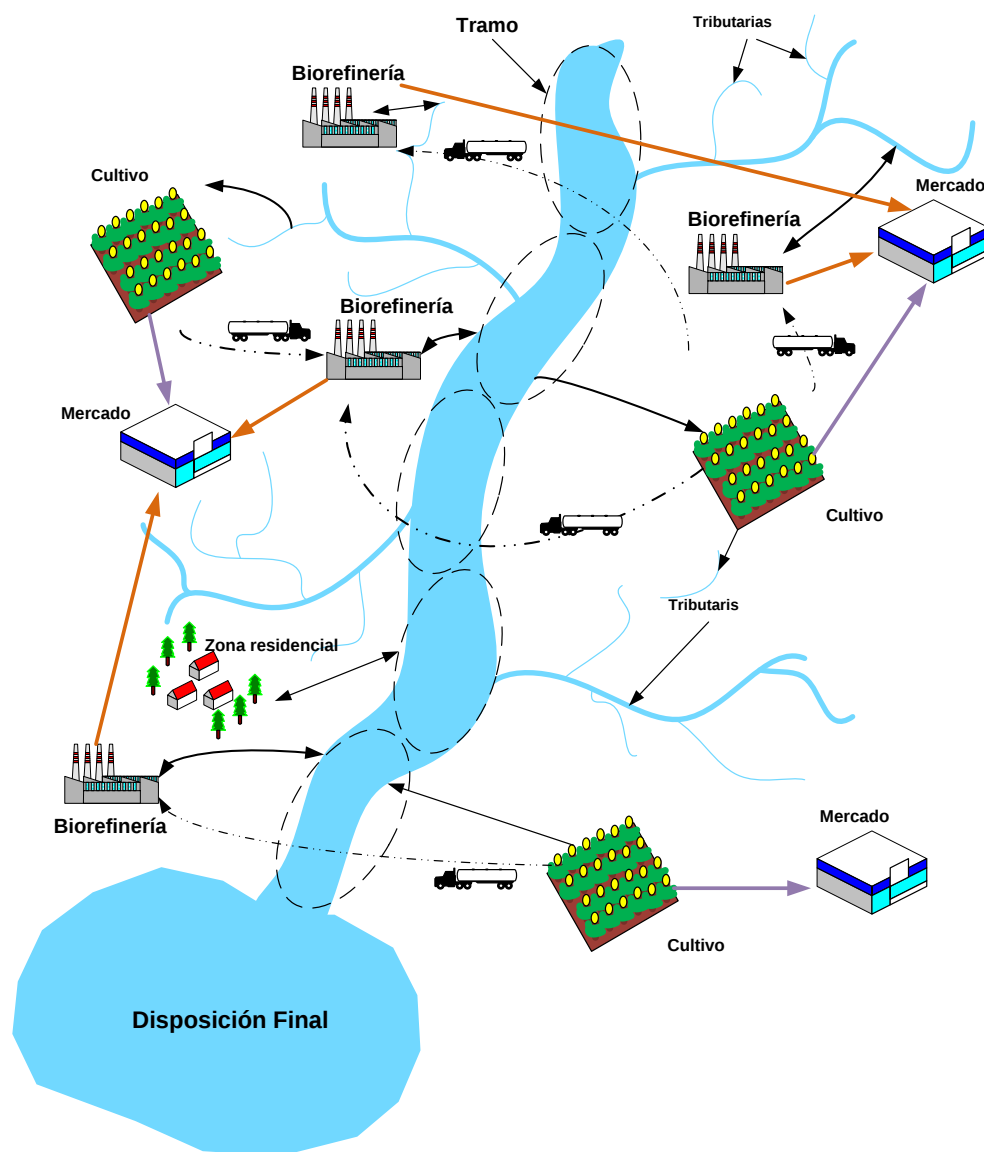


Figura 3.3 Superestructura para la localización óptima de biorefinerías considerando la interacción con la cuenca hidrológica.

Para el análisis ambiental aplicado la técnica del MFA (*Material Flow Analysis*), el río es dividido en segmentos donde r es el conjunto de tramos de río y t son las tributarias que descargan su flujo en la cuenca hidrológica principal, en cada segmento se realiza un análisis para determinar la repercusión por consumo de agua fresca que demandan las biorefinerías instaladas y la actividad agrícola necesaria para la producción de biomasa, el análisis se culmina en la disposición final de la cuenca hidrológica analizada. Para la representación del estatus y definición de la procedencia de las corrientes aparecen subíndices y superíndices que indican de donde o hacia donde corresponden.

3.2.1 Análisis del impacto ambiental por la instalación óptima de biorefinerías.

Para el análisis ambiental aplicando la técnica del MFA, el modelo matemático está definido por las siguientes ecuaciones:

Condiciones iniciales

En las condiciones iniciales antes de la instalación de las biorefinerías, $Q_r^{Initial}$ es el flujo que sale del tramo de río r es igual al $Q_{r-1}^{Initial}$ flujo que entra en el tramo de río r , más la precipitación P_r , las descargas industriales a la cuenca hidrológica D_r , descargas residenciales H_r , la suma de los efluentes procedentes de los tributarios al tramo de río $FT_{r,t}$, la suma de los efluentes descargados desde los campos de cultivo para la producción de biomasa (residuos de cultivo) $w_{m,r}^{discharge-feedstocks_Initial}$, la suma de los efluentes que son extraídos por el uso en los campos de cultivo $w_{m,r}^{used-feedstocks_Initial}$, menos las perdidas por evaporación y filtración L_r y extracción para uso agrícola, residencial o industrial (ya establecida en la cuenca ajena al sistema de biorefinerías que se propone), etc., U_r en la sección de la cuenca hidrológica r .

$$Q_r^{Initial} = Q_{r-1}^{Initial} + P_r + D_r + H_r + \sum_{t=1}^{N_{(t)}} FT_{r,t} + \sum_m w_{m,r}^{discharge-feedstocks_Initial} - \sum_m w_{m,r}^{used-feedstocks_Initial} - L_r - U_r, \quad \forall r \quad (3.33)$$

El agua empleada en condiciones iniciales para producir materia prima (biomasa) $w_{m,r}^{used-feedstocks_Initial}$ es igual al producto del factor $\beta_{m,r}^{feedstocks}$ que representa al agua consumida para producir una tonelada de residuo de cultivo por hectárea, $\alpha_{m,r}^{feedstock}$ que es definido como la producción de residuo de cultivo por hectárea y el área actual que está sembrada para cada tipo de cultivo.

$$w_{m,r}^{used-feedstocks_Initial} = \beta_{m,r}^{feedstocks} \alpha_{m,r}^{feedstock} [a_{m,r}^{exist}], \quad \forall m, \forall r \quad (3.34)$$

El agua descargada en la producción de biomasa en las condiciones iniciales es igual al producto del factor $\gamma_{m,r}^{discharge}$ que esta definitivo como la relación entre el agua descargada y el agua usada en los campos de cultivo, y el flujo de agua que es usada en los campos de cultivo.

$$w_{m,r}^{discharge-feedstock_Initial} = \gamma_{m,r}^{discharge} w_{m,r}^{used-feedstock_Initial}, \quad \forall m, \forall r \quad (3.35)$$

Condiciones finales

El flujo de agua que sale de cada tramo de río en las condiciones finales (Q_r) es igual al flujo que entra (Q_{r-1}) más el flujo por precipitación (P_r), las descargas industriales (D_r), descargas residenciales (H_r), la suma de efluentes que entran al tramo de río por los tributarios ($FT_{r,t}$), efluentes provenientes desde las biorefinerías ($w_{k,r}^{discharge-biorefinery}$) y todos los efluentes que son descargados desde los campos de cultivo en la producción de materia prima ($w_{m,r}^{discharge-feedstocks}$), menos la suma del agua usada en la producción de materia prima (biomasa) ($w_{m,r}^{used-feedstocks}$) y el agua usada por las biorefinerías ($w_{k,r}^{used-biorefinery}$), menos el flujo de pérdidas de agua debido a los procesos naturales como evaporación y filtración (L_r) y por otros uso en actividades humanas como la agricultura (U_r):

$$Q_r = Q_{r-1} + P_r + D_r + H_r + \sum_{t=1}^{N(t)} FT_{r,t} + \sum_m w_{m,r}^{discharge-feedstocks} + \sum_k w_{k,r'}^{discharge-biorefinery} - \sum_m w_{m,r}^{used-feedstocks} - \sum_k w_{k,r'}^{used-biorefinery} - L_r - U_r, \quad \forall r \quad (3.36)$$

Balance general en cada tributaria

El agua que descarga cada tributario ($FT_{r,t}$) es igual a los efluentes sin tratamiento que son descargados a la tributaria ($S_{r,t}^{untreated}$), más las descargas con tratamiento ($S_{r,t}^{treated}$), descargas industriales ($I_{r,t}$), precipitación ($P_{r,t}$), descargas directas ($D_{r,t}$), menos las pérdidas para la precipitación y evaporación ($L_{r,t}$) y el agua usada ($U_{r,t}$).

$$FT_{r,t} = S_{r,t}^{untreated} + S_{r,t}^{treated} + I_{r,t} + P_{r,t} + D_{r,t} - L_{r,t} - U_{r,t}, \quad \forall r, \forall t \quad (3.37)$$

Usos y descargas Agrícola

Los usos y descargas provenientes de la actividad agrícola ajena a la producción de materia prima para biorefinerías está representado en el modelo como:

$$D_{r,t} = \alpha_{r,t}^{agriculture} A_{r,t}^{agriculture}, \quad \forall r, \forall t \quad (3.38)$$

$$U_{r,t} = \beta_{r,t}^{agriculture} A_{r,t}^{agriculture}, \quad \forall r, \forall t \quad (3.39)$$

Donde $\alpha_{r,t}^{agriculture}$ es el agua descarga por área agrícola, $\beta_{r,t}^{agriculture}$ es un factor por el agua requerida y área agrícola, y $A_{r,t}^{agriculture}$ es el área de los campos de cultivo en la actividad agrícola.

Efluentes descargados desde los campos de cultivo en la producción de biomasa (residuos de cultivo)

Una parte del agua que es usada para cultivar los cultivos m del campo en el tramo r ($w_{m,r}^{used-feedstock}$) es descargado como efluente ($w_{m,r}^{discharge-feedstock}$) dependiendo del factor de conversión ($\gamma_{m,r}^{discharge}$):

$$w_{m,r}^{discharge-feedstock} = \gamma_{m,r}^{discharge} w_{m,r}^{used-feedstock}, \quad \forall m, \forall r \quad (3.40)$$

En la ecuación anterior puede apreciarse que el factor de conversión $\gamma_{m,r}^{discharge}$ depende del tipo de cultivo y localización de campo. Es importante mencionar que este parámetro se calcula experimentalmente.

Agua usada para cultivar materia prima

La contribución más importante en este proyecto es considerar la repercusión que el agua usada por la cadena de suministro en la operación del sistema de biorefinerías. Donde, el agua usada para la producción de biomasa del tipo de cultivo m del campo en r ($w_{m,r}^{used-feedstocks}$) es igual del factor $\beta_{m,r}^{feedstocks}$ multiplicado por la biomasa producida ($f_{m,r}^{Prod-feedstocks}$):

$$w_{m,r}^{used-feedstocks} = \beta_{m,r}^{feedstocks} f_{m,r}^{Prod-feedstocks}, \quad \forall m, \forall r \quad (3.41)$$

El factor de conversión $\beta_{m,r}^{feedstocks}$ depende del tipo de cultivo, de la localización del campo donde se encuentra sembrado. Tal localización incluye factores como: tipo de suelo, clima, etc. y es determinado de manera experimental.

Descarga de efluentes por las nuevas biorefinerías

Las nuevas biorefinerías producen un flujo elevado de efluentes ($w_{k,r}^{discharge-biorefinery}$) que es resultado del producto del factor ($\alpha_{k,m}^{ww-biorefinery}$) y la producción de biocombustibles ($P_{k,m,r}$):

$$w_{k,r}^{discharge-biorefinery} = \sum_m \alpha_{k,m}^{ww-biorefinery} P_{k,m,r}^{Bio}, \quad \forall k, \forall r \quad (3.42)$$

Donde el factor para la descarga de efluentes $\alpha_{k,m}^{ww-biorefinery}$ depende del tipo de producto y el agua usada para producir biomasa.

Agua usada por las biorefinerías

El agua requerida por las biorefinerías ($w_{k,r}^{used-biorefinery}$) es determinada por el factor de conversión ($\alpha_{k,m}^{used-biorefinery}$) y la producción de los biocombustibles en esta planta ($P_{k,m,r}$):

$$w_{k,r}^{used-biorefinery} = \sum_m \alpha_{k,m}^{used-biorefinery} P_{k,m,r}^{Bio}, \quad \forall k, \forall r' \quad (3.43)$$

Donde el factor de conversión $\alpha_{k,m}^{used-biorefinery}$ depende del tipo de producto y la cantidad de biomasa empleada en la biorefinería.

Área usada para cultivar biomasa

Una de las consideraciones dispuestas para la instalación de biorefinerías es la disposición de biomasa, y con ello el área disponible para cultivar la biomasa necesaria que permita cubrir con este requerimiento. El área empleada para sembrar diversos cultivos m de los cuales los residuos de estos son empleados como materia prima para la producción de biocombustibles en la localización r ($a_{m,r}^{max}$) debe ser mayor que el área existente cultivada actualmente ($a_{m,r}^{exist}$) más el área nueva para satisfacer la demanda de biomasa ($a_{m,r}^{new}$):

$$a_{m,r}^{exist} + a_{m,r}^{new} \leq a_{m,r}^{max}, \quad \forall m, \forall r \quad (3.44)$$

Agua requerida para satisfacer las biorefinerías instaladas

El impacto ambiental en la instalación de un sistema de biorefinerías es determinado como el agua requerida para satisfacer la demanda de este recurso para los procesos industriales y agrícolas, determinado como:

$$Water^{required} = Q_{final}^{Initial} - Q_{final} \quad (3.45)$$

3.2.2 Operación de biorefinerías

Las ecuaciones que presentan la operación de las biorefinerías consideran la producción de granos y biomasa en los campos de cultivo para satisfacer la demanda de las plantas industriales.

Además del transporte de estos a las biorefinerías para ser procesados, los granos y biocombustibles distribuidos a los consumidores.

Producción en los campos de cultivo

Los residuos de cultivo m producidos del campo en r ($f_{m,r}^{Prod-feedstock}$) corresponden al producto del factor de conversión $\alpha_{m,r}^{feedstock}$ y el área cultivada (existente y nueva):

$$f_{m,r}^{Prod-feedstock} = \alpha_{m,r}^{feedstock} [a_{m,r}^{exist} + a_{m,r}^{new}], \quad \forall m, \forall r \quad (3.46)$$

Donde el factor de conversión $\alpha_{m,r}^{feedstock}$ depende del tipo de cultivo del que provenga la biomasa, además de la calidad del campo, determinado por reportes previos a la producción actual.

Así también, se debe tomar en cuenta que la biomasa empleada para alimentar a las biorefinerías es un subproducto agrícola. Por ejemplo, el principal producto de la planta de maíz es la mazorca para destino alimenticio y el subproducto son los residuos lignocelulósicos que en este caso es la materia prima para el sistema de biorefinerías que se propone. De esta manera, el principal producto g para el campo r asociado a los residuos de cultivo m ($f_{g(m),r}^{Prod-grains}$) es determinado multiplicando el factor de conversión ($\alpha_{g(m),r}^{grains}$) y el área cultivada:

$$f_{m,r}^{Prod-grains} = \alpha_{m,r}^{grains} [a_{m,r}^{exist} + a_{m,r}^{new}], \quad \forall m, \forall r \quad (3.47)$$

Distribución de biomasa a las biorefinerías

Los residuos de cultivo producidos m en el campo en r ($f_{m,r}^{Prod-feedstock}$) puede ser distribuido a alguna biorefinería localizada en el sitio r' ($f_{m,r,r'}$):

$$f_{m,r}^{Prod-feedstock} = \sum_{r'} f_{m,r,r'}, \quad \forall m, \forall r \quad (3.48)$$

Balance de masa para materia prima

El flujo de biomasa proveniente del tipo de cultivo m producido en el sitio r' ($F_{m,r'}$) puede ser distribuido para ser enviado a alguna biorefinería que se encuentra en la localización de la sección r ($f_{m,r',r}$):

$$F_{m,r'} = \sum_r f_{m,r',r}, \quad \forall m, \forall r' \quad (3.49)$$

Activación de variables binarias para determinar la existencia de las biorefinerías

Para determinar la existencia de una biorefinería, una variable binaria $y_{m,r}^{Biorefinery}$ es empleada. Particularmente, cuando la variable binaria es igual a uno, entonces una biorefinería es requerida en un sitio y cuando la variable es cero la biorefinería no es requerida y no es instalada. Lo anterior se modela de la siguiente manera:

$$F_{m,r'} \leq F_{m,r'}^{\max} y_{m,r'}^{Biorefinery}, \quad \forall m, \forall r' \quad (3.50)$$

En la ecuación, el parámetro $F_{m,r'}^{\max}$ es usado como límite superior para restringir la capacidad de la planta.

Balance de masa de productos en la biorefinería

La producción de biocombustibles k en la biorefinería en r' ($P_{k,r'}$) depende de la tecnología empleada, lo cual está asociado al factor ($\alpha_{k,m}^{bioref}$), y la materia prima usada m ($F_{m,r}$):

$$P_{k,m,r'}^{Bio} = \alpha_{k,m}^{Bioref} F_{m,r'}, \quad \forall k, \forall m, \forall r' \quad (3.51)$$

$$P_{k,r'} = \sum_m P_{k,m,r'}^{Bio}, \quad \forall k, \forall r' \quad (3.52)$$

Distribución de productos

El total de productos k obtenidos por la biorefinería en r' ($P_{k,r'}$) son distribuidos a todos los consumidores localizados en r' ($P_{k,r',j}^{prod-market}$):

$$P_{k,r'} = \sum_j P_{k,r',j}^{prod-market}, \quad \forall k, \forall r' \quad (3.53)$$

Productos a los consumidores

El producto k del consumidor en r ($P_{k,r}$) debe de ser menor que la demanda máxima ($P_{k,r}^{prod-market-Mx}$) de ese consumidor:

$$\sum_{r'} P_{k,r',j}^{prod-market} \leq P_{k,j}^{prod-market-Max}, \quad \forall k, \forall j \quad (3.54)$$

Distribución de los granos a los consumidor

Los granos g producidos en el campo r ($f_{g,r}^{prod-grains}$) son obtenidos para satisfacer la demanda de los consumidores r' ($f_{g,r',j}^{grain-market}$):

$$f_{m,r}^{Prod-grains} = \sum_j f_{m,r,j}^{grain-market}, \quad \forall m, \forall r \quad (3.55)$$

Granos

La cantidad total de granos producidos enviados a los consumidores ($f_{g,r',j}^{grain-market}$) debe de ser menor o igual a la demanda máxima de los mismos ($f_{g,r',j}^{grain-market}$):

$$\sum_r f_{m,r,j}^{grain-market} \leq f_{m,j}^{grain-market-Max}, \quad \forall m, \forall j \quad (3.56)$$

Ganancia por productos

Las ganancias por la venta de los productos ($G^{products}$) es igual al producto del precio unitario de los productos ($UC_k^{product}$) y el producto distribuido a cada consumidor ($P_{k,r}$):

$$G^{products} = \sum_k \sum_{r'} UC_k^{product} P_{k,r'} \quad (3.57)$$

Ganancias obtenidas por la venta de granos

Las ganancias obtenidas por la venta de granos (G^{grains}) se calcula multiplicando el precio unitario de cada tipo de grano (UC_g^{grains}) y los granos g producidos en r ($f_{g,r}^{prod-grains}$):

$$G^{grains} = \sum_m \sum_r UC_m^{grains} f_{m,r}^{Prod-grains} \quad (3.58)$$

Costos de capital para las biorefinerías

El costo de capital para las biorefinerías ($CapCost^{Biorefineries}$) está asociado una parte fija ($FC_{m,r}^{Biorefinery}$) y a un costo variable ($VC_{m,r}^{Biorefinery} (F_{m,r})^{\sigma_{m,r}^{Biorefinery}}$):

$$CapCost^{Biorefineries} = \sum_m \sum_{r'} FC_{m,r'}^{Biorefinery} y_{m,r'}^{Biorefinery} + \sum_m \sum_{r'} VC_{m,r'}^{Biorefinery} (F_{m,r'})^{\sigma_{m,r'}^{Biorefinery}} \quad (3.59)$$

Donde la variable binaria $y_{m,r}^{Biorefinery}$ es activada si existe una biorefinería en esa localización.

Costos de operación para las biorefinerías

Los costos de operación asociados a las biorefinerías ($OpCost^{Biorefineries}$) es determinado con la multiplicación del costo total unitario para todas las biorefinerías ($UC^{Biorefinery}$) y la materia prima procesada en la localización r' ($F_{m,r'}$).

$$OpCost^{Biorefineries} = \sum_m \sum_{r'} UC^{Biorefinery} F_{m,r'} \quad (3.60)$$

Costos de operación en la producción de materia prima

Los costos de operación para producir materia prima para las biorefinerías ($OpCost^{Feedstocks}$) se determina considerando la suma de los costos unitarios de cada cultivo m de donde provengan los residuos lignocelulósicos de cada campo de cultivo en r ($UC_{m,r}^{feedstocks}$) y el flujo de materia prima producida.

$$OpCost^{Feedstocks} = \sum_m \sum_r UC_{m,r}^{feedstocks} f_{m,r}^{Prod-feedstock} \quad (3.61)$$

Costo de agua para las biorefinerías

Los costos por consumo de agua para las biorefinerías ($OpCost^{water-biorefineries}$) es igual al costo unitario del agua ($UC_{k,r'}^{water-used-biorefineries}$) por el agua total empleada ($w_{k,r'}^{used-biorefineries}$) en la producción de biocombustibles k en el sitio r' :

$$OpCost^{water-biorefineries} = \sum_k \sum_{r'} UC_{k,r'}^{water-used-biorefineries} w_{k,r'}^{used-biorefineries} \quad (3.62)$$

Donde el costo unitario del agua $UC_{k,r'}^{water-used-biorefineries}$ puede depender de la tarifa que cada región tenga.

Costo asociado al uso de agua para producción de materia prima

El costo asociado al consumo de agua para la producción de residuos de cultivo ($OpCost^{water-feedstocks}$) depende del costo unitario del agua para uso agrícola dependiendo de la zona para cada cultivo m del campo en r ($UC_{m,r}^{water-feedstocks}$) y el agua total requerida para la producción del cultivo m en el sitio r ($w_{m,r}^{used-feedstocks}$):

$$OpCost^{water-feedstocks} = \sum_m \sum_r UC_{m,r}^{water-feedstocks} w_{m,r}^{used-feedstocks} \quad (3.63)$$

Cabe destacar que el costo unitario del agua $UC_{m,r}^{water-feedstocks}$ depende de la cantidad de agua necesaria para la producción de biomasa según los requerimientos hídricos de cada cultivo en base a la localización por las condiciones de suelo y clima de la región.

Costo de transporte para la materia prima

El costo de transporte para la materia prima ($TCost^{feedstocks}$) es igual al producto entre el costo unitario de transportación ($UTC_{m,r',r}^{feedstocks}$) y el flujo de materia prima ($f_{m,r,r'}$) que va a ser distribuido a cada biorefinería:

$$TCost^{feedstocks} = \sum_m \sum_r \sum_{r'} UTC_{m,r,r'}^{feedstocks} f_{m,r,r'} \quad (3.64)$$

Costos de transporte para los granos

Los costos de transporte para los granos ($TCost^{grains}$) son igual al costo unitario de transporte ($UTC_{g,r,r'}^{grains}$) y la cantidad de granos que tienen que ser distribuidos a cada consumidor r ($f_{m,r,j}^{grain-market}$):

$$TCost^{grains} = \sum_m \sum_r \sum_j UTC_{m,r,j}^{grains} f_{m,r,j}^{grain-market} \quad (3.65)$$

Costos de transporte para los biocombustibles

Los costos de transporte para los biocombustibles producidos ($TCost^{products}$) dependen del costo unitario de transporta para los productos k desde la localización de las biorefinerías r' a los consumidores r ($UTC_{k,r,r'}^{products}$) y la cantidad de productos a transportar ($P_{k,r,r'}^{prod-market}$):

$$TCost^{products} = \sum_k \sum_{r'} \sum_j UTC_{k,r',j}^{products} P_{k,r',j}^{prod-market} \quad (3.66)$$

Función Objetivo – Ganancia total

Las ganancias totales ($Profit$) son determinadas por la suma de la la venta de los productos ($G^{products}$) y granos (G^{grains}) menos los costos de operación de las biorefinerías ($OpCost^{Biorefineries}$), producción de materia prima ($OpCost^{Feedstocks}$), agua para la producción de materia prima ($OpCost^{water-feedstocks}$), agua para las biorefinerías ($OpCost^{water-biorefineries}$), costos de transporte para las materias primas ($TCost^{feedstocks}$), costos de transporte para los granos ($TCost^{grains}$), costos de transporte para los productos ($TCost^{products}$) y el costo de capital para las biorefinerías ($CapCost^{Biorefineries}$):

$$\begin{aligned} \text{Max Profit} = & G^{products} + G^{grains} - CapCost^{Biorefineries} - OpCost^{Biorefineries} - OpCost^{Feedstocks} - \\ & OpCost^{water-biorefineries} - OpCost^{water-feedstocks} - TCost^{feedstocks} - TCost^{grains} - TCost^{products} \end{aligned} \quad (3.67)$$

Capítulo IV. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para ambos modelos de optimización que se establecieron, con sus casos de estudios y resueltos con la estrategia de solución adecuada en base al comportamiento que posee cada problema de optimización.

4.1 Análisis de resultados en el reajuste de redes de agua en parques eco-industriales considerando la trayectoria de los contaminantes.

Se presenta la propuesta para la reconfiguración de la red de distribución de agua en un conjunto de industrias que ya se encuentran establecidas a lo largo de una cuenca hidrológica para establecer una configuración tal que represente el uso óptimo del agua con la posibilidad de conformar parques eco-industriales. La implementación de esta estrategia se busca reducir los costos de operación y brindando un beneficio ambiental como resultado del uso eficiente de agua y el adecuado tratamiento de efluentes para generar el mínimo impacto ambiental. En el modelamiento para este sistema industrial se consideran todas las especificaciones necesarias para definir concretamente lo que se busca. En el caso de estudio planteado se tiene un conjunto de industrias localizadas en un río principal, las cuales descargan efluentes con contaminantes al medio ambiente y operan con ineficientes redes de distribución de agua. Con el fin de optimizar el uso agua fresca en las industrias las redes de distribución de agua son rediseñadas mediante la aplicación de la metodología de integración másica. Esta consiste en el reuso de las corrientes en diversas etapas de los procesos de cada planta a otras etapas que presentan requerimientos, con la posibilidad de intercambio de corrientes con plantas industriales vecinas y con ello llevar a la conformación de parques eco-industriales. La instalación de estos complejos ambientales ha proporcionado grandes beneficios económicos aunados a la reducción en el consumo de agua fresca en el sector industrial, sin embargo, es relevante analizar el impacto ambiental que tendría la instalación de estos. Para tal propósito la metodología del MFA (*Material Flow Analysis*) se propone para el análisis de impacto ambiental como una metodología de “rastreo” de contaminantes con mayor impacto a través de la cuenca hidrológica que es destino de descargas industriales del complejo industrial. Para ello se consideran todas las afectaciones que pueden tener en el sistema hidrológico con otras descargas, extracciones, degradación biológica y química, etc.

El modelo matemático propuesto se sujeta al comportamiento de un problema multi-objetivo mixto entero no lineal (MINLP por sus siglas en ingles), la plataforma de GAMS fue usada para resolver este problema empleando el algoritmo de solución DICOPT. Para demostrar la efectividad y capacidad del modelo matemático propuesto se resuelve un caso de estudio específico. Debido a la complejidad del modelo matemático y a los objetivos, el caso de estudio fue definido en dos secciones, por un lado, todo lo relevante a las características hidrológicas y por otro lado las especificaciones industriales a cumplir.

Por lo que respecta al aspecto hidrológico, la cuenca hidrológica de estudio es el río Balsas. Siendo poseedor de una de las cuencas más extensas del país con una superficie de 117 350 km² y un grave problema de contaminación, el cual es generado por el impacto procedente de diferentes fuentes (industrial, agrícola, residencial). Entre las descargas mencionadas son las de origen industrial las que causan el mayor impacto debido al gran volumen y elevadas concentraciones de contaminantes. Se considera también la interacción con las descargas y extracciones de procesos naturales como lo son la precipitación, la evaporación, y depuración característica del río que provocan dilución o concentración de los contaminantes peligrosos. Los datos del presente caso de estudio respecto a las propiedades hídricas de la cuenca del río Balsas fueron tomados del reporte anual de CONAGUA.

Como lo dicta la metodología de la técnica del MFA empleada en el análisis del impacto ambiental que se propone, la cuenca es dividida en secciones o tramos resultando un total de 23 para el caso de estudio correspondiente (ver Figura 4.1). De acuerdo con el reajuste en la red de distribución de agua, la posibilidad de conformar parques eco-industriales se define, así como, el tramo del río donde los efluentes del sistema industrial establecido se descargan para ocasionar el menor impacto ambiental.

Particularmente, El análisis del impacto ambiental está en función de la concentración de los contaminantes en la disposición final de la cuenca hidrológica principalmente, que es donde el impacto ambiental tendría más repercusión de acuerdo a estudios realizados anteriormente, ya que se considera el punto de congregación de los efectos de la trayectoria de los contaminantes a lo largo del complejo sistema hídrico (río) que se está analizando. Los contaminantes considerados son dos, el Contaminante 1 es considerado el más tóxico correspondiente al benceno, el Contaminante 2 es el menos tóxico siendo fenol. Los cuales presentan un comportamiento de

acuerdo a una cinética de reacción obtenida experimentalmente de $k_1=4.0284 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ y $k_2=1.492 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, respectivamente.



Figura 4.1 Cuenca del Río Balsas.

Respecto a las especificaciones industriales, se involucran 10 plantas industriales instaladas actualmente a lo largo de la cuenca hidrológica (ver Figura 4.1), cuyas similitudes en los procesos permite la presencia de componentes químicos en común en las líneas de proceso, que permite la posibilidad de reuso/reciclo. Además, se permite establecer un sistema de tratamiento eficiente para toda la red. En la Tabla 1, se presentan los datos de los flujos y concentraciones de las corrientes de proceso con la característica antes mencionada. Algunos parámetros dentro del modelo para especificaciones de diseño de las tuberías de las que consta la red de intercambio de agua son: D (diámetro de las tuberías), K_F , H_Y , CU_{int} , CUP, ρ (densidad) y v (velocidad del fluido) son 100 m, 0.231/año, 8,000 h/año, 12,600 US\$, 250 US\$, 1,000 kg/m³ and 1 m/s, respectivamente. En los interceptores, que son las unidades donde se congregan los efluentes procedentes del reajuste antes de ser descargados al río se considera que operan con eficiencias (RR) de 0.6 y 0.8, con costos (CUM) de 1.46 y 2.06 \$/kg removido. El agua fresca con un costo unitario de 0.13 US\$/ton.

La solución óptima se ajusta rigurosamente a cumplir con los objetivos económicos y ambientales que se especifican en el modelo matemático establecido, el sistema de tuberías para la distribución de agua en las plantas industriales que se estudian será el que emplee el mínimo uso de agua para llevar a cabo su proceso y si la sostenibilidad económica lo permite este reajuste será tal que un conjunto de estas industrias puede formar parques eco-industriales entre sí. El objetivo ambiental de igual manera se debe de cumplir con la reducción de los efluentes al mínimo, de igual manera las concentraciones de los contaminantes de estudio para ocasionar el menor impacto posible.

Para la discusión de los resultados se analizan cuatro escenarios. Para el escenario 1 sólo existe la posibilidad de instalar un parque eco-industrial, para el escenario 2 se tiene la posibilidad de instalar 2 parques eco-industriales, en el escenario 3 con la posibilidad de instalación de 3 parques eco-industriales y en el escenario 4 es posible instalar los 4 parques eco-industriales. Las soluciones para cada escenario están sujetas a la función objetivo modelada anteriormente de la siguiente manera:

$$\text{Objective Function} = \text{Min } TAC; \text{Min } EOF \quad (4.1)$$

Las concentraciones de cada contaminante presente en cada uno de los efluentes para cada una de las industrias de las que dispone este estudio se muestran en la Figura 4.2. Antes del reajuste que da la apreciación del impacto ambiental que ocasionan este conjunto de industrias a la cuenca hidrológica y donde este escenario es definido como el inicial u original; el caudal Q en la disposición final de $716.58 \text{ m}^3/\text{s}$, la concentración de los contaminantes en este punto para el Contaminante 1 de 26.45 ppm y del Contaminante 2 de 6.10 ppm , con estos elevados valores en la concentración de los contaminantes se presenta un riesgo para la vida acuática del Océano Pacífico.

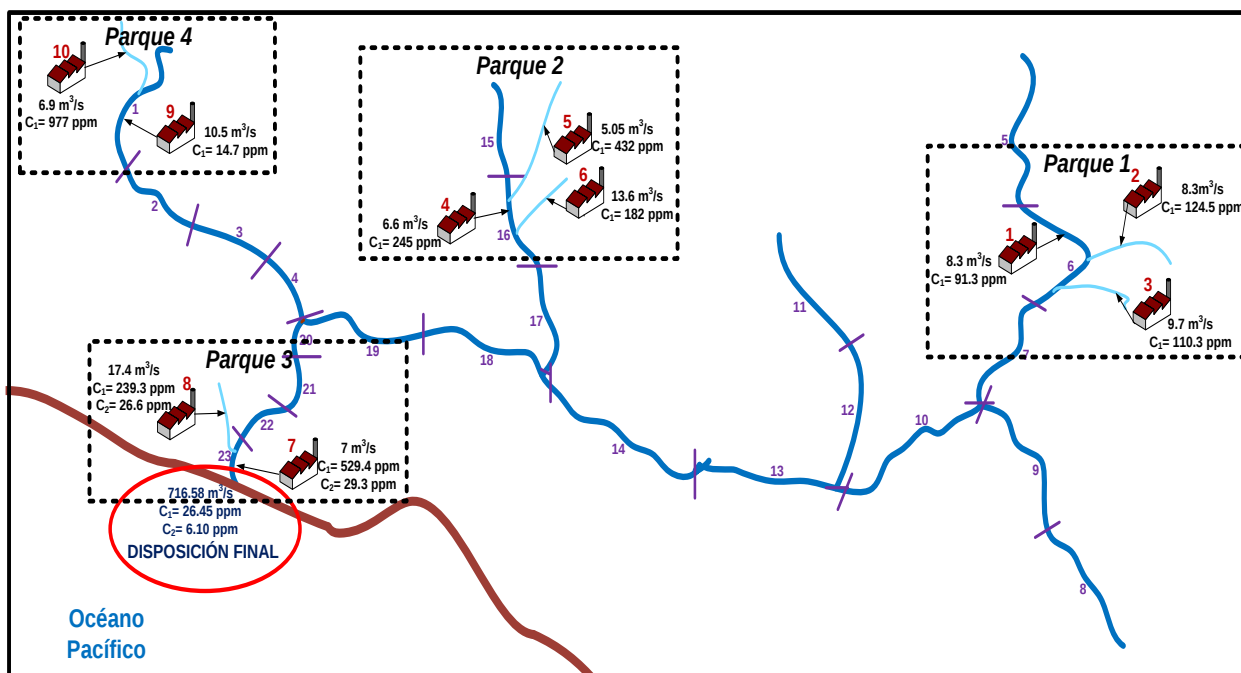


Figura 4.2 Localización de las plantas industriales del caso de estudio.

Escenario 1

Este escenario se encuentra restringido para que sea permitido en la solución sólo la instalación de un parque eco-industrial de las cuatro posibilidades que pueden surgir de acuerdo a la distribución de las plantas industriales que se presentan en el caso de estudio (ver Figura 4.2).

La solución está en función a los dos aspectos, económico con la minimización del TAC (costo anual total) con la reducción de la cantidad de agua alimentada, y a la reducción en las concentraciones de los contaminantes peligrosos de interés en la disposición final para ocasionar el menor impacto ambiental (ver Figura 4.3).

Tabla 4.1 Especificaciones de las plantas industriales en el caso de estudio.

Planta Industrial	Requerimientos de proceso				Corrientes de proceso			
	Requerimiento de proceso	Flujo (m ³ /s)	Composición del contaminante 1 (ppm)	Composición del contaminante 2 (ppm)	Corriente de proceso	Flujo (m ³ /s)	Composición del contaminante 1 (ppm)	Composición del contaminante 2 (ppm)
1	1	2.22	70		1	3.33	80	
	2	3.33	80		2	2.22	110	
	3	2.78	100		3	2.78	90	
2	4	3.61	90		4	3.61	125	
	5	2.50	110		5	1.67	95	
	6	4.17	120		6	3.06	140	
3	7	3.06	115		7	2.64	120	
	8	4.44	85		8	3.19	115	
	9	2.22	125		9	3.89	100	
4	10	0.56	0		10	0.56	100	
	11	1.85	50		11	1.85	80	
	12	2.78	50		12	2.78	100	
	13	1.16	80		13	1.16	800	
	14	0.28	400		14	0.28	800	
5	15	0.56	0		15	0.56	100	
	16	1.85	50		16	1.85	80	
	17	0.43	80		17	0.43	400	
	18	1.19	100		18	2.02	800	
	19	0.19	400		19	0.19	1000	
6	20	0.56	0		20	0.56	100	
	21	2.22	25		21	2.22	50	
	22	1.39	25		22	1.39	125	
	23	1.11	50		23	1.11	800	
	24	8.33	100		24	8.33	150	
7	25	2.78	3	20	25	2.78	35	600
	26	3.61	1	80	26	3.61	30	500
	27	0.69	3	0	27	0.69	3	400
8	28	8.33	2	15	28	8.33	30	0
	29	5.56	8	70	29	5.56	35	400
	30	3.47	2	30	30	3.47	5	550
9	31	3.75	5		31	2.78	10	
	32	4.33	12		32	4.17	15	
	33	5.42	9		33	3.61	18	
10	34	4.17	100		34	2.22	800	
	35	5.83	50		35	2.08	1.2	
	36	3.94	130		36	2.64	950	

La mejor solución en el aspecto económico es obtenida cuando la red de distribución de agua presenta un reajuste tal que las plantas industriales 1, 2 y 3 conforman el parque eco-industrial 1 con un TAC de $\$106.6 \times 10^3$ /año y los contaminantes 1 y 2 presentan en la disposición final concentraciones de 25.68 ppm y 5.87 ppm en comparación con el escenario original donde no hay reajuste. Nótese que esto representa una reducción de 2.9 % para el contaminante 1 y 3.8% para el contaminante 2. Sin embargo, la mejor solución en el aspecto ambiental es la formación del parque eco-industrial 3, constituido por las plantas industriales 7 y 8, donde en la disposición final se tiene una concentración de 17.78 ppm para el contaminante 1, con una reducción en comparación con el escenario inicial de 32.78% y con concentración de 5.48 para el contaminante 2 con un porcentaje de reducción de 10.16%. En tanto que, el TAC correspondiente es de $\$1,141.6 \times 10^3$ /año.

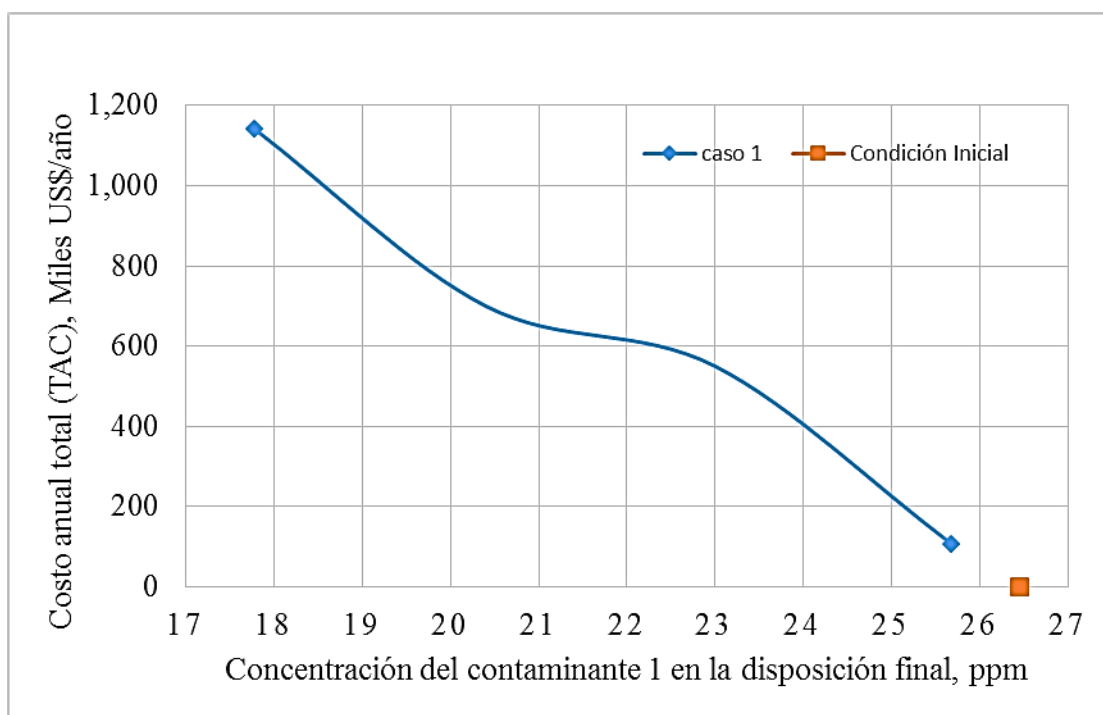


Figura 4.3 Grafica Pareto para el escenario 1.

Escenario 2

Para el escenario 2, las restricciones a las que se está sujeta la solución del problema a optimizar dictan la formación de 2 parques eco-industriales (Figura 4.4). Bajo este escenario, la mejor solución económica se presenta cuando los parques eco-industriales 1 y 3 son instalados con un costo anual total (TAC) de $\$1,248.3 \times 10^3$ /año, con una descarga en la disposición final con concentraciones de 16.68 ppm del contaminante 1 y de 5.22 ppm del contaminante 2. Sin embargo, la solución óptima en términos ambientales es con la formación de los parques eco-industriales 2 y 3 con concentraciones del contaminante 1 y 2 en la disposición final de 16.06 ppm y 5.74 ppm, respectivamente, lo cual está directamente relacionado a la disminución del impacto ambiental del complejo industrial conformado en comparación con el sistema original de 3.17% en el contaminante 1 y 3.17% del contaminante 2. Sin embargo, con un costo anual total (TAC) para el reajuste de $\$2,788.8 \times 10^3$ /año lo que representa un aumento de 124%.

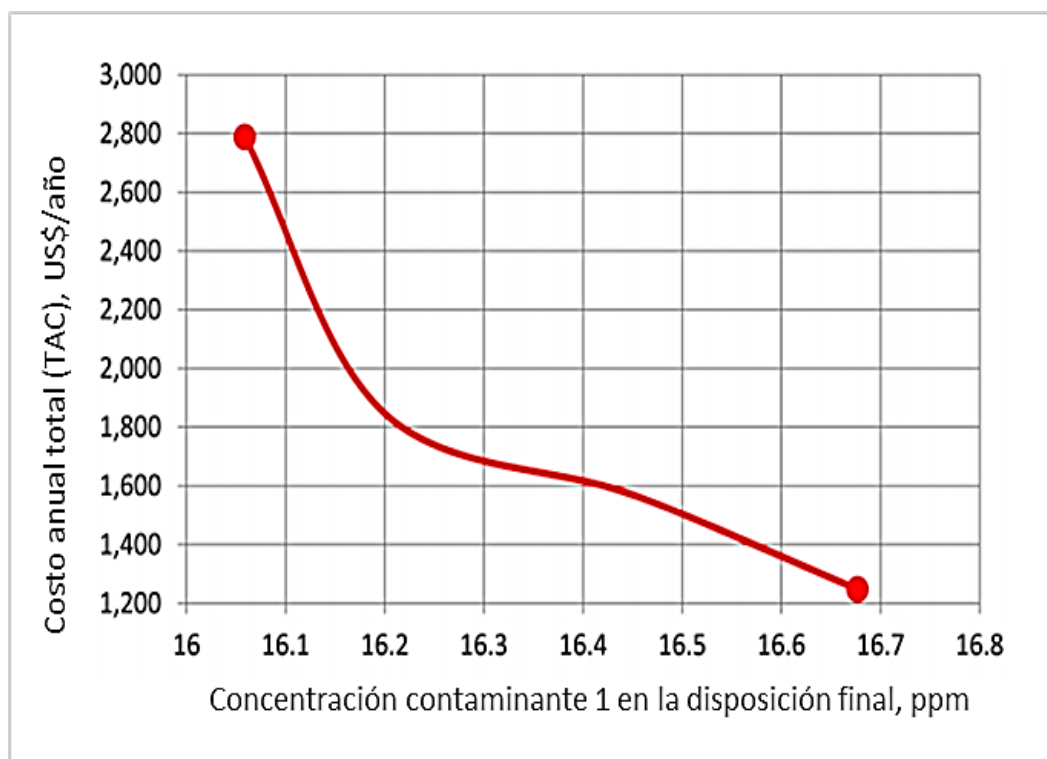


Figura 4.4 Gráfica Pareto para el escenario 2.

Escenario 3

Para este análisis se restringe a la instalación de 3 parques eco-industriales (Figura 4.5). Y la mejor solución en términos económicos se encuentra con la instalación de los parques eco-industriales 1, 2 y 3 con un TAC de $\$2,895.4 \times 10^3/\text{año}$ con 14.93 ppm y 5.48 ppm de los contaminantes 1 y 2 descargados al Océano Pacífico, respectivamente. Para el caso del análisis de la mejor solución en términos ambientales, como el sistema se vuelve muy complejo, puede analizarse desde cada perspectiva en base a la concentración de los contaminantes. Restringiendo la solución a la minimización de la concentración del contaminante 1 en la disposición final es aquella que representa la instalación de los parques eco-industriales 2,3 y 4 con un TAC de $\$5,873.8 \times 10^3/\text{año}$, donde se descargan 14.65 ppm del contaminante 1 y 5.76 ppm del contaminante 2 a la disposición final. Cuando la solución óptima involucra la minimización en la concentración del contaminante 2 descargado al océano la concentración es de 5.24 ppm (un 4.38% menor al mostrado en la mejor solución considerando en términos económicos y ambientales para la especificación señalada anteriormente). Si analizamos, el escenario cuando existe la posibilidad de la instalación de los parques eco-industriales 1, 3 y 4, la solución establece que la concentración del contaminante 1 tiene un valor de 5.24 ppm con un TAC de $\$4,333.4 \times 10^3/\text{año}$, el contaminante 2 con 15.24 ppm, donde las restricciones fueron modificadas para establecer esta configuración. Se observa aun así el compromiso entre el criterio ambiental y económico.

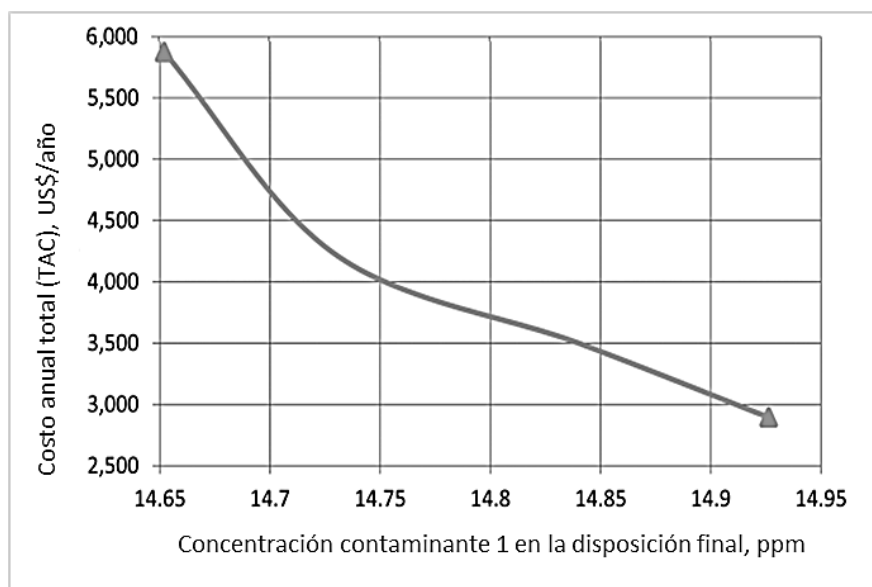


Figura 4.5 Gráfica Pareto para el escenario 3.

Escenario 4

Para este escenario los cuatro parques eco-industriales posibles son instalados a lo largo de la cuenca hidrológica. En la Figura 4.6 se muestra la instalación de los 4 parques eco-industriales relacionados a esta solución con las respectivas concentraciones y flujos de descargas. Esta configuración presenta valores significativos en la reducción de las descargas de efluentes y en la minimización de los contaminantes estudiados. El contaminante 1 presente en la solución es de 13.48 ppm y la presencia del contaminante 2 de 5.51 ppm en la disposición final. Sin embargo, si la concentración del contaminante 1 la consideramos la más relevante, la solución en el escenario presenta una reducción del 49% de la concentración en comparación con el sistema original (sin reajuste) y del contaminante 2 de 9.67% con un TAC generado por la instalación de $\$5,980.5 \times 10^3$ /año, el cual representa una reducción de 65.43% con respecto al escenario original. Por esta razón, la implementación del arreglo que se propone a nivel industrial no sólo incluye beneficios ambientales, si no de igual manera brinda beneficios económicos. Las configuraciones de la red de distribución de agua óptima interna para cada eco-parque industrial se muestran en el Apéndice A.

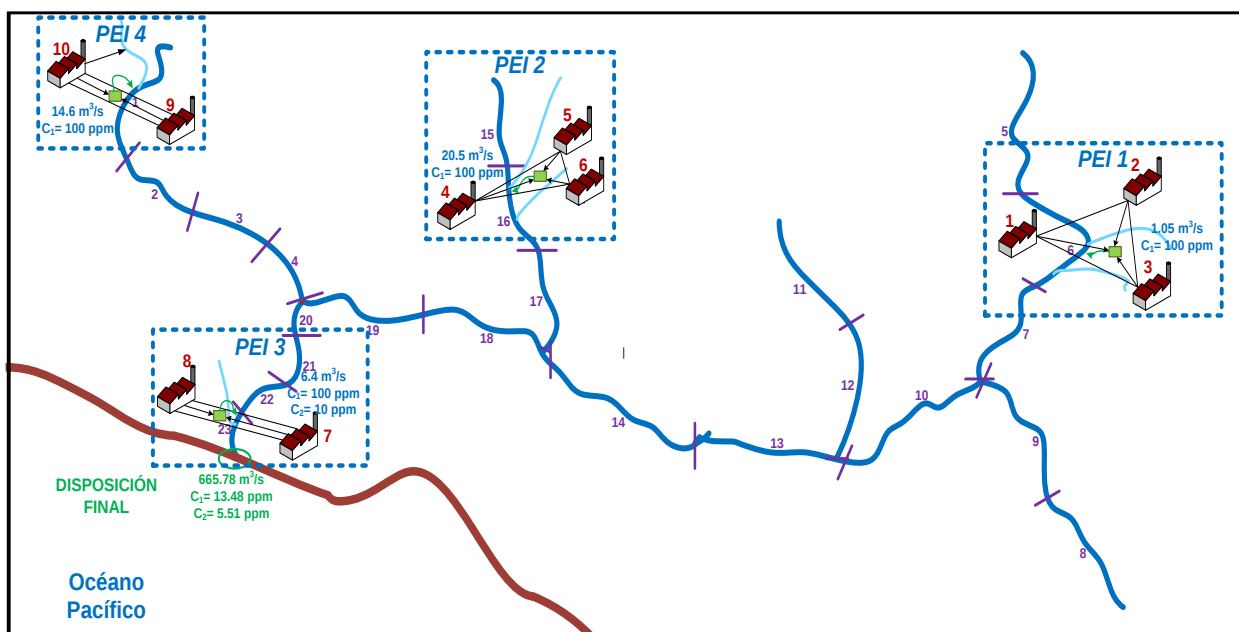


Figura 4.6 Representación del escenario 4 (instalación de 4 parques eco-industriales).

4.2 Análisis de resultados obtenidos a partir del modelo propuesto para la instalación óptima de un sistema de biorefinerías sustentable.

Para el modelo de optimización de estos sistemas donde el uso eficiente de agua es primordial para ocasionar el mínimo impacto al ambiente, y donde las afectaciones que se estudian se ubican en la cuenca hidrológica, siendo más específicos en la disposición de este sistema hídrico. Un caso de estudio particular es resuelto con el modelo matemático que se propuso considerando la maximización de las ganancias en la instalación de un conjunto de biorefinerías. Considerando la operación, cadena de suministro y la actividad agrícola aunada a la producción de biomasa. La ubicación del sistema de biorefinerías se localiza en el centro-este de México, debido a las condiciones climáticas y características del suelo para una buena disposición de materias primas. La materia prima de la que se abastece a las biorefinerías constan de residuos lignocelulósicos de cultivos como: maíz trigo y sorgo en la producción de bioetanol, así como de jatrofa y palma de aceite para biodiesel. Debido a las grandes demandas de materia prima, se considera la posibilidad de disponer de nuevas áreas de cultivo, que son estimadas y distribuidas de acuerdo a la solución que arroje el modelo de optimización, considerando restricciones de área en las regiones con alto potencial de cultivo en las especies elegidas para la producción de biocombustibles (bioetanol y biodiesel), como se muestra en la Figura 4.7 (Información proporcionada por base datos por SAGARPA).

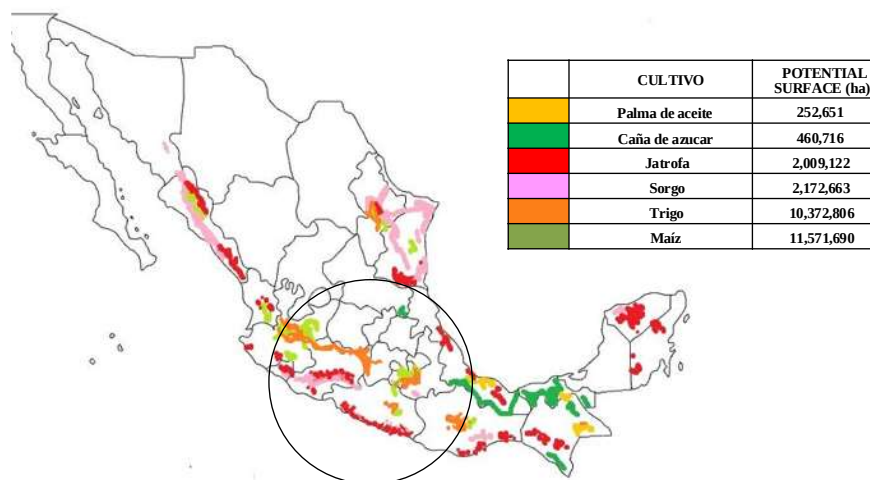


Figura 4.7 Área potencial para especies de cultivo aptas para la producción de biocombustibles en México.

En tanto que la información respecto a parámetros de cultivo necesarios en el cálculo de la demanda de agua para la producción de materia prima, así como de la producción anual fueron tomados de reportes agrícolas experimentales como en los publicados en el reporte de SENER-IDB-GTZ (2006) y por FAO en sus reportes 56, 66; en los artículos publicados por Chuck-Hernández (2011), Gonzales-Robaina (2011), Jiménez-Córdova (2004), Kim (2004), Koukona (2014), Orwa (2009), Ossa-Basáñez (2012) y Sánchez (2008). Fue seleccionada como cuenca hidrológica de estudio para la instalación del sistema de biorefinerías al río Balsas, donde la información hídrica para modelar este sistema como precipitación, evaporación y filtración fue proporcionada por el actual reporte de CONAGUA (2013).

Para el análisis ambiental aplicando la técnica de Análisis del Flujo de Materiales (MFA por sus siglas en ingles), la cuenca principal del río es dividida en 23 tramos, debido a la disponibilidad de datos, en cada tramo es posible la instalación de una biorefinería (ver Figura 4.8). La cantidad de biorefinerías que serán instaladas depende de la demanda de los consumidores a satisfacer presentes en la Tabla 4.2.

En el caso de estudio, basado en los precios del mercado actual, algunos parámetros económicos utilizados para estimar los costos y ganancias son: el precio del bioetanol es de US \$ 0.9/L, para biodiesel US \$ 1.13/L; los precios para los granos u otros productos, maíz US \$ 224.4/ton, trigo US \$ 236.78/ton, sorgo US \$ 194.60/ton, caña de azúcar US \$ 34.3/ton, jatrofa US \$ 266.7/ton, palma de aceite US \$ 94.2/ton. Por otra parte, los costos para el material lignocelulósico empleando como materia prima en las biorefinerías son para: maíz US \$ 11.22/ton, trigo US \$ 11.84/ton, sorgo US \$ 9.73/ton, caña de azúcar US \$ 3,623/ton, jatrofa US \$ 13.33/ton, palma de aceite US \$ 4.71/ton. El costo unitario para agua de uso agrícola es de US \$ 0.156/m³ y el costo unitario para agua de uso industrial es US \$ 0.18/m³. Otros datos empleados en el caso de estudio se encuentran en el Apéndice B.

Tabla 4.2 Demanda estimada de biocombustibles por los consumidores en el mercado.

DEMANDA ESTIMADA (L)		
Mercado	Bioetanol	Biodiesel
1-Querétaro	3,236,729	3,999,526
2-Guadalajara	6,015,597	7,433,287
3-DF	35,602,846	43,993,334
4-Toluca	1,968,325	2,432,198
5-Cuernavaca	1,362,208	1,683,238
6-Morelia	2,403,467	2,969,890
7-Lázaro Cárdenas	719,285	888,798
8-Uruapan	1,268,484	1,567,427
9-León	4,983,835	6,158,370
10-Puebla	23,249,853	28,729,123

Para el caso del bioetanol, el consumidor más demandante está localizado en el DF con 35,602,846 L/año, donde la biorefinería D abastece este biocombustible necesario (ver Figura 4.9). Así, como a consumidor Cuernavaca de acuerdo a la logística resultante en la solución del modelo de optimización. La biorefinería B abastece al consumidor de Puebla conveniente por su cercanía y disponibilidad de recursos. Puede apreciarse además que la red de distribución de la biorefinería A es la que incluye un catálogo más grande de consumidores, donde aparecen: Guadalajara, Lázaro Cárdenas, Uruapan y León. Este resultado se debe a la disposición de recursos (biomasa y agua) en el tramo 1 de la cuenca hidrológica, que en comparación con los costos de transporte para enviar los productos a los consumidores es aún más redituable económicamente, que satisfacer esa demanda de bioetanol por otra biorefinería instalada en otra posición del río Balsas.

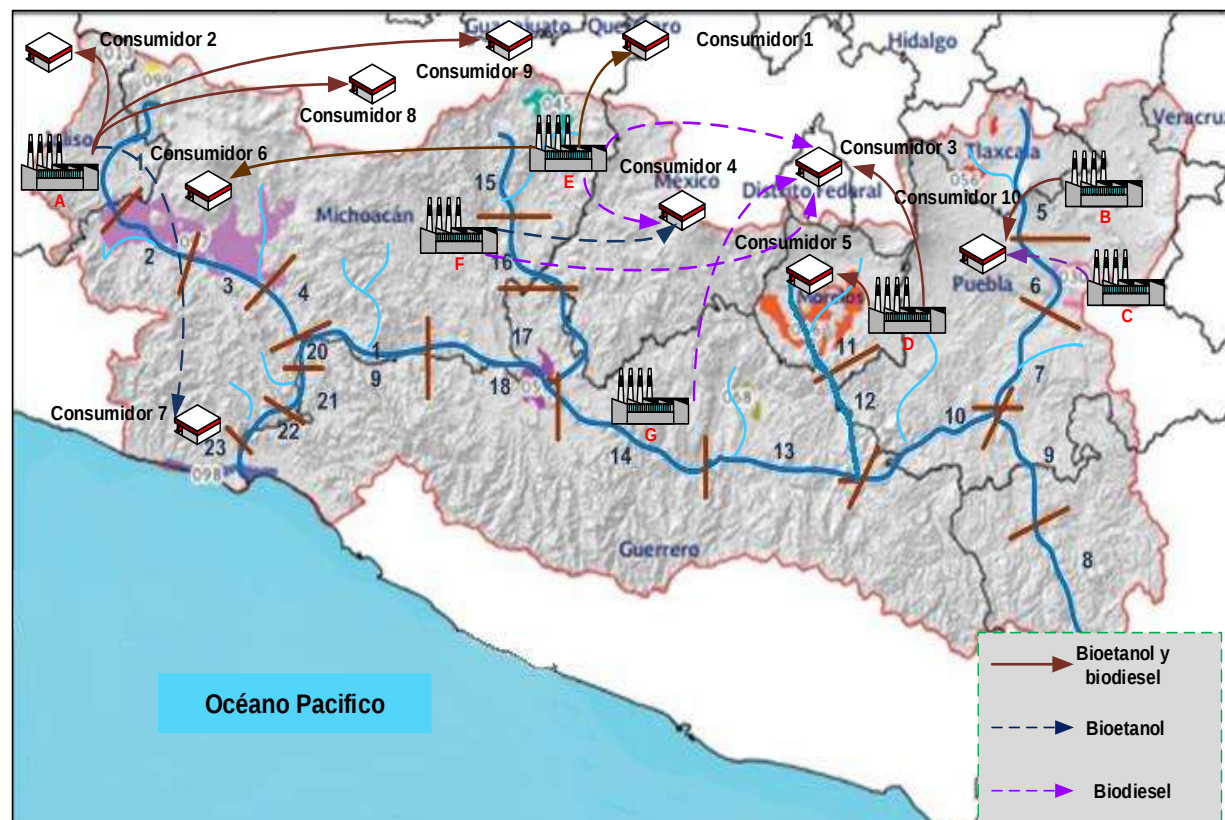


Figura 4.8 Solución óptima para la distribución de un sistema de biorefinerías.

La distribución del biodiesel producido por las biorefinerías instaladas a lo largo de la cuenca hidrológica se muestra en la Figura 4.10. Nótese que de acuerdo a la demanda de este biocombustible por los consumidores localizados en el DF y Puebla de nuevo son los que destacan. Para satisfacer la demanda del consumidor en el DF, las biorefinerías D, E, F y G mandan sus productos desde su ubicación; en tanto que, para Puebla las biorefinerías encargadas de abastecer la demanda de biodiesel son B y C. Se puede notar que para el caso de la biorefinería F esta tiene una elevada producción de biodiesel y está localizada en una posición céntrica en la cuenca hidrológica, lo que le permite una distribución más amplia entre diferentes consumidores (Querétaro, DF, Toluca y Morelia).

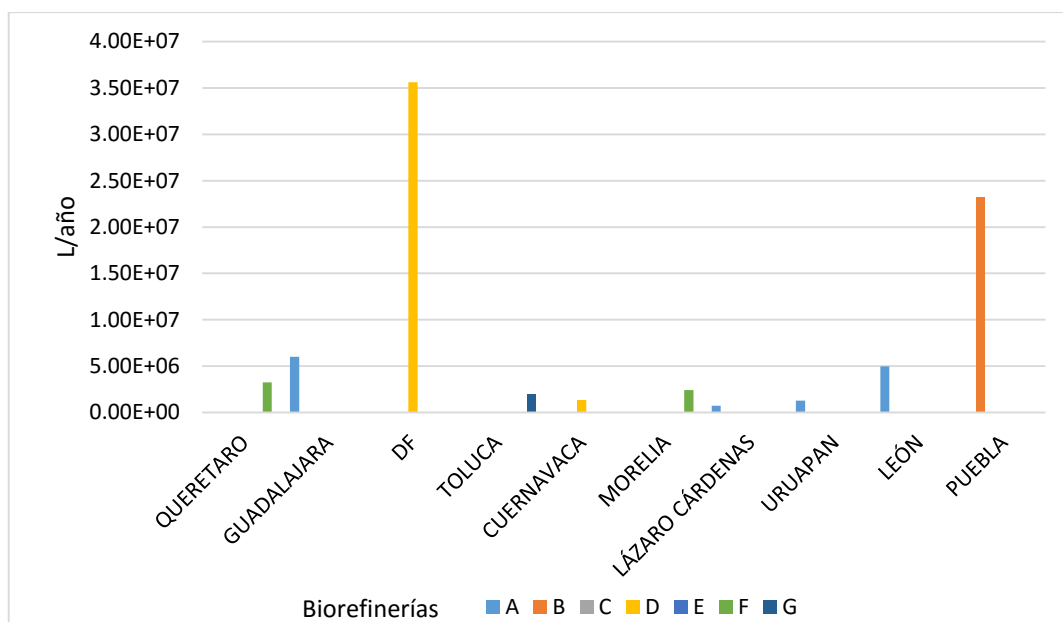


Figura 4.9 Distribución de bioetanol desde las biorefinerías a los consumidores.

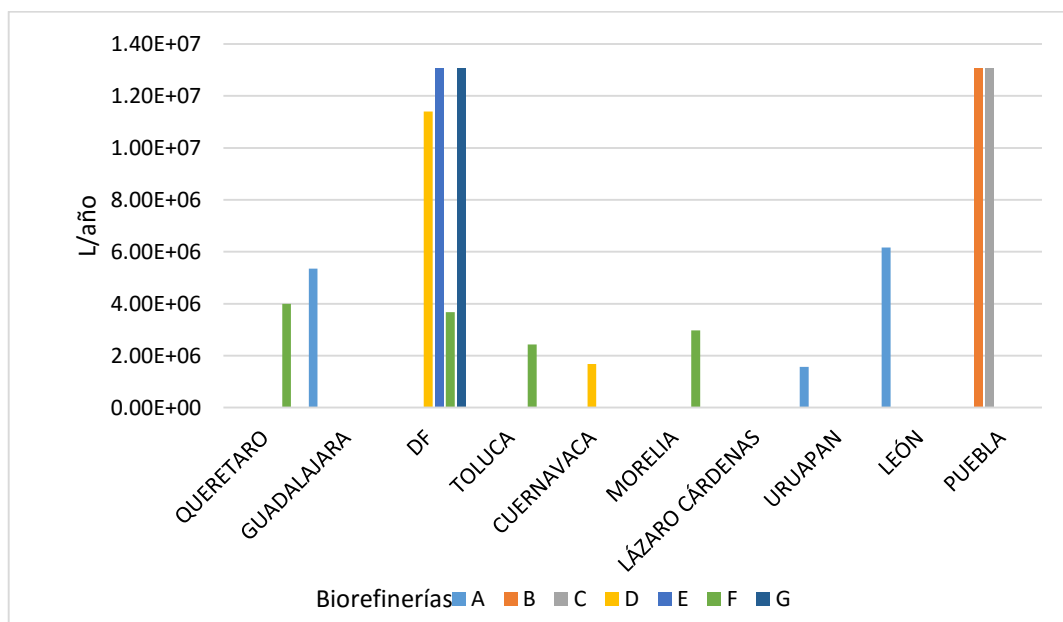


Figura 4.10 Distribución de biodiesel desde las biorefinerías a los consumidores.

Aunado a lo anterior en la Figura 4.11 se presentan los porcentajes respecto a las demandas satisfechas para la solución óptima del caso de estudio. Es de señalarse que debido a la restricción en la reducción de los costos para obtener las máximas ganancias el abastecer completamente las demandas de los consumidores aún en los sitios óptimos no es conseguido. En esta situación, el consumidor ubicado en Lázaro Cárdenas no es abastecido con la demanda de biodiesel requerida, y se encuentran otros consumidores donde su demanda es parcialmente satisfecha.

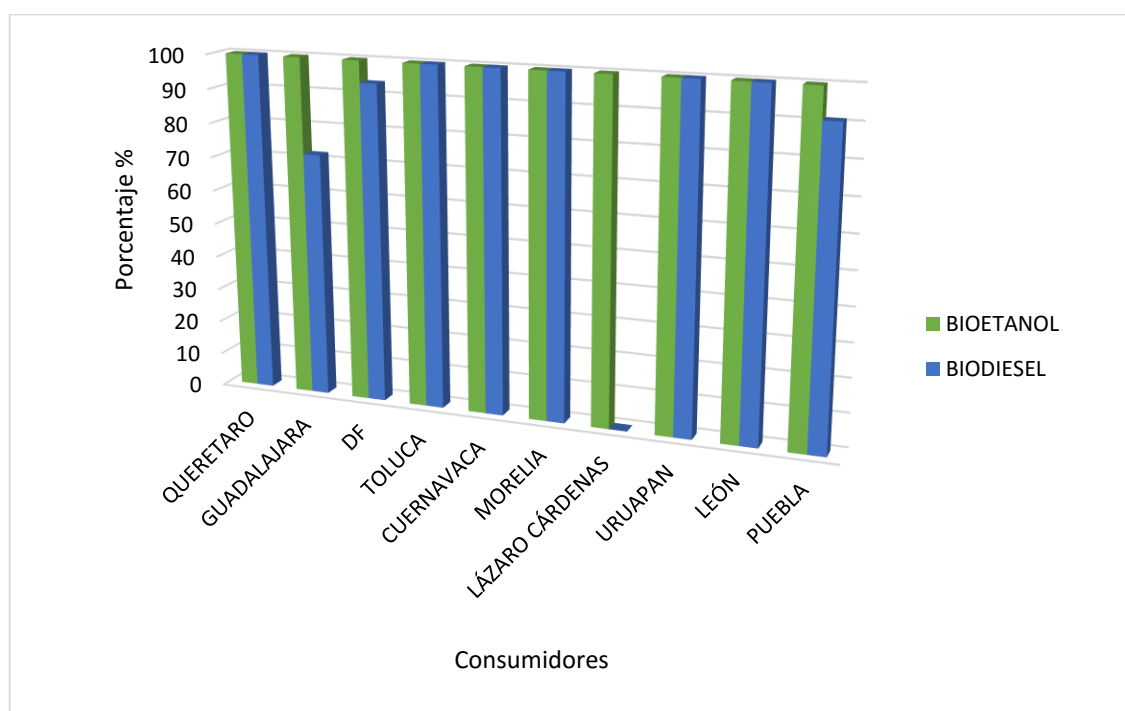


Figura 4.11 Porcentaje de abastecimiento de demanda de biocombustibles por el sistema de biorefinerías.

Los consumidores cuya demanda de biocombustibles es satisfecha por cada biorefinería, son localizados a distancias más cortas de las áreas de cultivo y de las biorefinerías instaladas, ya que generan una cadena de distribución factible en base a las restricciones económicas dadas en el modelo de optimización propuesto (ver Figura 4.12). En la Figura 4.12, también es posible observar que los cultivos de maíz, trigo y sorgo son empleados en la producción de bioetanol y jatrofa para producción de biodiesel.

Palma de aceite no aparece en la solución como un tipo de cultivo óptimo en la producción de biodiesel ya que las regiones donde el cultivo de palma de aceite es factible se encuentran lejanos a la cuenca del río Balsas por lo que el transporte de la materia prima desde el área de cultivo resultaría costoso para el sistema de biorefinerías. Esto a su vez implica altos costos de producción de biocombustibles debido a los costos de transporte de las materias primas a las biorefinerías.

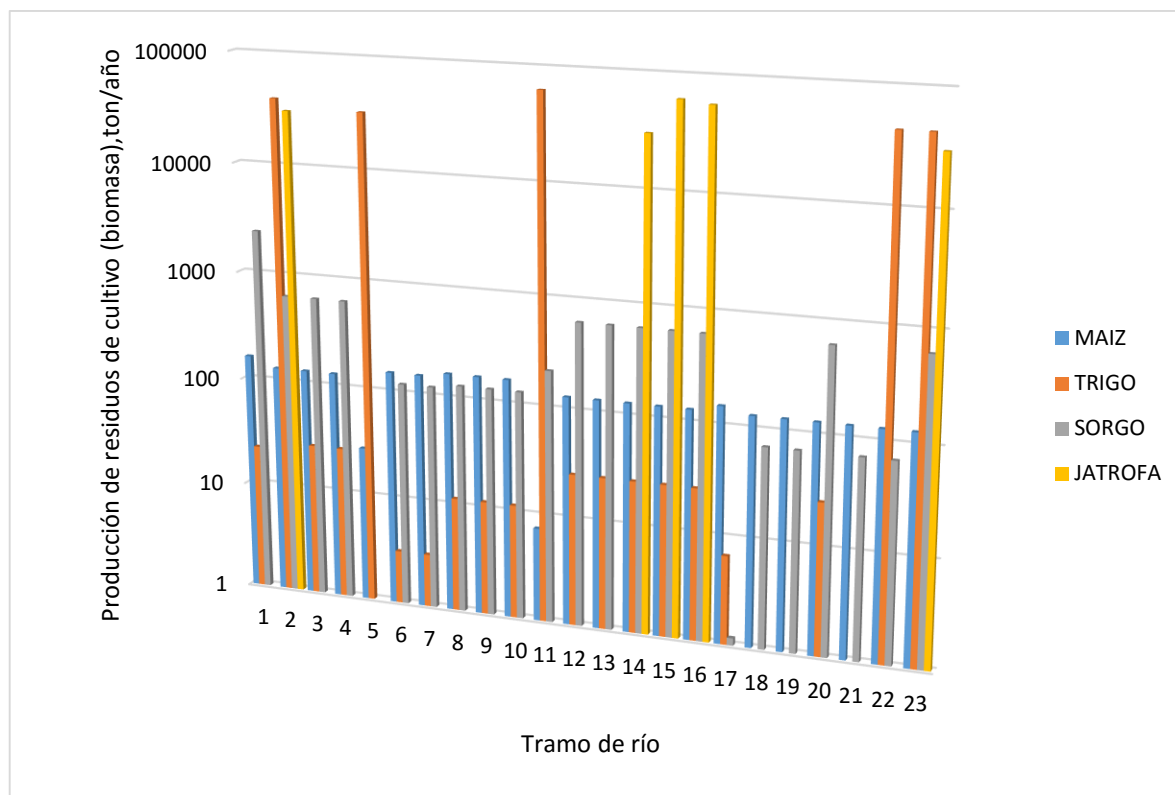


Figura 4.12 Distribución de biomasa cultivada en los campos a lo largo de la cuenca hidrológica.

En sí, para satisfacer la demanda de biocombustibles en la región se requiere de nueva área de cultivo. Misma que es distribuida como se muestra en la Figura 4.13 para el cultivo de jatrofa. Para la solución de este caso de estudio, la mayor área de cultivo se encuentra en las cercanías del tramo de río 11 de la cuenca del río Balsas, donde la biorefinería D está ubicada, y es la que abastece la demanda de bioetanol de los mayores consumidores como la ciudad de México (consumidor 3) y Cuernavaca (consumidor 5). En torno a la producción de biodiesel, el área adicional a cultivar para jatrofa se encuentra distribuida entre los tramos de río 15 y 16, donde el biocombustible es enviado a los consumidores de la ciudad de México y Toluca.

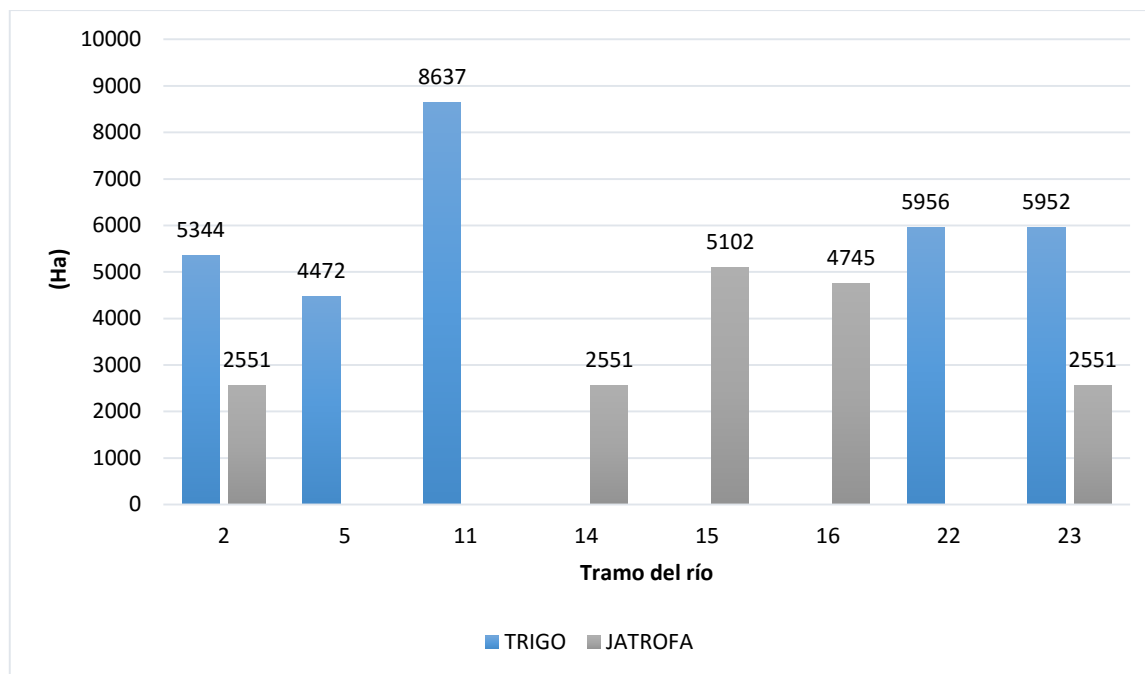


Figura 4.13 Distribución de biomasa cultivada en los campos a lo largo de la cuenca hidrológica.

Análisis ambiental

Al considerar en el modelo de optimización propuesto el impacto ambiental debido a la instalación de un sistema de biorefinerías, la principal repercusión en la cuenca hidrológica de interés, principal aportación de este proyecto, fue la afectación provocada por las extracciones de agua y descargas de efluentes. En ese sentido, con la técnica del MFA se estimó mediante un balance global de agua, primeramente la demanda de este recurso necesaria para la operación del sistema de biorefinerías instalado. Para el caso de estudio presentado anteriormente se requieren ser extraído del río Balsas un total 1.4125×10^{11} L/año. El impacto directo por la instalación de las biorefinerías se refleja por el flujo de efluentes descargados en el tramo, ya que se en cada tramo también se extrae agua para otras actividades humanas (Agrícola, residencial) que podría poner en riesgo la calidad de agua. Los flujos de efluentes que se presentan las biorefinerías instaladas son 2.86×10^4 , 3.94×10^4 , 2.49×10^4 , 2.25×10^4 , 2.49×10^4 , 5.35×10^4 , and 3.42×10^4 m³/año para los tramos de río 1, 5, 6, 11, 14, 15, y 16, respectivamente; que representa un total de descarga de efluentes para toda la cuenca hidrológica de 1.82×10^5 m³/año.

Conclusiones

En este proyecto de tesis se propone el desarrollo de modelos de optimización basados en programación matemática para la instalación de sistemas industriales que empleen de forma óptima el agua, a fin de generar el menor impacto ambiental debido a la reducción de efluentes descargados y reducción en la explotación en las cuencas hidrológicas pero cumpliendo con objetivos económicos y ambientales simultáneamente.

Por un lado, se propone el desarrollo de una metodología de optimización para la integración de los procesos de plantas en parques eco-industriales. En este caso, en los resultados obtenidos para el caso de estudio propuesto y los escenarios estudiados se puede observar ampliamente el beneficio de la reconfiguración a parques eco-industriales, la reducción directa del flujo en la disposición final y punto de análisis del impacto ambiental. Debido a que los costos más representativos en la operación de las plantas industriales tienen que ver con el agua fresca, al llevar a cabo la reducción de la demanda en este recurso, el costo total anual que considera directamente a este término representa es disminuido de forma sustancial.

Por otra parte, fue importante la aplicación del caso de estudio en México y considerar a la cuenca del río Balsas para el estudio debido a la gran actividad que presenta y las afectaciones que son producidas esta zona. Por lo que, a la par del beneficio económico, en la reducción de costos por agua fresca, tenemos grandes resultados en cuanto a los objetivos ambientales propuestos. Dependiendo de la formación de parques eco-industriales que se obtienen de los distintos escenarios abordados es posible conocer para cada uno la disminución en la concentración de los contaminantes que fueron analizados, donde el contaminante considerado el más perjudicial a la cuenca hidrológica fue prioridad. Y se demostró que a partir de la metodología propuesta es posible obtener descargas que presentan reducciones hasta del 50% respecto al sistema original (sin reajuste). Garantizando así la sostenibilidad de la cuenca hidrológica al menor costo, y satisfaciendo las demandas de agua de los parques industriales.

Dentro del mismo concepto se propuso un modelo de optimización para el diseño de un sistema distribuido de biorefinerías a lo largo de cuencas hidrológicas considerando las repercusiones ambientales, económicas y sociales. El modelo propuesto incorpora la distribución óptima de campos de cultivo, la localización de las biorefinerías que conforman este sistema, así como la red de distribución para satisfacer las demandas por parte de consumidores identificados. En este modelo también se incorporan la selección de la materia prima a utilizar en la producción de biocombustibles (bioetanol y biodiesel). En resumen, la mayor contribución de esta propuesta radica en incorporar la repercusión de este sistema de biorefinerías en la cuenca hidrológica a lo largo de la cual es instalado. Tal repercusión se evalúa en base a las descargas y extracciones de efluentes y agua que intervengan por esta actividad industrial y por la actividad agrícola necesaria para la producción de biomasa. Específicamente, el objetivo global involucra a la maximización de las ganancias totales del sistema e involucre restricciones ambientales en la cuenca hidrológica. De igual manera, un caso de estudio es resuelto, demostrándose en la solución óptima que la instalación de una refinería está orientada mayormente a la disposición de la materia prima y del agua; ya que los costos de producción dependen de estos. En otras palabras, si existe poca disponibilidad de estos cerca de una biorefinería los costos de transporte para llevar la materia prima a las plantas de procesamiento serán elevados y las ganancias serán menores al satisfacer a los consumidores.

Bibliografía

- Ba B.H., Prins C., Prodhon C., 2015, "Models for Optimization and Performance Evaluation of Biomass Supply Chains: An Operations Research perspective", *Renewable Energy*, 1-13.
- Boix M., Montastruc L., Pibouleau I., Azzaro-Pantel C., Domenech S., 2012, "Industrial Water Management by Multiobjective Optimization: From Individual to Collective Solution through Eco-Industrial Parks", *Journal of Cleaner Production*, 22, 85-97.
- 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, 6276-6286.
- Burgara-Montero O., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., El-Halwagi M.M., 2012, "Optimal Design of Distributed Treatment System for the Effluents Discharged to the Rivers", *Clean Technology and Environmental Policy*, 925-942.
- Burgara-Montero O., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., El-Halwagi M.M., 2013a, "Incorporation of the Seasonal Variations in the Optimal Treatment of Industrial Effluents Discharged To Watershed", *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2, 5145-5160.
- Cheng-Liang C., Chung-Yen L., Foo D.C.Y., 2011, "Synthesis of inter-plant water networks involving batch and continuous processes", *Chemical Engineering Transactions*, 25, 587-592.
- Chuck-Hernández C., Pérez-Carrillo E., Heredia-Olea E., Serna-Saldívar S.O., 2011, "Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad". *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(3), 529-549.
- CONAGUA, Water Atlas in Mexico, Mexican National Water Commission, 2013, Mexico City, Mexico.
- Contran N., 2013, "State-of-the-art of the Jatropha curcas productive chain: From sowing to biodiesel and by-products". *Industrial Crops and Products*, 42, 202-215.
- Corsano G., Vecchiotti A.R., Montagna J.M., 2011, "Optimal Design for Sustainable Bioethanol Supply Chain Considering Detailed Plant Performance Model", *Computers and Chemical Engineering*, 35, 1384-1398.

- Cucek L., Klemes J.J., Varbanov P.S., Kravanja Z., 2013, "Dealing with High-Dimensionality of Criteria in Multiobjective Optimization of Biomass Energy Supply Network". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52, 7223-7239.
- Cucek L., Martín M., Grossmann I.E., Kravanja Z., 2014, "Multi-Period Synthesis of Optimally Integrated Biomass and Bioenergy Supply Network", *Computers and Chemical Engineering*, 66, 57-70.
- De Meyer A., Cattrysse D., Van Orshoven J., 2015, "Considering Biomass Growth and Regeneration In The Optimization Of Biomass Supply Chains", *Renewable Energy*, 1-13.
- El-Halwagi M.M., Hamad A.A., Garrison G.W., 1996, "Synthesis of Waste Interception and Allocation Networks", *AIChE Journal*, 42, 3097-3101.
- El-Halwagi M.M., 1997, "Pollution Prevention through Process Integration", Academic Press, San Diego.
- El-Halwagi M.M., Monousiouthakis V., 1989, "Synthesis of Mass-Exchange Networks", *AIChE Journal*, 35, 1233-1244.
- El-Halwagi M.M., Gabriel F., Harrell D., 2003, "Rigorous Graphical Targeting for Resource Conservation Via Material Recycle/Reuse Networks", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42, 4319-4328.
- El-Halwagi M.M., Glasgow I.M., Qin X.Y., Eden M.R., 2004, "Property Integration: Component less Design Techniques and Visualization Tools", *AIChE Journal*, 50 (8), 1854-1869.
- Eusuff M.M., Lansey K.E., "Optimization of Water Distribution Network Design Using The Shuffled Frog Leaping Algorithm", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(3), 210-225.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United States, 1977, Evapotranspiration of crops, Irrigation and drainage, paper 56.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United States, 2012, Crops yield response to water, Irrigation and drainage, paper 66.

Foo D.C.Y., Manan Z.A., Tan Y.L., 2006a, "Use Cascade Analysis to Optimize Water Networks", *Chemical Engineering Progress*, 102, 45-52.

Foo D.C.Y., Kazantzi V., El-Halwagi M.M., Manan Z.A., 2006b, "Surplus Diagram and Cascade Analysis Technique for Targeting Property-Based Material Reuse Network", *Chemical Engineering Science*, 61 (8), 2626-2642.

Foo D.C.Y., 2009, "State-Of-The-Art Review of Pinch Analysis Techniques for Water Network Synthesis", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48, 5125-5159.

Gabriel F.B., El-Halwagi M.M., 2005, "Simultaneous synthesis of water interceptions and material reuse networks: Problem reformulation for global optimization", *Environmental Progress*, 24(2), 171-180.

Giarola S., Bezzo F., 2015, "Bioethanol Supply Chain, Design and Optimization: Some Achievements and Future Challenges for the Development of Sustainable Biorefineries". *Computer Aided Chemical Engineering*, 36, 1570-7946. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63472-6.00022-7>.

González-Robaina, F., 2011, "Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1), 40-46.

Guillén-Gosálbez G., Grossmann I., 2010, "A Global Optimization Strategy for the Environmentally Conscious Design of Chemical Supply Chains Under Uncertainty in the Damage Assessment Model", *Computer and Chemical Engineering*, 34, 42-58.

Hipólito-Valencia B.J., Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., Nápoles-Rivera F., El-Halwagi M.M., 2014, "Optimal Design of Interplant Waste Energy Integration", *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 633-652.

Jiménez-Córdova A., 2004, "Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, México". *Investigaciones Geológicas*, 53, 58-74.

- Kadu M.S., Gupta R., Bhavé P.R., 2008, "Optimal Design of Water Networks Using a Modified Genetic Algorithm with Reduction in Search Space", *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(2), 147-160.
- Karuppiah R., Grossman I.E., 2006, "Global Optimization for the Synthesis of Integrated Water Systems in Chemical Processes", *Computers and Chemical Engineering*, 30, 650-675.
- Kim S., Gale B.E., 2004, "Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues", *Biomass and Bioenergy*, 26, 361 – 375.
- Kim J.K., Realff M.J., Lee J.H., 2011, "Optimal Design and Global Sensitivity Analysis of Biomass Supply Chain Networks for Biofuels under Uncertainty", *Computers and Chemical Engineering*, 35, 1738-1751.
- Koukouna E., 2014, "Life Cycle Assessment of Jatropha as feedstock for biodiesel production. The case of Morocco", Graduation Project, MSc Industrial Ecology.
- Liao Z.W., Wu J.T., Jian B.B., Wang J.D., Yang Y.R., 2007. "Design Methodology for Flexible Multiple Plant Water Networks", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46, 4954-4963.
- Lim S.R., Park J.M., 2010, "Interfactory and Intrafactory Water Network System to Remodel a Conventional Industrial Park to a Green Eco-Industrial Park", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49, 1351-1358.
- Lira-Barragán L.F., Ponce-Ortega J.M., Nápoles-Rivera F., Serna-González M., El-Halwagi M.M., 2013, "Incorporating Property-Based Water Networks and Surrounding Watersheds in Site Selection of Industrial Facilities", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(1), 91-107.
- Lovelady E.M., El-Halwagi M.M., 2009, "Design and Integration of Eco-Industrial Parks for Managing Water Resources", *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2009, 28, 265-272.
- Lowe E.A., 1997, "Creating By-Product Resource Exchanges: Strategies for Eco-Industrial Parks" *Journal of Cleaner Production*, 5, 57-65.
- Marvin W.A., Schmidt L.D., Daoutidis P., 2013, "Biorefinery Location and Technology Selection through Supply Chain Organization", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52, 3192-3208.

Murrillo-Alvarado P.E., Santibañez-Aguilar J.E., Ponce-Ortega J.M., Castro-Montoya A.J., Serna-Gonzales M., El-Halwagi M.M., 2014, "Optimization of the Supply Chain Associated to the Production of Bioethanol from Residues of Agave from the Tequila Process in Mexico", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53, 5524-5538.

Olesen H.D., Polley G.T., 1996, "Dealing with plant geography and piping constraints in water network design", *Process Safety Environmental Protection*, 74, 273-276.

Orwa C., Mutua A., Kindt R., Jamnadass R., Simons A., 2009, Agroforestry database 4.0: *Jatropha curcas*. www.worldagroforestry.org/treedb/AFTPDFS/Jatropha_curcas.pdf.

Osmani A., Zhang J., 2014, "Economic and Environmental Optimization of a Large Scale Sustainable Dual Feedstock Lignocellulosic-Based Bioethanol Supply Chain in a Stochastic Environment", *Applied Energy*, 114, 572-587.

Ossa-Basañes F. J., 2012, "Cultivos energéticos para biocombustibles", <http://www.imd.uncu.edu.ar/upload/cultivos-energeticos-final.pdf>.

Ponce-Ortega J.M., El-Halwagi M.M., Jiménez-Gutiérrez A. A., 2010, "Global Optimization of Property-Based Recycle and Reuse Networks Including Environmental Constraints", *Computers and Chemical Engineering*, 34, 318-330.

Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J.M., Nápoles-Rivera F., El-Halwagi M.M., Serna-González M., Jimenez-Gutiérrez A., 2010, "Water Integration of Eco-Industrial Parks Using a Global Optimization Approach", *AIChE Journal*, 40, 9945-9960.

Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J.M., Serna-Gonzalez M., Jimenez-Gutierrez A., El-Halwagi M.M., 2011, "A Global Optimal Formulation for the Water Integration in Eco-Industrial Parks Considering Multiple Pollutants", *Computers and Chemical Engineering*, 35, 1558-1574.

Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., El-Halwagi M.M., 2012, "Optimal Reconfiguration of Multi-Plant Water Networks into an Eco-Industrial Park", *Computers and Chemical Engineering*, 44, 58-83.

Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J.M., El-Halwagi M.M., Viet P., 2013a, "Global Optimization in Property-Based Interplant Water Integration", *AIChE Journal*, 59 (3), 813-833.

Rubio-Castro E., Serna-González M., Ponce-Ortega J.M., El-Halwagi M.M., 2013b, “Synthesis of Cooling Water Systems with Multiple Cooling Towers”, *Applied Thermal Engineering*, 50(1), 957-974.

Ruiz-Femenia R., Guillén-Gosálbez G., Jiménez L., Caballero J.A., 2013, “Multi-Objective Optimization of Environmentally Conscious Chemical Supply Chains under Demand Uncertainty”, *Chemical Engineering Science*, 95, 1-11.

SAGARPA, 2013, Rastrojos: Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México, ISBN: 978-607-37-0170-9.

SAGARPA-SIAP., 2011, Mexican System of Information about Agriculture and Fishing. Advance of planting and harvesting for Mexico. Mexico City, Mexico. www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=4347(acceso en 01.02.12.).

Sánchez O.J., Cardona C., 2008, “Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks”, *Bioresource Technology*, 99, 5270–5295.

Santibañez-Aguilar J.E., González-Campos J.B., Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., El-Halwagi M.M., 2011, “Optimal Planning of a Biomass Conversion System Considering Economic and Environmental Aspects”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50 (14), 8558-8570.

Santibañez-Aguilar J.E., González-Campos J.B., Ponce-Ortega J.M., Serna-Gonzales M., El-Halwagi M.M., 2014, “Optimal Planning and Site Selection for Distributed Multiproduct Biorefineries Involving Economic, Environmental and Social Objectives”, *Journal of Cleaner Production*, 65, 270-294.

Santibañez-Aguilar J.E., Rivera-Toledo M., Flores-Tlacuahuac A., Ponce-Ortega J.M., 2015, “A Mixed-Integer Dynamic Optimization Approach for the Optimal Planning of Distributed Biorefineries”, *Computers and Chemical Engineering*, 80, 37-62.

Santibañez-Aguilar J.E., González-Campos J.B., Ponce-Ortega J.M., Serna-Gonzales M., El-Halwagi M.M., 2015, “Supply chains and optimization for biorefineries. Sustainability of Products, Processes and Supply Chains-Theory and Applications”, Edited by Fengqi You, Chapter 19. *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 36, 475-497.

Savelski M.J., Bagajewicz M.J., 2001, “Algorithmic Procedure to Design Water Utilization Systems Featuring a Single Contaminant in Process Plants”, *Chemical Engineering Science*, 56(5), 1897-1911.

SENER-IDB-GTZ, 2006, Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México (Proyectos ME-T1007–ATN/DO-9375-ME y PN 04.2148.7-001.00).

Tong K., Gong J., Yue D., You F., 2012, “Stochastic Programming Approach to Optimal Design and Operations of Integrated Hydrocarbon Biofuel and Petroleum Supply Chains”, *American Chemical Society. Sustainable Chemistry and Engineering*, 2, 49-61.

Yeh K., Whittaker G., Realff M.J., Lee J.H., 2015, “Optimal Harvest Management Adaptation for a New Biorefinery Investment in a Timberlands Supply Chain Using a Modified Cyclic Scheduling Model”, *Computer Aided Chemical Engineering*, 36, 1570-7946.

Yoo C., Lee T.Y., Mn J., Moon I., Jung J.H., Han C., Oh J.M., Lee I.B., 2007, “Integrated Water Resource Management through Water Reuse Network Design for Clean Production Technology: State of the Art”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 24, 567-576.

You F.Q., Tao L., Graziano D.J., Snyder S.W., 2012, “Optimal Design of Sustainable Cellulosic Biofuel Supply Chains: Multiobjective Optimization Coupled with Life Cycle Assessment and Input-Output Analysis”, *AIChE Journal*, 58, 1157-1180.

Yue D., You F., Snyder S.W., 2014, “Biomass-To-Bioenergy and Biofuels Supply Chain Optimization: Overview, Key Issues and Challenges”, *Computers and Chemical Engineering*, 66, 36-56.

Zhang F.L., Johnson D.M., Johnson M.A., 2012, “Development of a simulation of biomass supply chain for biofuel production”, *Renewable Energy*, 44, 380-391.

Apéndices

Apéndice A. Configuraciones de parques eco-industriales.

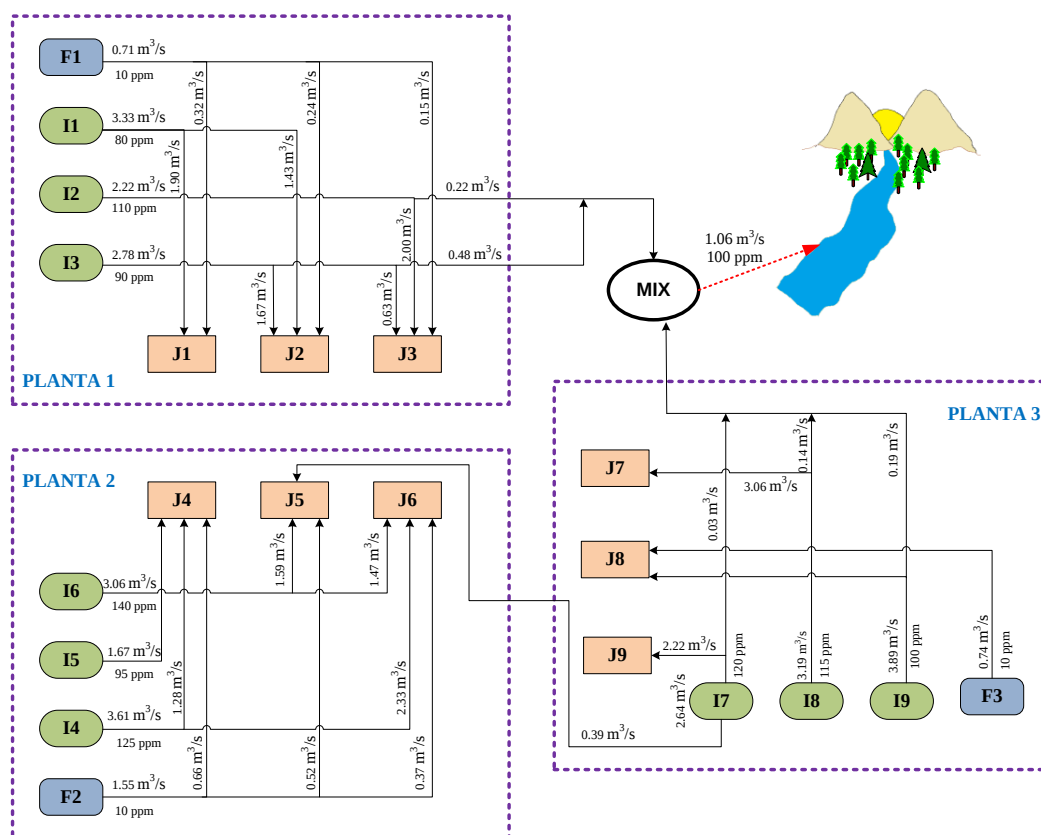


Figura A. Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 1.

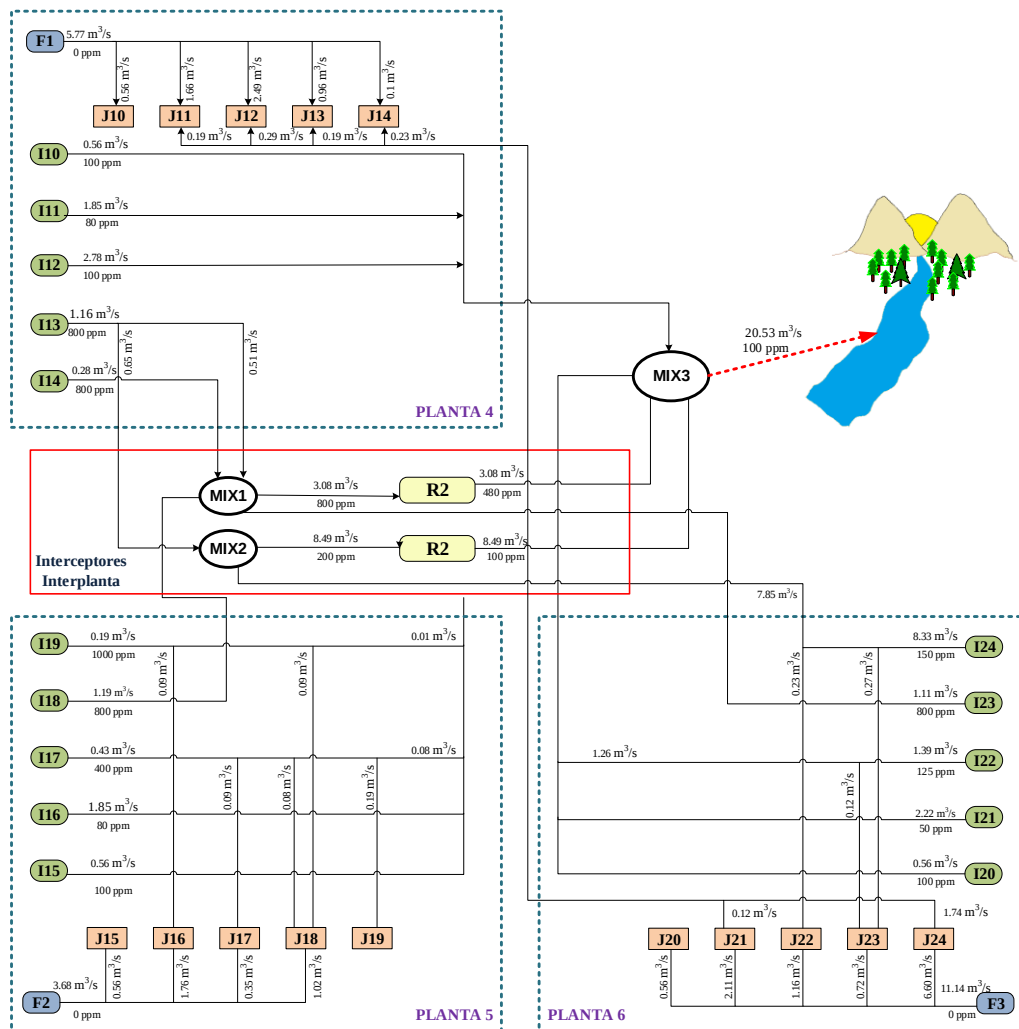


Figura B. Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 2.

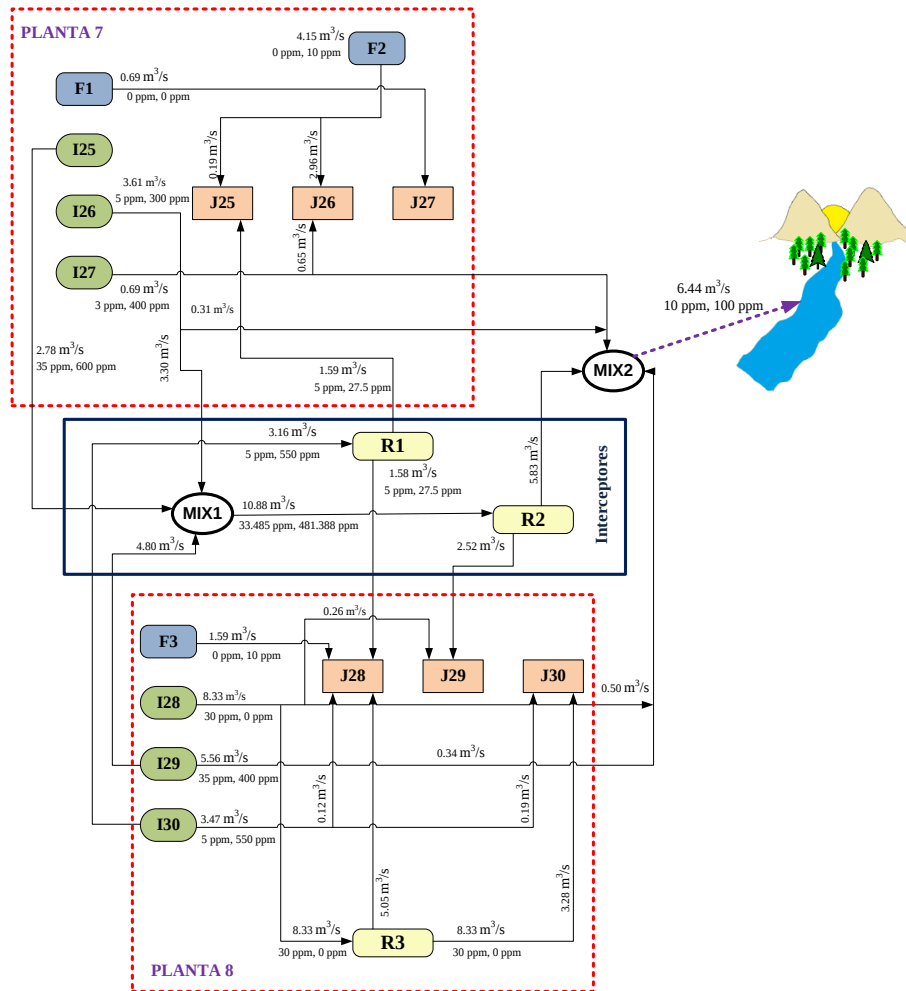


Figura C. Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 2.

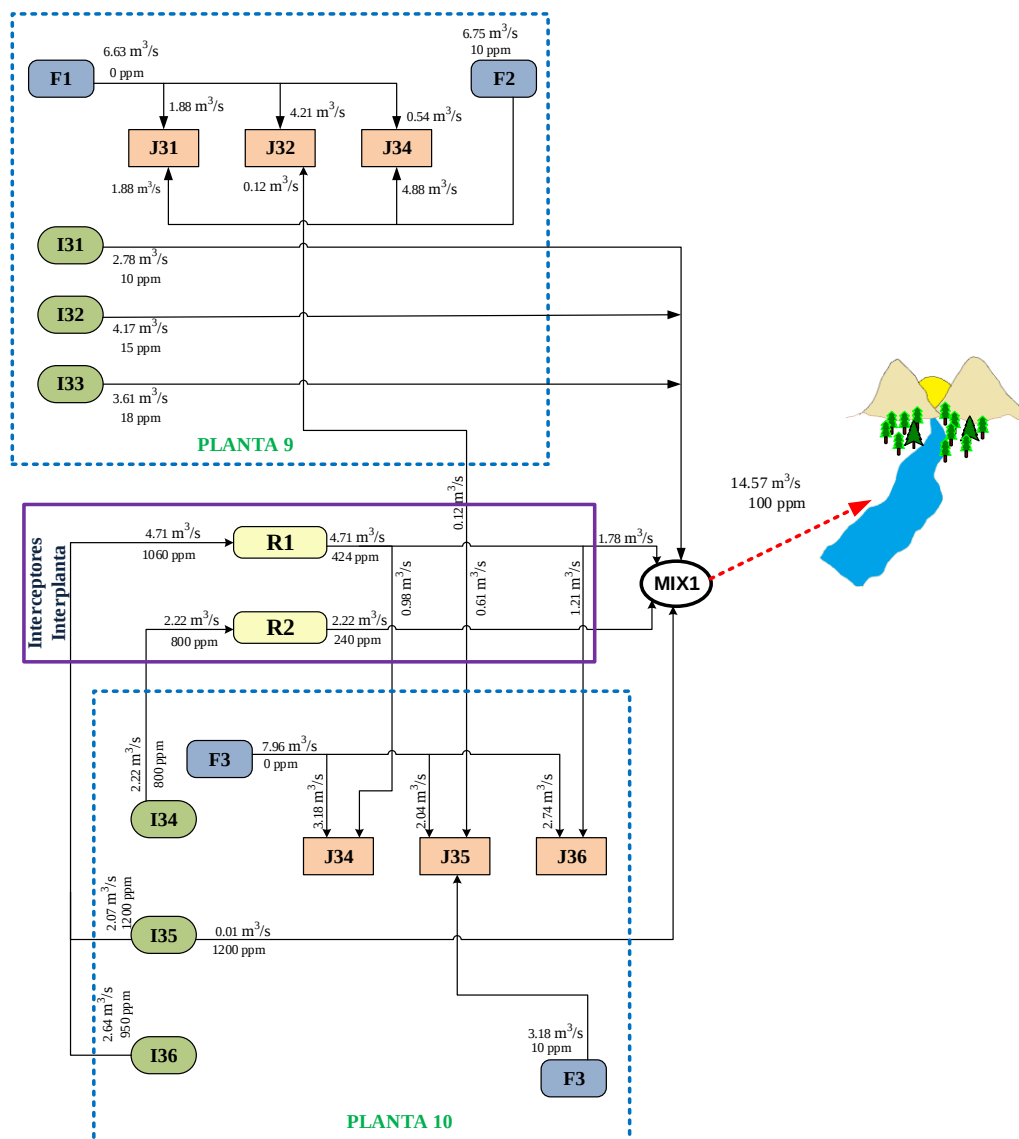


Figura D. Configuración óptima para el parque eco-industrial (PEI) 4.

Apéndice B. Datos agrícolas empleados en el modelo matemático para la instalación de un sistema de biorefinerías.

Tabla a. Rendimiento de los cultivos para la producción de bioetanol.

PRODUCCIÓN DE BIOETANOL (L/TON)		
MAÍZ	400	LITROS/TONELADA DE RESIDUO
TRIGO	345	LITROS/TONELADA DE RESIDUO
SORGO	400	LITROS/TONELADA DE RESIDUO
CAÑA DE AZÚCAR	138	LITROS/TONELADA DE GABASO

Tabla b. Rendimiento de los cultivos para la producción de biodiesel.

PRODUCCIÓN DE BIODIESEL		
JATROFA	436	LITROS/TONELADA DE RESIDUO
PALMA AFRICANA	258	LITROS/TONELADA DE RESIDUO

Tabla c. Rendimiento de los cultivos para la producción de biomasa.

PRODUCCIÓN DE RESIDUO DE CULTIVO		
MAÍZ	2.77	TONELADAS/HECTÁREA
TRIGO	7.3	TONELADAS/HECTÁREA
SORGO	52	TONELADAS/HECTÁREA
CAÑA DE AZÚCAR	45	TONELADAS/HECTÁREA
JATROFA	12	TONELADAS/HECTÁREA
PALMA DE ACEITE	433	TONELADAS/HECTÁREA

Tabla d. Rendimiento en la producción de granos.

PRODUCCIÓN DEL PRODUCTO PRINCIPAL DE CULTIVO (GRANOS)		
MAÍZ	2.77	TONELADAS DE GRANOS/HECTÁREA
TRIGO	6	TONELADAS DE GRANOS/HECTÁREA
SORGO	40	TONELADAS DE GRANOS/HECTÁREA
CAÑA DE AZÚCAR	75	TONELADAS DE CAÑA/HECTÁREA
JATROFA	9.8	TONELADAS DE SEMILLA/HECTÁREA
PALMA DE ACEITE	40	TONELADAS DE FRUTOS/HECTÁREA

Tabla e. Factor de conversión para la demanda de agua necesaria en la producción de biomasa (m³/ton de residuo de cultivo/año).

CULTIVO	$\beta_{m,r}^{feedstocks}$
MAÍZ	2166
TRIGO	410
SORGO	133
CAÑA	555.6
JATROFA	250
PALMA DE ACEITE	360

Tabla f. Costo unitario para la biomasa para cada tipo de cultivo.

CULTIVO	US\$/Ton
MAÍZ	11.22
TRIGO	11.84
SORGO	9.73
CAÑA	3.623
JATROFA	13.33
PALMA DE ACEITE	4.71

Tabla g. Costo unitario para la producción de granos.

CULTIVO	US\$/Ton
MAÍZ	224.4
TRIGO	236.78
SORGO	194.6
CAÑA	34.3
JATROFA	266.7
PALMA DE ACEITE	94.2