



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ESTRATEGIAS DE ANÁLISIS DEL NEXO ALIMENTOS-INDUSTRIA-
MEDIO AMBIENTE CONSIDERANDO ASPECTOS ECÓNOMICOS Y
AMBIENTALES**

TESIS presentada por:

M.C. 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:

DOCTOR EN CIENCIAS

EN

INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: D.C. José María Ponce Ortega

Co-Asesor: D.C. Eusiel Rubio Castro

Morelia, Michoacán, México

Febrero del 2020

Resumen

ESTRATEGIAS DE ANÁLISIS DEL NEXO ALIMENTOS-INDUSTRIA-MEDIO AMBIENTE CONSIDERANDO ASPECTOS ECÓNOMICOS Y AMBIENTALES

Por: MC. Dulce Celeste López Díaz

Febrero de 2020

Doctor en Ciencias en Ingeniería Química

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

El crecimiento poblacional y el actual estilo de vida han impulsado el incremento de la demanda de alimento, bienes y servicios provocando gran desarrollo en los sectores industrial, agrícola y energético para poder ajustarse a la demanda. El impacto ambiental que estas actividades han ocasionado va desde la sobreexplotación de los recursos hasta los grandes problemas de contaminación (descargas de efluentes con gran concentración de agentes contaminantes a cuencas hidrológicas y suelo, emisión de gases de efecto invernadero, etc.) que han afectado y degradado a los ecosistemas irreversiblemente. El interés por diseñar y operar procesos industriales sustentables ha abierto un gran panorama para poner en práctica metodologías que consideren simultáneamente aspectos económicos, ambientales y sociales. En ese sentido, el diseño eficiente de un proceso industrial tiene que estar fundamentado por un análisis riguroso en el que se consideren todas las etapas de la cadena de suministro que conforman este nexo productivo, en cuyo análisis se establezcan las interconexiones que delimitan la operación y producción a lo largo de todas las etapas. Por lo tanto en la presente tesis se propone dos estrategias basadas en modelos de optimización matemática para el análisis en la operación de sectores que operen en base al nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente con el objetivo de diseñar sistemas industriales complejos cuantificando el impacto ambiental y económico, establecer la localización óptima, operación eficiente de la cadena de suministro y generar conocimiento que permita brindar una herramienta sistemática y confiable para organizaciones gubernamentales y particulares que toman decisiones en términos de mejoras o propuesta de nuevos proyectos de esta índole.

Palabras Clave: *Optimización, Nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente, Sustentabilidad, Manejo de nutrientes, Cadena de suministro.*

Abstract

STRATEGIES OF ANALYSIS FOR THE ENERGY-FOOD-ENVIRONMENT NEXUS CONSIDERING ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL OBJECTIVES

By: M.S. Dulce Celeste López Díaz

February 2020

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

The population growth and the current lifestyle have driven the increase of the demand of food, goods and services producing great development for the industrial, agricultural and energy sectors to supply the requirements. The environmental impact that these activities have caused includes from over-exploitation of resources to major pollution problems (discharges of effluents to watersheds and soil, greenhouse emissions, etc.) which have enormously affected and degraded ecosystems. For this reason, the interest in designing and operating sustainable industrial processes has opened a wide panorama to implement methodologies that simultaneously consider economic and environmental objectives, as well as to combine remediation techniques with the propose of mitigating the environment impact. However, establishing and analyzing industrial systems as part of a macro-system can be useful to understand how its activity impact in other sectors, and how their interconnections between them limit the production efficiency. This research project proposes a mathematical optimization model to analyze the energy-food-environmental nexus with the objective of design a complex industrial system quantifying the environmental and economic impact to approximate these systems to sustainability to define the optimal location, efficient supply chain where this generated knowledge can be used as a powerful tool for decision makers in matter of proposal or improvement of new projects in this area.

Keywords: *Optimization, Food-energy nexus, Sustainability, Nutrient management, Supply chain.*

Dedicatoria

En la culminación de este proyecto de investigación, le dedico esta tesis:

A Mis padres *Gloria Esther Díaz Álvarez y Salvador López Córdova*

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.

A mis hermanos *Reyna Elizabeth López Díaz y Fernando Alexis López Díaz*

Por ser esa motivación y estar siempre a mi lado durante este largo camino, me dan fuerzas para poder convertirme en mejor persona.

A mis amigas *Edna, Ángel e Itzel* por siempre estar a mi lado, por escuchar mis problemas y siempre sostener mi mano en los buenos y malos momentos, los aprecio demasiado.

A mis compañeros y amigos del grupo PSE-UMSNH por compañía, y grandes recuerdos que creamos juntos.

En general a toda mi familia, amigos y personas que en algún momento estuvieron siendo gran apoyo y compartieron esta experiencia conmigo.

Contenido

Índice de tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Nomenclatura.....	xi
Agradecimientos	xxviii
Capítulo I. Introducción.....	29
1.1 Generalidades	29
1.2 Objetivos.....	30
1.2.1 Objetivo General	30
1.2.2 Objetivos Específicos	30
1.3 Justificación.....	31
1.4 Antecedentes.....	32
1.5 Alcance	35
1.6 Hipótesis	35
Capítulo II. Marco teórico	36
Capítulo III. Metodología.....	41
3.1 Modelo de optimización para la localización de biorefinerías considerando incertidumbre en el nexa Energía-Alimentos-Medio ambiente	43
3.1.1 Balance de masa para la cadena de suministro del sistema de biorefinerías	46
3.1.1.1 Balance de materia en la cuenca hidrológica	46
3.1.1.2 Modelación de la cadena de suministro en la producción de biocombustibles ...	50
3.1.2 Ganancias y costos	54
3.1.3 Funciones objetivo.....	57
3.2 Modelamiento del balance de fósforo en el nexa Energía-Alimentos-Medio ambiente	60
3.2.1 Balances de materia de fósforo.....	61

3.2.2 Análisis económico	73
Capítulo IV. Resultados.....	83
4.1 Análisis de resultados para la localización de biorefinerías considerando incertidumbre en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente.....	83
4.2 Análisis de resultados del balance de fósforo en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente	98
Conclusiones.....	108
Material suplementario.....	109
Bibliografía.....	118
APÉNDICE	125
A. Artículos publicados	125

Índice de tablas

Tabla	Nombre de la Tabla	Página
4.1	Demanda de biocombustibles en el mercado	89
4.2	Solución de los casos de estudio	90
4.3	Soluciones para los diferentes escenarios	92
4.4	Producción de biocombustibles para la ganancia esperada	94
A1	Parámetros	107
A2	Población urbana en Wisconsin	113
A3	Población de vacas en Wisconsin	114

Índice de Figuras

Figura	Nombre de la Figura	Página
2.1	Representación del nexo Agua-Energía-Lácteos	46
3.1	Metodología propuesta para el proyecto de investigación	48
3.2	Superestructura propuesta para la producción de biocombustibles considerando incertidumbre	50
3.3	Representación del nexo Agua-Energía-Lácteos	65
3.4	Balance de fósforo y de valor en el sector minero	66
3.5	Balance de fósforo y de valor en el sector químico	67
3.6	Balance de fósforo y de valor en el sector agrícola	69
3.7	Balance de fósforo y de valor en el sector de alimentos	71
3.8	Balance de fósforo y de valor en el sector urbano	72
3.9	Balance de fósforo y de valor en el sector de tratamiento de residuos urbanos	73
3.10	Balance de fósforo y de valor en el sector lácteo	74

3.11	Balance de fósforo y de valor del tratamiento de residuos orgánicos de las granjas	76
4.1	Estrategia de solución del modelo de optimización	87
4.2	Curva pareto para la ganancia vs la demanda de agua fresca	91
4.3	Producción de biocombustibles para los casos de estudio en la solución	92
4.4	Configuración óptima para las condiciones optimistas económicas en el escenario 3	93
4.5	Configuración óptima para las condiciones económicas pesimistas para el caso de estudio	94
4.6	Producción de biomasa en la cuenca hidrológica para el sistema en condiciones económicas optimistas	95
4.7	Producción de biomasa en la cuenca hidrológica para el sistema en condiciones económicas pesimistas	96
4.8	Demanda satisfecha de biocombustibles para la ganancia esperada en el escenario optimista	97
4.9	Demanda satisfecha de biocombustibles para la ganancia esperada en el escenario pesimista	97

4.10	Comparación del flujo de agua en condiciones económicas optimistas	98
4.11	Curva de probabilidad acumulada vs la ganancia	99
4.12	Probabilidad acumulada de emisiones de efecto invernadero en la solución de los escenarios	100
4.13	Flujo de fósforo en el caso de estudio base	102
4.14	Flujo de fósforo en el caso A	105
4.15	Flujo de fósforo en el caso B	106
4.16	Flujo de fósforo en el caso C	106
4.17	Flujo de fósforo en el caso D	107
4.18	Flujo de fósforo en el caso E	108
4.19	Flujo de fósforo en el caso F	109
4.20	Ganancia para todos los escenarios	109
4.21	Pérdidas de fósforo para todos los casos	110

Nomenclatura

A continuación, se describe la nomenclatura usada en los modelos matemáticos propuestos desarrollados en esta tesis.

Modelo de optimización para la localización de biorefinerías considerando incertidumbre en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente

$\alpha_{r,t,s}^{agriculture}$	Factor de conversión del flujo de agua requerido para la actividad agrícola en el tributaria t que descarga en el tramo de río r en el escenario s , $m^3/ha\ s$
$a_{m,r}^{exist}$	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 en la tributaria t en el tramo de río r , ha
A_s^{total}	Área total sembrada la producción de biomasa, ha
$\beta_{r,t,s}^{agriculture}$	Factor de conversión al flujo de descarga de agua de uso agrícola al tributaria t que se descarga al tramo de río r en el escenario s , $m^3/ha\ s$
$CapCost_s^{Biorefineries}$	Costo de capital para la instalación de un sistema de biorefinerías, US\$
$CO_2_s^{abs}$	Factor de absorción de emisiones por área cultivada, E99/ha
$CO_2_s^{prod}$	Factor de producción de CO_2 por la actividad industrial del sistema de biorefinerías, E99-L/año

$CO_2^{total}_s$	Producción total de emisiones de CO ₂ del nexa, E99
$D_{r,s}$	Descargas de origen agrícola en el tramo r en el escenario s , m ³ /s
$D_{r,t,s}$	Descargas agrícolas en el tributaria t del tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$f_{m,r,j,s}^{Grain-market}$	Flujo de granos producidos m en el tramo r enviado a los consumidores j en el escenario s , Ton/año
$f_{m,j,s}^{Grain-market-Max}$	Máximo flujo de granos m enviado a los consumidores j en el escenario s , Ton/año
$f_{m,r,r',s}$	Materia prima producida m para la biorefinería en la localización r' en el tramo de río en r en el escenario s , Ton/año
$f_{m,r,s}^{Prod-feedstocks}$	Flujo de materia prima producida m en el tramo en r en el escenario s , Ton/año
$f_{m,r,s}^{Prod-grains}$	Flujo de materia prima producida m en el tramo en r en el escenario s , Ton/año
$F_{m,r',s}$	Flujo de materia prima m producida enviada a la biorefinería localizada en r' en el escenario s , Ton/año
$F_{m,r'}^{max}$	Flujo máximo de materia prima m que es producida en el tramo r' , Ton/año
$FC_{m,r'}^{Biorefinery}$	Costo fijo total para la instalación de biorefinerías que emplean la materia prima m localizada en la posición r' , US\$
$FT_{r,t,s}$	Descargas desde el tributaria t al tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
G_s^{grains}	Ganancias obtenidas de la venta de granos en el escenario s , US\$/año
$G_s^{Products}$	Ganancias obtenidas de la venta de biocombustibles en el escenario s , US\$/año

$H_{r,s}$	Descarga total (industrial, residencial, etc.) al tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$I_{r,t}$	Corriente de descarga residencial tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$I_{r,t,s}$	Corriente de descarga residencial al tributaria t del tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
k_F	Factor usado para anualizar la inversión, año ⁻¹
$L_{r,s}$	Flujo de pérdidas totales (filtración y evaporación) para el tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$L_{r,t,s}$	Pérdidas totales (filtración y evaporación) en la tributaria t para el tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$MProfit$	Ganancia total del sistema en la mejor de los escenarios, \$US/año
$MWater$	Consumo de agua del sistema en el la mejor de los escenarios, m ³ /s
$OpCost_s^{Biorefineries}$	Costo de operación para las biorefinerías, US\$/año
$OpCost_s^{Feedstocks}$	Costo de operación por materia prima, US\$/año
$OpCost_s^{Water-biorefineries}$	Costo de operación por consumo de agua en las biorefinerías, US\$/m ³ /año
$OpCost_s^{Water-feedstocks}$	Costo de operación por agua consumida en los tramos de cultivo para la producción de materia prima, US\$/m ³ /año
$P_{k,m,r',s}^{Bio}$	Flujo de biocombustibles k producidos a partir de la materia prima m en la biorefinería localizada en r' en el escenario s , L/año
$P_{k,r',s}$	Flujo de biocombustibles k producido en la biorefinería localizada en r' en el escenario s , ton/año
$P_{k,r',j,s}^{Prod-market}$	Flujo total de biocombustibles k producidos en la biorefinería en r' enviado al consumidor j en el escenario s , L/año

$P_{k,j,s}^{Prod-market-Max}$	Flujo de producto máximo k enviado al consumidor j en el escenario s , L/año
$P_{r,s}$	Precipitación que se descarga en el tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$P_{r,t,s}$	Flujo de descarga por precipitación en el tributaria t del tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$P_s^{biototal}$	Producción total de biocombustibles, L/año
$Profit_s$	Ganancia total anual, US\$/año
Q_r^{In}	Flujo de agua en el tramo r , m ³ /s
$Q_{r,s}^{Initial-Out}$	Flujo de agua en la salida del tramo r en la condición inicial en el escenario s , m ³ /s
$Q_s^{Initial\ final}$	Flujo de agua en el tramo final de la cuenca hidrológica en la condición final, m ³ /s
Q_s^{final}	Flujo de agua en el tramo inicial de la cuenca hidrológica en la condición final, m ³ /s
$Q_{r,s}^{Out}$	Flujo de agua en la salida del tramo r en la condición final en el escenario s , m ³ /s
$S_{r,t}^{Treated}$	Flujo de efluentes tratados descargados en la tributaria t del tramo de río r , m ³ /s
$S_{r,t}^{Untreated}$	Flujo de efluentes de las unidades de tratamiento descargado a la tributaria t del tramo de río r , m ³ /s
$TCost_s^{Feedstocks}$	Costo unitario de transporte para materia prima, US\$/km
$TCost_s^{grains}$	Costo unitario de transporte para granos, US\$/km
$TCost_s^{products}$	Costo unitario de transporte para biocombustibles, US\$/km

$U_{r,s}$	Flujo de agua usada en el tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$U_{r,t,s}$	Flujo de agua usada de la tributaria t del tramo de río r en el escenario s , m ³ /s
$UC_{m,r'}^{Biorefinery}$	Costo unitario total por biorefinería, US\$/Ton/año
$UC_{m,r,s}^{Feedstocks}$	Costo unitario total para producir materia prima m en el campo de cultivo en el tramo de río r en el escenario s , US\$/Ton/año
$UC_{m,s}^{Grains}$	Precio unitario para el grano m en el escenario s , US\$/Ton
$UC_{k,s}^{Product}$	Precio unitario para el biocombustible k en el escenario s , US\$/Ton
$UC_r^{Water-feedstocks}$	Costo unitario de agua en el campo de cultivo en el tramo de río r , US\$/m ³
$UC_{r'}^{Water-used-biorefineries}$	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 en el tramo de río 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 el tramo de río 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 r' enviados al consumidor j , US\$/km/ton/año
$VC_{m,r'}^{Biorefinery}$	Costo variable para la instalación de biorefinerías en r' , US\$/Ton/año
$W_{k,r',s}^{Discharge-biorefinery}$	Flujo de agua descargada por las biorefinerías para producir biocombustibles k localizadas en r' en el escenario s , m ³ /s
$W_{m,r,s}^{Discharge-feedstocks_Initial}$	Descarga de agua inicial total por la producción de la materia prima m en el campo de cultivo del tramo de río r en el escenario s , m ³ /s

$W_{m,r,s}^{Discharge-feedstock}$	Flujo de agua descargada por la producción de la materia prima m en el campo de cultivo en el tramo de río r en el escenario s , m^3/s
$W_{k,r',s}^{Used-biorefinery}$	Flujo de agua usada por las biorefinerías para producir biocombustibles k en la locación r' en el escenario s , m^3/s
$W_{m,r,s}^{Used-feedstocks_Initial}$	Descarga de agua inicial por la producción de la materia prima m en campo de cultivo del tramo de río r en el escenario s , m^3/s
$W_{m,r,s}^{Used-feedstock}$	Flujo de agua usada por la producción de la materia prima m en el campo de cultivo en el tramo de río r en el escenario s , m^3/s
$Water_s^{required}$	Flujo total de agua requerida para satisfacer la demanda de agua por el sistema de biorefinerías en el escenario s , m^3/s
$WProfit$	Ganancia total del sistema en el peor de los escenarios, US\$/año
$WWater$	Consumo de agua del sistema en el peor de los escenarios, m^3/s

Símbolos Griegos

$\alpha_{k,m,s}^{Bioref}$	Factor de conversión relativo a la producción de biocombustible k desde la materia prima m en el escenario s
$\alpha_{m,r,s}^{feedstock}$	Factor de conversión para producir materia prima m en el campo de cultivo en el tramo de río r en el escenario s
$\alpha_{m,r,s}^{grains}$	Factor de conversión para el grano m cultivado en el campo del tramo de río r en el escenario s
$\alpha_{k,m,s}^{used-biorefinery}$	Factor de conversión para el agua usada por la biorefinería en r' en el escenario s
$\alpha_{k,m,s}^{ww-biorefinery}$	Factor de conversión para los efluentes de las biorefinerías que producen biocombustibles k a partir de la materia prima m en el escenario s

$\beta_{m,r,s}^{feedstocks}$	Factor de conversión que representa el flujo total de agua usada para producir la materia prima m en el campo de cultivo en el tramo de río r en el escenario s
$\gamma_{m,r,s}^{discharge}$	Factor de conversión que representa la relación con la descarga de agua y la extracción de agua para producir la materia prima m en el campo de cultivo en el tramo de río r en el escenario s
$\sigma_{m,r'}^{Biorefinery}$	Coefficiente de escala para el costo variables al instalar una biorefinería en r' alimentada por la materia prima m

Variables Binarias

$y_{m,r'}^{Biorefinery}$	Variable binaria para la instalación de biorefinerías alimentada por la materia prima m , en la posición r'
--------------------------	---

Subíndices

k	Productos (Biocombustibles)
m	Materia prima
j	Consumidor
r	Tramo de río
r'	Posible localización de una biorefinería
t	Tributaria
s	Escenario

Modelamiento del balance de fósforo en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente

La nomenclatura del modelo para el análisis de fósforo a lo largo del nexo lácteo-agrícola-medio ambiente se presenta a continuación:

B_{AS}	Balance económico del sector agrícola, US\$/año.
B_{CS}	Balance económico en el sector químico, US\$/año.
B_{DST}	Balance económico en el sector lácteo, US\$/año.
B_M	Balance económico en el sector de manejo de estiércol, US\$/año
B_{MIS}	Balance económico en el sector minero, US\$/año.
B_{TOTAL}	Balance económico global del nexo, US\$/año.
B_{US}	Balance económico en el sector urbano, US\$/año.
B_{WS}	Balance económico en el sector de manejo de residuos urbanos, US\$/año.
C_{add}	Costo unitario de los aditivos alimentarios, US\$/Ton aditivos.
C_{corn}	Precio unitario de maíz, US\$/Ton maíz.
C_{cheese}	Costo unitario de queso, US\$/Ton queso.
C_{desh}	Costo unitario para tratar desechos orgánicos con alto contenido de fósforo, US\$/Ton desecho.
$C_{f_{fert}}$	Costo unitario de fertilizante químico, US\$/Ton fertilizante.

$C_{manure,r}$	Costo unitario de fertilizante orgánico a partir de estiércol, US\$/Ton fertilizante.
$C_{manure,t}$	Costo unitario de fertilizante orgánico producido en el sector de manejo de residuos lácteos, US\$/Ton fertilizante.
C_{milk}	Costo unitario de leche, US\$/L leche.
C_{rock}	Costo unitario de roca fosfórica, US\$/Ton roca fosfórica.
C_{silage}	Precio unitario de paja de maíz, US\$/Ton paja.
C_{waste}	Costo unitario de tratar fósforo en los efluentes, US\$/Ton P descargado.
$Cf_{CS,DC}$	Ganancia por la venta de aditivos alimentarios al sector lácteo procesados al sector químico, US\$/año.
$Cf_{CS,ES}$	Penalización por descarga de efluentes con alto contenido de fósforo en el sector químico, US\$/año.
$Cf_{CS,S}$	Ganancia por la venta de fertilizantes químicos al sector agrícola, US\$/año.
$Cf_{DS,B}$	Ganancias por la venta de productos lácteos en exceso a mercados externos, US\$/año.
$Cf_{DC,ES}$	Penalización del sector lácteo por la descarga de desechos orgánicos al medio ambiente, US\$/año.
$Cf_{DC,M}$	Ganancias del sector lácteo por la venta de estiércol como materia prima para la producción de fertilizante orgánico en el sector de manejo de residuos lácteos, US\$/año.
$Cf_{DS,E}$	Ganancia por la exportación de productos lácteos para satisfacer la demanda externa, US\$/año.

$Cf_{DS,F}$	Ganancia por la venta de productos lácteos al sector alimentario de parte del sector agrícola, US\$/año.
$Cf_{F,US}$	Ganancia por la venta de productos agrícolas y lácteos al sector urbano de parte del sector alimentario, US\$/año.
$Cf_{M,ES}$	Penalización del sector de manejo de estiércol por la descarga de efluente al medio ambiente, US\$/ Ton P residuos.
$Cf_{M,S}$	Ganancia por la venta de fertilizante orgánico al sector químico de parte del sector de tratamiento de residuos orgánicos del sector lácteo, US\$/año.
$Cf_{MIS,CS}$	Ganancia de la venta por el sector químico de roca fosfórica extraída en el sector minero, US\$/año.
$Cf_{MIS,ES}$	Penalización por la descarga al medio ambiente del flujo de fósforo del sector minero, US\$/año.
$Cf_{HC,B}$	Ganancia por la venta de excedentes en la producción agrícola, US\$/año.
$Cf_{HC,DC}$	Ganancia por la venta de productos agrícolas como alimento de ganado al sector lácteo, US\$/año.
$Cf_{HC,ES}$	Penalización por la descarga de efluente con alto contenido de fósforo de la unidad de tratamiento de estiércol en el sector agrícola, US\$/año.
$Cf_{HC,F}$	Ganancia por la venta de productos agrícolas al sector alimenticio de parte de la etapa de tratamiento de cultivo del sector agrícola, US\$/año.
$Cf_{RC,ES}$	Penalización por la descarga de efluente con alto contenido de fósforo de la unidad de cosecha de cultivo en el sector agrícola, US\$/año.

$Cf_{S,ES}$	Penalización por la descarga directa al medio ambiente de fósforo en los campos de cultivos, US\$/año.
$Cf_{US,ES}$	Penalización al sector urbano por la descarga directa de efluente con alto contenido de fósforo al medio ambiente, US\$/año.
$Cf_{US,WS}$	Ganancia por la venta de residuos con alto contenido de fósforo al sistema de manejo de residuos urbanos, US\$/año.
$Cf_{WS,ES}$	Penalización del sector de manejo de residuos urbanos por la descarga de desechos al medio ambiente, US\$/año.
$Cf_{WS,S}$	Ganancia del sector de manejo de residuos urbanos por la venta de lodos enriquecidos en fósforo como fertilizante al sector agrícola, US\$/año.
$f_{CS,DC}$	Flujo de fósforo del sector químico al sector lácteo contenido en los aditivos alimenticios empleados como suplemento en la dieta del ganado, Ton P/año.
$f_{CS,ES}$	Flujo de fósforo que no es absorbido por el suelo y es filtrado al medio ambiente como un efluente contaminante, Ton P/año.
$f_{CS,S}$	Flujo de fósforo del sector químico al sector agrícola como fertilizante, Ton P/año.
$f_{DC,DS}$	Flujo de fósforo de la leche producida en el subsector de granjas (DC) que es enviada al subsector de procesamiento del sector lácteo, Ton P/año.
$f_{DC,ES}$	Pérdidas de fósforo en el subsector de granjas por la eficiencia en el aprovechamiento del nutriente por el ganado, Ton P/año
$f_{DC,M}$	Flujo de fósforo contenido en el estiércol producido en el subsector de granjas enviado al sistema de tratamiento de residuos orgánicos del sector lácteo, Ton P/año.

$f_{DS,E}$	Flujo de fósforo en los productos lácteos (leche y queso) que son exportados para satisfacer demandas de mercados externos, Ton P/año.
$f_{DS,F}$	Flujo de fósforo contenido en los productos lácteos que son producidos en sitio y son enviados al sector alimenticio, Ton P/año.
$f_{F,ES}$	Pérdidas de fósforo respecto a problemas de eficiencia de los procesos de tratamiento y transporte del sector alimenticio, Ton P/año.
$f_{F,US}$	Flujo de fósforo en los productos agrícolas y lácteos que son almacenados en el sector alimenticio para satisfacer la demanda del sector urbano, Ton P/año.
$f_{HC,DC}$	Flujo de fósforo como productos agrícolas enviados desde la segunda etapa de procesamiento del sector agrícola a las granjas como alimento en el sector lácteo, Ton/año.
$f_{HC,E}$	Flujo de fósforo en la exportación por sobreproducción de productos agrícolas en la segunda etapa de procesamiento del sector agrícola, Ton P/año.
$f_{HC,ES}$	Pérdidas de fósforo en la segunda etapa de procesamiento, Ton P/año.
$f_{HC,F}$	Flujo de fósforo contenido en los productos agrícolas que son enviados al sector alimenticio desde la segunda etapa de procesamiento del sector agrícola, Ton P/año.
$f_{HC,S}$	Flujo de nutriente enviado a los campos de cultivo suministrado como fertilizante orgánico como <i>biochar</i> producido en la etapa de cosecha de cultivos (HC), Ton P/año.
$f_{M,ES}$	Perdidas de fósforo al medio ambiente en el tratamiento del estiércol para ser procesado como fertilizante, Ton P/año.

$f_{M,S}$	Flujo de fósforo contenido en fertilizante orgánico de origen estiércol producido en el sector de tratamiento de residuos del sector lácteo, Ton P/año
f_{MIS}	Balance de fósforo contenido en roca fosfórica extraída en las reservas del sector minero, Ton P/año.
$f_{MIS,CS}$	Flujo de fósforo de roca fosfórica enviada al sector químico para satisfacer la demanda, Ton P/año.
$f_{MIS,ES}$	Descarga de fósforo al medio ambiente por descarga de efluentes al medio ambiente, Ton P/año.
f_{pch}	Contenido de fósforo presente en la producción de queso en el sector lácteo, Ton P/año.
f_{pm}	Contenido de fósforo en la producción de leche en el sector lácteo, Ton P/año.
$f_{RC,HC}$	Flujo de fósforo contenido en los productos agrícolas enviados desde la primera a la segunda etapa de procesamiento, Ton P/año.
$f_{RC,ES}$	Pérdidas de fósforo en la segunda etapa de procesamiento del sector agrícola, Ton P/año.
$f_{RC,S}$	Flujo de fósforo desde la primera etapa de procesamiento como <i>biochar</i> al suelo donde es aprovechado como fertilizante, Ton P/año.
$f_{S,ES}$	Perdidas de fósforo por la eficiencia en la absorción del nutriente, Ton P/año
$f_{S,RC}$	Flujo de fósforo del sub-sector del área de cultivo a la primera etapa de procesamiento en el sector agrícola, Ton P/año.
$f_{US,ES}$	Pérdidas de fósforo en el sector urbano, Ton P/año.
$f_{US,WS}$	Flujo de fósforo contenido en los efluentes producidos en el sector urbano que son enviados al sistema de manejo de residuos urbanos, Ton P/año.

$f_{WS,ES}$	Flujo de fósforo en los efluentes que son descargados como pérdidas al medio ambiente en el sector de manejo de residuos urbanos, Ton/año.
$f_{WS,S}$	Flujo de fósforo contenido en lodo enriquecido producido por el sector de tratamiento de residuos urbanos que es enviado al sector agrícola como fertilizante orgánico, Ton P/año.
P_{cow}	Población de ganado en las granjas del sector lácteo, Cabezas de ganado
P_{human}	Población del sector urbano, ha.
x_{add}	Contenido de fósforo en los aditivos alimentarios, Ton P/Ton aditivos.
x_{cheese}	Contenido de fósforo en queso, Ton P/Ton queso.
X_{cheese}	Fracción de leche que es procesada a queso.
x_{corn}	Contenido de fósforo en los granos de maíz, Ton P/Ton maíz.
X_{corn}	Fracción de granos en la producción total de cultivo
x_{desh}	Contenido de fósforo en los desechos orgánicos, Ton P/Ton desecho.
x_{fert}	Contenido de fósforo en los fertilizantes químicos, Ton P/Ton fertilizante.
$x_{manure,r}$	Contenido de fósforo en el fertilizante orgánico a partir de estiércol producido en el sector de manejo de residuos lácteo, Ton P/Ton fertilizante.
$x_{manure,t}$	Contenido de fósforo en el fertilizante orgánico producido en el sector de manejo de residuos lácteo, Ton P/Ton fertilizante.

x_{milk}	Contenido de fósforo en leche, Ton P/L leche.
X_{milk}	Fracción de leche que es destinada como producto lácteo final.
x_{rock}	Contenido de fósforo en la roca fosfórica extraída en el sector minero, Ton P/Ton roca.
x_{silage}	Contenido de fósforo en la paja de maíz, Ton P/Ton paja.
X_{silage}	Fracción de paja en la producción total de cultivo

Símbolos Griegos

α_{CS}	Factor de eficiencia para el rendimiento de la roca fosfórica a ser transformada a productos químicos, Ton P roca fosfórica/Ton P químicos.
$\alpha_{DC,ES}$	Factor de eficiencia para el aprovechamiento de fósforo en la población de ganado.
$\alpha_{F,ES}$	Factor de eficiencia de los procesos de tratamiento y transporte de los alimentos almacenados en el sector alimentario.
$\alpha_{HC,ES}$	Factor de eficiencia de la segunda etapa de procesamiento respecto a la cantidad de granos y paja recibidos de la primera etapa de procesamiento, y los productos finales del sector.
α_{MIS}	Factor de eficiencia respecto a la producción total de roca fosfórica en el sector minero y las pérdidas por eficiencia de los procesos de extracción.
$\alpha_{RC,ES}$	Factor de eficiencia de la segunda etapa de procesamiento respecto a lo alimentado y las pérdidas de los procesos.

$\alpha_{RC,S}$	Factor de eficiencia en la producción de <i>biochar</i> en la primera etapa de procesamiento.
$\alpha_{S,ES}$	Factor de aprovechamiento del nutriente por los campos de cultivo.
$\alpha_{US,ES}$	Factor de eficiencia del sector urbano, debido a la distribución y consumo.
$\alpha_{WS,S}$	Factor de eficiencia del sector de manejo de residuos urbanos, estimado respecto a la presencia de fósforo a la entrada del sector y
β_{chp}	Factor de consumo de queso por habitante, Ton queso/Ha/año.
$\beta_{CS,DC}$	Factor de consumo de aditivos por el ganado, Ton P/cabeza de ganado.
β_{pc}	Factor que representa el consumo de granos de maíz por persona, Ton maíz/Ha/año.
β_{prc}	Factor de requerimiento de leche para producir queso, Ton queso/L leche.
β_{mc}	Factor que representa el rendimiento de leche para producir queso, L leche/Ton queso.
β_{milk}	Producción de leche por cabeza de ganado, L/UG/año.
β_{mp}	Factor de consumo de leche por habitante, L/Ha/año.
β_{rc}	Factor para el consumo de granos por cabeza de ganado, Ton maíz/UG/año.
β_{rs}	Factor de consumo de paja por cabeza de ganado, Ton paja/UG/año.

Índices

CS	Sector químico
DS	Sector lácteo
ES	Sector medio ambiente
FS	Sector alimenticio
MS	Sector de manejo de estiércol
MIS	Sector minero
US	Sector urbano
WS	Sector de manejo de residuos urbanos

Agradecimientos

A La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,

Posgrado en Ingeniería Química

Al Dr. José María Ponce Ortega

Mi Asesor, por compartir sus conocimientos conmigo con ímpetu y cordialidad siempre, le agradezco infinitamente su confianza para llevar a cabo este proyecto, su validez humana y paciencia en muchos momentos que fueron necesarios.

A mi Comité Tutorial:

Dr. Eusiel Rubio Castro, Dr. Fabricio Nápoles Rivera, Dr. Medardo Serna

González, Dr. Agustín Jaime Castro Montoya

Parte fundamental de este proyecto, que mediante sus contribuciones, comentarios y análisis aprendí y mejoré indudablemente.

En igual medida agradezco a:

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)

Por el apoyo económico brindado durante estos años.

Dulce Celeste López Díaz

Capítulo I. Introducción

En esta sección se establece la problemática del proyecto de investigación. Específicamente, en las generalidades se define el esquema teórico y el escenario actual en que se desarrolla la problemática y el propósito general. En tanto que en los objetivos se da a conocer de manera puntual lo que se quiere alcanzar, mediante la justificación se establece el interés y los principios que respaldan la importancia de llevar a cabo este proyecto. Y en los antecedentes se da a conocer la trayectoria de conocimiento generado anteriormente en torno a la problemática presente y que ha brindado un panorama más amplio de lo que falta por considerar para futuros trabajos de investigación. Por otra parte, en el alcance se determina el área de conocimiento y aplicación a la que va dirigido este proyecto; y al final de esta sección se describe la hipótesis a sustentar.

1.1 Generalidades

El crecimiento poblacional y el actual estilo de vida establecen un crecimiento en la demanda de productos y servicios. Sin embargo, durante décadas la actividad de los principales sectores productivos ha desencadenado un problema ambiental importante, poniendo en riesgo la disponibilidad y calidad de los recursos naturales. Con la finalidad de satisfacer estos requerimientos, el desarrollo de los sectores agrícola y energético se ha impulsado con el perfeccionamiento de las tecnologías de procesamiento, de operación, así como de remediación ambiental. En este sentido, la optimización de procesos aparece como una herramienta indispensable para diseñar y reestructurar procesos productivos a fin de hacerlos más eficientes. Actualmente, la búsqueda por sistemas sustentables exige análisis ambientales, económicos y sociales con la finalidad de incluir cada uno de estos aspectos en el diseño y operación. Sin embargo, debido a la complejidad de la operación de los sectores productivos y las estrechas interconexiones entre los mismos, resulta complicado establecer un estudio riguroso mediante sectores aislados, ya que la actividad de uno repercute en las etapas del otro conformando un nexo. Recientemente, la conceptualización del sector industrial como parte de un conjunto ha permitido desarrollar esquemas más robustos y brinda un panorama más amplio a cerca de su operación y de las afectaciones que se puedan tener, con la finalidad de establecer un conocimiento más amplio entre las interconexiones con otros sectores que permitan establecer un diseño y operación eficiente para los sectores productivos involucrados. Particularmente, sistemas

complejos, como el caso de las biorefinerías, donde su actividad está estrechamente interconectada con el sector agrícola, en específico por la producción de biomasa, permiten cuantificar de manera más precisa la demanda de recursos naturales y afectación ambiental que se produce en el diseño de un tren industrial para la producción a gran escala que satisfaga la demanda de una región en particular. A partir de esto es obvio que un estudio más extenso de los sectores productivos puede generar un análisis preciso para identificar las estrechas relaciones de las etapas de procesos que ayuden a establecer soluciones a los principales problemas de operación, suministro, etc. Estimar el consumo global de recursos, el impacto ambiental, localización de plantas industriales brinda una herramienta rigurosa para los tomadores de decisiones al momento de financiar y asentar proyectos nuevos y existentes.

1.2 Objetivos

En esta sección se definen de forma precisa la finalidad de la presente tesis. 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 basada en modelos de optimización que definan, mediante un análisis riguroso, sometido a objetivos ambientales, económicos y sociales, el diseño y operación eficiente de sistemas industriales complejos (nexos), cuya actividad tiene gran impacto en la economía de la región.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una superestructura que defina las interconexiones entre la actividad industrial y las demás actividades productivas que conforman el nexo.
- Deducir un modelo basado en programación matemática para establecer un análisis de operación en base a una cadena de suministro a lo largo del nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente.
- Codificar el modelo matemático propuesto en la plataforma *GAMS* para implementar un caso de estudio que permita resolver un problema de optimización que determine el comportamiento del sistema.

- Establecer un análisis ambiental respecto al impacto ambiental que la operación de estos sistemas tiene permitiendo definir la localización óptima de las plantas industriales, así como el consumo de recursos para llevar a cabo cada uno de los procesos necesarios.
- Establecer un análisis económico en base a la demanda de recursos y venta de productos que permita establecer la factibilidad de la actividad industrial de interés dentro del nexo.
- Identificar aquellas actividades productivas que tienen mayor impacto en el nexo que permitan delimitar la eficiencia global del nexo.

1.3 Justificación

El incremento en la producción de los principales sectores productivos ha ayudado a forjar una economía sólida en grandes ciudades, siendo un pilar importante de la sociedad actual. Debido al crecimiento poblacional y las condiciones del mercado, la demanda de ciertos productos, utilidades y recursos ha aumentado considerablemente, a la par que ha ocasionado gran impacto social y controversia por lo agresivo de los procesos asociados. El sector industrial debe someterse a una reestructuración de sus procesos aplicando innovación en tecnologías de procesamiento, operación, tratamiento y aprovechamiento de residuos para poder adaptarse al escenario actual. Durante muchos años, el estudio del sector industrial ha permitido desarrollar metodologías y prácticas para una operación eficiente y acorde a los objetivos ambientales, normativas y condiciones sociales. Por ejemplo, si se proponía reducir el consumo de electricidad en una planta de etanol, se estudiaba a este proceso como un proceso individual tratando de establecer las condiciones más idóneas que permitieran limitar el uso de calor externo mediante la reciclo de líneas calientes u otras alternativas. Sin embargo, se ha encontrado en diversos trabajos de investigación que cualquier actividad productiva no trabaja como un sistema singular si no que tiene interconexiones con otros sectores que le abastecen de materias primas, energía, agua, aditivos necesarios para el procesamiento de los productos de interés introduciendo el concepto de nexo industrial en las líneas de investigación actual. En ese sentido, las cadenas de suministro, las redes de distribución de agua y energía brindan una visualización más amplia de cómo algunos sectores tienen una estrecha conexión con las actividades del sector productivo de estudio y como las limitaciones de uno u otro pueden afectar al sistema en general debido a la simbiosis que se genera. Por lo que, proponer un análisis global que permita generar conocimiento

para entender la operación de sistemas industriales complejos, con la finalidad de establecer mejoras en su estructura interna y exterior para tener procesos eficientes que permitan ajustarse a las condiciones impuestas por quienes toman decisiones en base a los objetivos actuales. Específicamente el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente es el nexo de interés en este proyecto de investigación, cuya importancia y crecimiento en algunas regiones surge principalmente de la búsqueda de alternativas energéticas para poco a poco ir sustituyendo a los combustibles fósiles. Como pasa en el caso de la producción de biocombustibles, esta actividad requiere la estrecha colaboración de los sectores químico, agrícola, energético y medio ambiente donde existen flujo de materiales y recursos de unas etapas de proceso a otras de un sector vecino para poder satisfacer sus requerimientos de operación; el cultivo de la biomasa se lleva a cabo en los campos de cultivo del sector agrícola donde el sector químico satisface de fertilizantes para conseguir un mejor rendimiento y cualidades del cultivo ideales y obtener un alto rendimiento de producción de biocombustibles. Por otra parte, el sector bioenergético puede abastecer de biocombustibles al sector agrícola para la operación de maquinaria y transporte; en este tipo de acciones de redes entre las etapas a lo largo de cada actividad productiva que conforman el nexo. En por ello que, a partir del conocimiento generado por el estudio del nexo, se pueden efectuar análisis rigurosos de seguimiento de algunas características, recursos, productos, etc. estableciendo cálculos sobre la demanda total de energía y agua, el impacto ambiental global para producir cierto producto, seguimiento de contaminantes, seguimiento de nutrientes, entre otros. El seguimiento de nutrientes ha despertado interés por la introducción del mercado de nutrientes, donde se busca el eficiente uso de estos mediante estrategias de recuperación; por lo que el balance a lo largo de una cadena de suministro proporciona información del comportamiento de nutrientes en las diversas etapas y permite identificar los sitios de obtención y demanda para definir si el sistema puede unirse a este mercado.

1.4 Antecedentes

La conceptualización de la estructura de los nexos industriales, como es el caso del nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente, puede remontarse desde la introducción de la integración de procesos, cuya finalidad fue reducir los costos en los procesos industriales aprovechando líneas de calor entre los procesos para disminuir el consumo de fuentes de calor externas ^[1-5]. Así también, la integración de plantas industriales para compartir recursos indispensables como son

las corrientes de agua mediante la integración de redes de agua en trabajos propuestos por Olesen y Polley (1996) ^[6], Chew y col. (2007) ^[7], Foo (2008) ^[8], Rubio Castro y col. (2011) ^[9]. Como es conocido con la aplicación de estas metodologías, el consumo de energía y agua tuvieron una reducción considerable, surgiendo el interés de interconectar a los procesos de plantas vecinas permanentemente extendiéndose a lo que hoy en día se conoce como parques eco-industriales. En este sentido, la síntesis de este tipo de sistemas mediante modelación matemática se extendió de igual manera para el intercambio de energía y materiales como parte de una estrategia para reducir el impacto ambiental por la sobreexplotación de recursos naturales en las regiones donde se asentaban las grandes industrias (Acobsen y col. 2006, Lim y col. 2010, Wang y col. 2014, Boix y col. 2015) ^[10-13]. Al inicio, la aplicación de estas innovadoras estrategias era empleada principalmente en plantas de alto valor agregado, como la industria eléctrica, petrolera, alimenticia, química, agrícola y manejo de residuos.

Por otra parte, cerca de los 2000s, la demanda de los biocombustibles se incrementó debido al cierre de grandes reservas de petróleo que abastecieron la demanda energética durante décadas, creando una crisis por escases de gas natural y combustibles líquidos de origen fósil, así como por el gran problema ambiental por la contaminación de emisiones de efecto invernadero; debido a ello la producción de biocombustibles se convirtió en una alternativa atractiva para los gobiernos, quienes invirtieron enormemente en este rubro. En cuanto a la producción a gran escala de biocombustibles, se establece el diseño de una cadena de suministro eficiente que considera las rutas de producción y distribución ideales en base a la selección de biomasa, rutas de obtención de biodiesel y bioetanol, tratamiento de residuos, y distribución de los productos. Mele y col. (2008) ^[14], Papapostolou y col. (2011) ^[15], Zhang y col. (2012) ^[16], Yue y col. (2014) ^[17] propusieron metodologías para establecer un diseño de biorefinerías considerando objetivos económicos y ambientales simultáneamente. A pesar de las ventajas que los biocombustibles han demostrado, la producción a gran escala produce gran impacto ambiental, principalmente por el gran consumo de agua por parte del sector agrícola asociado y la descarga de residuos. El-Baz y col (2005) ^[18] propusieron un modelo considerando una metodología de rastreo del flujo de agua para definir el consumo mediante MFA (Material Flow Analysis). Burgara-Montero y col. (2013) ^[19] introducen un modelo de optimización implementando la técnica del MFA, permitiendo establecer los sitios de instalación óptimos de sistemas de tratamiento de efluentes. En 2014, López-Villarreal y col. ^[20] establecieron una estrategia para garantizar la sustentabilidad de la

producción de biocombustibles en la cuenca hidrológica mediante este preciso análisis. Conforme el desarrollo de la industria de los biocombustibles fue abarcando el mercado, a la par otro tipo de energías fue abriéndose en el mercado destacando la cogeneración energética. Debido a la limitación en la factibilidad económica de las fuentes energéticas alternativas (biocombustibles, energía eólica, energía solar, etc.), procesos industriales implementando más de una alternativa presentaba ventajas económicas y ambientales importantes. Con la inclusión de más de un sector energético en la operatividad de una planta, además de los sectores que abastecían de materias primas y recursos, fue obligatorio considerar, en el diseño de nuevos procesos y en mejoras, todas las interacciones existentes entre el proceso industrial de interés y las demás actividades productivas que pudiesen intervenir, surgiendo dentro de la integración de procesos el concepto de nexos industriales. Considerando la operación de un proceso industrial desde el punto de vista del nexo agua-energía establece el uso óptimo de agua fresca para garantizar la sustentabilidad de la actividad industrial necesaria para la generación energética ^[21]. Las metodologías que se sustentan en este análisis permiten establecer el efecto de las sinergias y del compromiso de los subsistemas para contribuir en la minimización del impacto ambiental ^[22]. En 2017, Thiede y col. ^[23] a través del concepto de nexo agua-energía aplicó una metodología a una fábrica automotriz para la integración energética y de agua en los sistemas de enfriamiento, calentamiento, bombeo, y tratamiento de agua resultado de una reducción considerable en el consumo de estos recursos. Para el caso de sistemas productivos que incluyen al sector agrícola, el compromiso del área del cultivo para producir un cultivo específico que compita con el sector alimentario o energético debe garantizar la sustentabilidad para ser fuentes energéticas de interés para quienes toman decisiones. La integración de los subsectores para el consumo energético se analiza mediante la relación del costo y el impacto ambiental que se genera por esa fuente energética. Por ejemplo, en la operación de los sistemas de producción donde se emplean energías renovables (eólica, solar, y/o mareomotriz) los costos de operación suelen ser mayor, mientras que la producción de emisiones se reduce considerablemente. ^[24-26] En general, debido a la generación de conocimiento que puede obtenerse de los procesos debido a un análisis riguroso como el presentado pueden proponerse estrategias de optimización adecuadas para cada tipo de actividad, logrando mejores resultados que si se aplicaran a procesos industriales individuales sin conocer si a lo largo de la cadena de suministros hay otros subsectores que requieran mayor cuidado ya sea en el aspecto ambiental, social o económico.

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, considerando para el diseño y operaciones el cumplir con el objetivo económico, lineamientos ambientales, así como el aspecto social desde el punto de vista de beneficio a la comunidad. Se establece a su vez un análisis riguroso para un estudio de sectores industriales desde el punto de vista de un nexo Agua-Energía-Alimentos que es una tipología común dentro de los principales sectores industriales que actualmente han tenido un gran desarrollo. Mediante estos estudios, se identifican las etapas dentro de la línea que producción con mayor relevancia, donde estrategias de optimización o remediación ambiental pueden ser aplicadas.

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 a la reducción de los costos anuales totales y la maximización de las ganancias, y simultáneamente incluir un análisis ambiental que permita identificar el mínimo impacto ambiental en los términos que correspondan.

Capítulo II. Marco teórico

La economía de una región indudablemente esta soportada por un desarrollo industrial que se adapte a la demanda tanto de productos y servicios de su población. Durante décadas, el sector industrial se ha enfrentado a una innovación necesaria para ajustarse a lineamientos de mercado más específicos, a condiciones sociales y ambientales más estrictas. Debido a esto, han surgido líneas de investigación dentro de la ingeniería química que se han interesado por abordar el estudio de la evolución de los procesos industriales y proponer mejoras mediante la generación de conocimiento en esta área que permitan el desarrollo de procesos eficientes y sustentables. Siendo la ingeniería química una rama de la ingeniería que se encarga del estudio, diseño, evaluación, optimización, simulación, construcción y operación de todo tipo de elementos en la industria de procesos, siendo aquella relacionada a la producción de compuestos y productos cuya elaboración requiere de sofisticadas transformaciones tanto físicas y químicas de la materia, enfocada además al diseño de nuevos materiales, procesos y tecnologías que contribuyan al diseño de procesos amigables con el medio ambiente. Estando fundamentada en ciencias básicas como matemáticas (álgebra, cálculo, métodos numéricos y matemática avanzada), ciencias básicas de ingeniería química (termodinámica, fenómenos de transporte, cinética química) y disciplinas como ingeniería de procesos, diseño de reactores, diseño de procesos químicos y de separación^[27-28].

En base a lo anterior es importante mencionar que interés actual es reducir el impacto ambiental del sector y disminuir al máximo la demanda de recursos naturales mediante la competitividad económica de los procesos en el mercado, obteniendo soluciones sustentables para el reto de combatir el cambio climático. En ese sentido, el desarrollo de nuevas metodologías, es necesario tener un mejor entendimiento de los sistemas complejos que se abordan. Recientemente, se ha perfilado el consumo de agua, energía y la producción de alimentos (actividad industrial) como un nexo donde las etapas en la cadena productiva conforma redes afectando a todos los sectores involucrados, conocido como WEF nexo (por sus siglas en inglés). Este perfil establece el análisis de la escases de los recursos naturales, pudiendo establecer las interconexiones para identificar la dependencia de los procesos entre la cadena productiva para obtener el producto final deseado. Como resultados de esta interdependencia, quienes toman decisiones se enfrentan a considerar las sinergias, tensiones y el compromiso entre la demanda de agua, energía y el impacto ambiental para escala multi-espacial y temporal^[29].

Es por ello que las políticas actuales impuestas por los gobiernos se han centrado en proponer sistemas energéticos amigables con el medio ambiente, involucrando alternativas energéticas no convencionales, como es el caso de gas natural, biocombustibles, energía eólica, solar, hidráulica. En sí, la estrecha relación entre la producción de biocombustibles demuestra perfectamente el concepto del nexo, ya que para la producción a gran escala es necesario una gran área de cultivo, viéndose comprometida la seguridad alimentaria y de las reservas de aguas en la región destinada para la instalación de un sistema de biorefinerías que son los aspectos que más afectan al nexo WEF. Es por ello que el apoyo de las políticas gubernamentales mediante subsidio a los biocombustibles para uso en el transporte, puede generar competencia por el suelo y el agua por la producción a gran escala, afectado directamente a la cuenca hidrológica donde se busque asentar el sistema de biorefinerías. En este sentido, el nexo WEF está fundamentado en tres lineamientos generales: elementos de seguridad alimentaria, elementos de seguridad de los recursos hídricos, y seguridad en la producción energética (Bizikova y col, 2013)^[30]. Mismos que se describen a continuación:

Seguridad alimentaria:

- Disponibilidad de alimento, afectada por la producción, distribución e intercambio de alimentos.
- Acceso a alimento, incluido el procesamiento, distribución, preferencia.
- Uso, valor nutrimental, valor social y cultural, protección alimentaria.
- Estabilidad/sustentabilidad.

Seguridad de los recursos hídricos:

Está basado en tres elementos: acceso al agua, calidad y disponibilidad. La capacidad de la población a salvaguardar el acceso a este recurso mediante la explotación de adecuadas cantidades manteniendo una apropiada calidad del agua para las diversas actividades que son demandadas (agricultura, uso urbano, uso industrial) asegurando la protección contra contaminación y desastres naturales, con la finalidad de preservar los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política.

Seguridad energética:

- Continuidad en satisfacer la demanda energética.
- Infraestructura que permita un abastecimiento adecuado.
- Abastecimiento adecuado de la demanda al precio que limite el mercado.

Aunque la integración de los recursos tiene una historia larga; el concepto del nexo Agua-Energía-Medio ambiente ha tenido un gran auge a finales de los 2000s, en respuesta a la necesidad de tener un conocimiento más amplio de los sistemas industriales e identificar esos procesos que requieran atención. El nexo Agua-Energía-Alimentos surge como un concepto útil para describir y establecer la dirección y complejidad de la naturaleza de los sistemas globales de recursos, los cuales dependen de los objetivos sociales, económicos y ambientales. En términos sencillos se formula una concepción más amplia para entender y analizar sistemáticamente las interacciones entre los recursos naturales y las actividades humanas, los cuales dependen sustancialmente del manejo adecuado de los recursos naturales a través de las etapas productivas de los sectores que intervienen y las escalas de producción. Esto ayuda a identificar y administrar el compromiso entre los objetivos que se demandan y construir sinergia, permitiendo mejor interacción en planeación costo-efectividad, toma de decisiones, implementación, monitoreo y evaluación.

En el nexo Agua- Biocombustibles-Medio ambiente se tiene que definir primeramente que es el concepto de biorefinería y los requerimientos necesarios para su actividad. Específicamente, una biorefinería es una planta industrial donde biomasa es empleada para la producción de biocombustibles y químicos de alto valor agregado analógicamente a lo que sería una refinería en la producción de combustibles fósiles. Mediante el estudio de este nexo, se puede apreciar claramente la dependencia al sector agrícola en la producción de biomasa (específicamente en la producción de biocombustibles de primera y segunda generación). Es de mencionar que, para abastecer la demanda requerida en una región, es necesario producción a gran escala a través de un tren de biorefinerías, que envuelve una toma de decisiones rigurosa para determinar el tipo de tecnologías de procesamiento, equipo, logística, operación y localización de las plantas industriales. Este sector es representativo al hablar de un nexo WEF por la estrecha interconexión con el sector industrial. En la producción a gran escala de biocombustibles, es necesaria cubrir grandes áreas enfocado en la producción de cultivos de altos rendimientos; sin embargo, aquellos cultivos están comprometidos con el sector alimentario generando una gran controversia. (Ej. Maíz, trigo, caña de azúcar, etc.) Por lo que una de las alternativas ha sido la producción de biocombustibles de segunda generación como el uso de residuos de cultivos. Particularmente, el impacto ambiental en este nexo se delimita por el gran consumo de agua y las emisiones de efecto invernadero que pueden causar las rutas de distribución de materias primas o productos desde los sitios de cultivo hasta las biorefinerías, y

la distribución de los mismos a los mercados, esto debido a que no hay una infraestructura de abastecimiento eficiente como la que existe para los combustibles de origen fósil. Estas dos limitantes han estancado el crecimiento de este sector energético debido a las políticas ambientales por la preservación del agua fresca y descarga de efluentes contaminantes, además de limitación en áreas de cultivo para uso energético.

Por otra parte, en los Estados Unidos el sector lácteo es una industria de gran crecimiento debido a la alta demanda de sus productos, el desarrollo y perfeccionamiento en técnicas de procesamiento ha permitido la reestructuración de las líneas de producción, línea de investigación de interés dentro del campo de la integración de procesos. El sector lácteo cumple dentro de los lineamientos necesarios para ser catalogado como un nexo WEF. Como es sabido en la producción láctea a gran escala se requiere de grandes granjas lecheras, las cuales demandan de cultivos (como alimento para el ganado) que son producidos en extensas áreas de cultivo, llegando en regiones a destinar el 50 por ciento del total de la producción agrícola, principalmente de pastura, mezcla de granos, y alimento procesado en base a los anteriores. Por lo que el sector energético en este nexo se establece por el aprovechamiento de los residuos orgánicos de las granjas (estiércol), donde se produce gran cantidad de gas metano que comúnmente es aprovechado como combustible para generación eléctrica. Sin embargo, el aspecto de más interés en este sector es la demanda y manejo de nutrientes; en el nexo Agua-Energía-Alimentos del que es parte el sector lácteo, donde dos nutrientes son fundamentales a lo largo de la cadena de suministro, estos son: el fósforo y el nitrógeno. Mismos que son requeridos desde el sector agrícola como fertilizantes, en las granjas como aditivos para la mayor producción de leche, y se presentan en gran cantidad en los desechos de cada etapa de operación. Así también, el estiércol es un residuo orgánico complejo que contiene gran cantidad de nitrógeno y fósforo que anteriormente no tenía un tratamiento preventivo de disposición adecuado y se vertía indiscriminadamente en suelo o como descarga de efluentes a los cuerpos de agua, siendo el principal precursor del gran problema de eutrofización que se ha presentado actualmente. Debido a esto el seguimiento de nutrientes en este sector es indispensable si se quiere proponer un análisis robusto para estimar el impacto ambiental global del nexo considerando las interconexiones de los sectores que forman parte (sector minero, agrícola, urbano, lácteo, manejo de residuos y sector urbano).

Como es de notarse la estrecha interdependencia entre los sectores los hace vulnerables a las externalidades (por ejemplo, fluctuaciones en rendimientos, pérdidas, condiciones del mercado, normativas ambientales y gubernamentales, clima, etc.), ver Figura 2.1. Y a fin de reducir tales efectos adversos se han implementado estrategias de reuso de desechos que han brindado grandes resultados, se ha podido establecer un rango de recuperación de nutrientes cerca de 30% por el tratamiento de estiércol y reuso como fertilizante orgánico. Específicamente, el fósforo (P) es un nutriente esencial que es indispensable a lo largo de toda la cadena de suministro, de materias primas y productos, siendo relevante para la eficiencia de las etapas productivas. El fósforo que se alimenta al ganado es metabolizado y excretado en el excremento y leche, de igual manera los productos lácteos consumidos por la población urbana son metabolizada y excretada en la orina y desechos orgánicos vertidos al medio ambiente o siendo sometidos a un tratamiento previo para una disposición adecuada. La mayoría de los biosólidos producidos de estos procesos son tratados en sistemas de manejo y disposición de residuos pudiendo ser recuperados para ser aprovechados en etapas consecuentes.

La contaminación de agua asociada a las descargas de efluentes por el sector urbano y lácteo tiene un impacto ambiental que genera deterioro ambiental y problemas de salud en las comunidades cercanas (baja calidad de agua para consumo humano, bajas en el turismo, pérdidas de valor en propiedades cercanas a los cuerpos de agua debido al sobre crecimiento de algas por el alto contenido de fósforo en el agua afectando directamente al ecosistema), problemas ambientales como la eutroficación se presenta en tal grado que el crecimiento de algas proliferan en gran cantidad produciendo la muerte de la flora y fauna endémica de los ríos y lagos, así como limita las actividades recreativas y productivas necesarias para las comunidades. Es indiscutible que, en este nexo, los nutrientes como fósforo tienen mayor acción en el sector agrícola y que las mayores pérdidas se localizan en esta etapa de la cadena de producción debido a las bajas eficiencias por las condiciones del suelo y climatológicas, por lo que una metodología para la selección, manejo y dosificación de nutrientes es esencial para determinar cuáles son las pérdidas totales y establecer estrategias de remediación, tratamiento y reciclaje de los nutrientes en el nexo para aumentar el aprovechamiento de los nutrientes para poder incrementar la eficiencia. Es importante aclarar que, para el nexo WEF el impacto ambiental y el costo que tienen los procesos de recuperación de nutrientes necesarios tienen un punto de inflexión que dependerá de los tomadores de decisiones involucrados.



Figura 2.1. Representación del nexo Agua-Energía-Lácteos.

Capítulo III. Metodología

En la Figura 3.1 se presenta la metodología que se establece para el desarrollo de este proyecto de investigación. En general, las etapas que se muestran son los pasos a seguir desde la conceptualización del proyecto. Donde la revisión bibliográfica es el paso que fundamenta y justifica la propuesta, ya que permite conocer el avance en el área de investigación que corresponde al proyecto propuesto y permite establecer las herramientas necesarias. En tanto, el proponer la superestructura adecuada es de vital importancia en optimización de procesos. Esta última es un súper diagrama de flujo, que ilustra todas las posibilidades existentes en torno a las rutas posibles de distribución de los recursos y obtener como resultado la más eficiente de acuerdo con los criterios económicos, ambientales y sociales establecidos por quienes toman decisiones. Tal superestructura se representa mediante expresiones matemáticas que involucran balances de materia y/o energía, así como restricciones lógicas (operacionales, diseño, seguridad, ambientales y/o económicas).

Para demostrar la efectividad del modelo de optimización se estableció un caso de estudio, cuyos datos provienen de bases de datos e informes oficiales o de investigaciones recientes sobre este campo nacional o extranjero pero que tenga validez para el sistema que estamos proponiendo.

Posteriormente, se elige una plataforma de programación para codificar y resolver el modelo de optimización asociado para el sistema que resulta de la propuesta, cuya solución tiene que ser determinado con el algoritmo adecuado cargado en la misma plataforma de acuerdo con el comportamiento que presenta el problema de optimización que se generó.

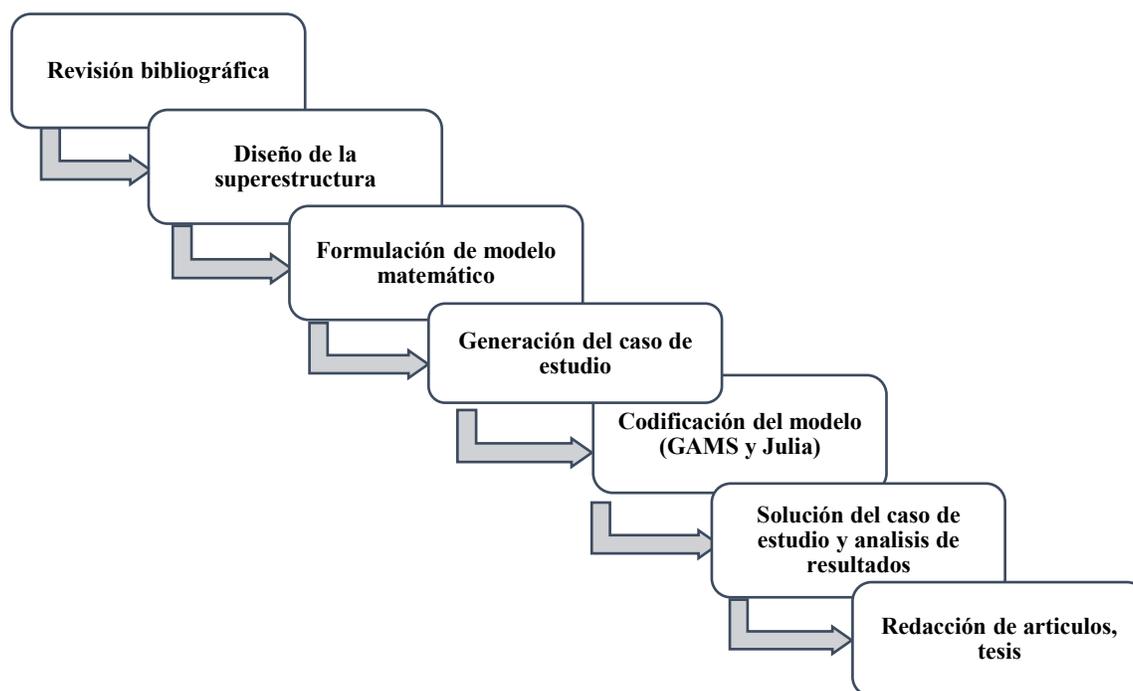


Figura 3.1 Metodología propuesta para el proyecto de investigación.

A continuación, se presentan dos trabajos realizados durante los estudios de Doctorado que ejemplifican la aplicación de la metodología y permiten el desarrollo de herramientas para entender la operación de sistemas industriales mediante el concepto de un nexo Energético-Alimentos-Medio ambiente generando conocimiento para el desarrollo en rediseño y ajustes a los procesos en la planificación, construcción y operación de actividad industrial de interés. En primera estancia, se atiende la problemática de la demanda de biocombustibles y la necesidad de producción a gran escala en una región con necesidad de evaluar el impacto ambiental económico y social por el asentamiento de esta industria, así como por la competencia de recursos con otras etapas productivas que interviene en la cadena productiva (agrícola, residencial y/o industrial). En sistemas productivos con gran cantidad de sectores involucrados, un diseño robusto debe considerar el comportamiento de cada una de las etapas respecto a un elemento en particular que tengan en común; de esta manera se propone el seguimiento de un nutriente en la producción de

lácteos para determinar las interconexiones y las interacciones del nutriente, con la finalidad de proponer un diseño en base a las etapas que delimiten los rendimientos globales del sistema.

3.1 Modelo de optimización para la localización de biorefinerías considerando incertidumbre en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente

Los biocombustibles han emergido como una alternativa renovable atractiva para satisfacer la demanda actual de energéticos. La producción de biocombustibles a gran escala requiere la instalación de un sistema de biorefinerías, el cual envuelve un conjunto de decisiones para la logística y operación para definir la localización de las plantas, la producción, los requerimientos de biomasa, agua y energía, así como del análisis del impacto económico, social y ambiental de la región por el asentamiento de esta industria. En este sentido, se propone la instalación de un modelo de optimización para el diseño de un sistema de biorefinerías que considere la interacción con el medio ambiente como se presenta en la superestructura de la Figura 3.2.

La problemática está dirigida de acuerdo con las siguientes especificaciones:

- Se considera una región donde es necesario satisfacer una demanda de biocombustibles distribuidos y procesados mediante una cadena de suministro.
- En base a un estudio geográfico, técnico y económico se establecen los cultivos potenciales para ser utilizados como materia prima, el área disponible, las tecnologías de procesamiento, la posible localización de las plantas, y productos.
- La instalación del sistema de biorefinerías se considera a lo largo de una cuenca hidrológica, que abastecerá de agua fresca tanto la actividad agrícola asociada a la producción de biomasa como a los procesos industriales.
- Se propone un análisis ambiental que establece el impacto de la extracción de agua fresca y descarga de efluentes de las actividades productivas que conforman el nexo.
- Los costos de operación, capital de los equipos de procesamiento, costo de biomasa, ganancias de los biocombustibles, costo de agua fresca, costos de transporte y ganancias por la venta de cultivos son estimados en base a fuentes actuales en el mercado considerando la incertidumbre mediante un modelo estocástico.

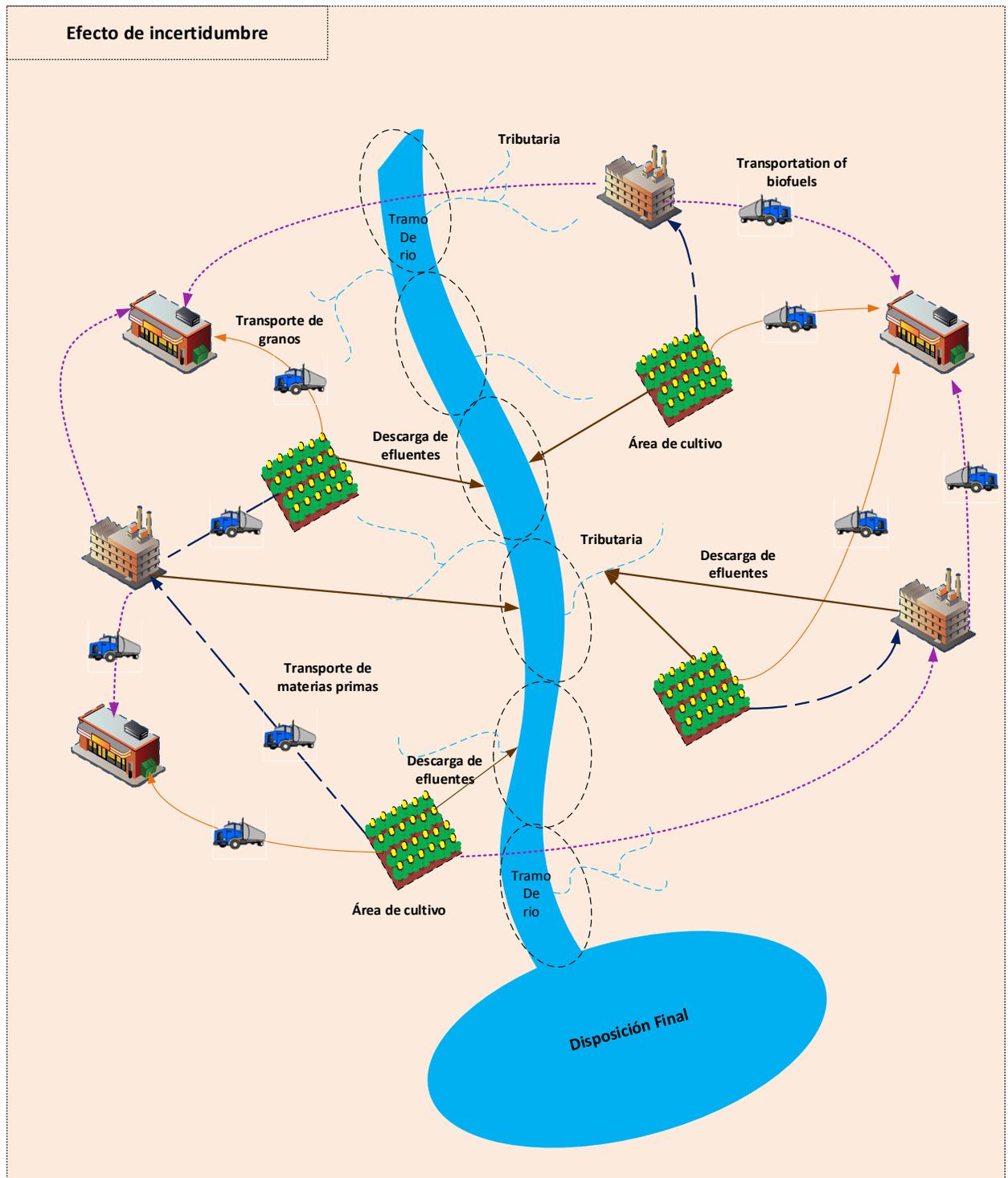


Figura 3.2. Superestructura propuesta para la producción de biocombustibles considerando incertidumbre.

En el diseño de biorefinerías considerando el nexo productivo se incluyen gran cantidad de parámetros que, debido a condiciones climáticas, de mercado y diseño, están sometidas a gran fluctuación. En el modelo propuesto, aquellos parámetros cuya variación es significativa en la metodología aplicada se presentan a continuación:

- Precipitación en la cuenca hidrológica en los tramos y tributarias ($P_{r,s}$ y $P_{r,t,s}$).
- Pérdidas de agua a través de evaporación y filtración en los tramos de río y tributarias (L_{ars} , y $L_{r,t,s}$).
- Descargas directas por la actividad industrial, residencial y agrícola en las tributarias ($D_{r,s}$, $H_{r,s}$ y $D_{r,t,s}$).
- Extracción de agua fresca para uso industrial, residencial y agrícola en los tramos de río ($U_{r,s}$ y $U_{r,t,s}$).
- Los siguientes factores de conversión: agua descargada por unidad de área cultivada, producción de biocombustibles por biomasa procesada, descarga de efluentes por biocombustibles producidos, biomasa cultivada por área, granos cultivados por área, consumo de agua para el procesamiento de biocombustibles, demanda de agua por unidad de área cultivada, consumo de agua por unidad de biomasa producida, descarga y uso de agua directa por otras actividades en la cuenca hidrológica (siendo $\alpha_{r,t,s}^{Agriculture}$, $\alpha_{k,m,s}^{Bioref}$, $\alpha_{k,m,s}^{ww-biorefinery}$, $\alpha_{m,r,s}^{feedstock}$, $\alpha_{m,r,s}^{grains}$, $\alpha_{k,m,s}^{used-biorefinery}$, $\beta_{r,t,s}^{agriculture}$, $\beta_{m,r,s}^{feedstocks}$ y $\gamma_{m,r,s}^{discharge}$, respectivamente).
- Precios unitarios de los biocombustibles y granos, así como los costos de cosecha de la biomasa ($UC_{k,s}^{product}$, $UC_{g,s}^{Grains}$ y $UC_{m,r,s}^{Feedstocks}$).
- La producción máxima de producción de biomasa m que es producida en el campo r' es delimitada, así como las demandas de productos y grano en los mercados ($F_{m,r'}^{max}$, $P_{k,j,s}^{Prod-market-max}$ y $f_{m,r,s}^{Grain-market-max}$).

El modelo de optimización propuesto se conforma de ecuaciones relacionadas a balances de masa para la cadena de suministro del sistema de biorefinerías, ganancias y costos, así como, funciones objetivos. Mismas que se describen a continuación:

3.1.1 Balance de masa para la cadena de suministro del sistema de biorefinerías

3.1.1.1 Balance de materia en la cuenca hidrológica

En este modelo se considera la interacción con la cuenca hidrológica, donde se incluye todos los procesos que afecten a la calidad del agua. Esto porque con la instalación de un tren de biorefinerías se generan nuevas extracciones y descargas de efluentes de las ya existentes con los procesos de actividades humanas actuales. En función a lo antes mencionado, se aplica la técnica del Análisis del rastreo de materiales (MFA). En ese sentido, las siguientes expresiones son formuladas para establecer la interacción entre la actividad industrial, residencial y agrícola con la cuenca hidrológica.

Condición inicial en la cuenca hidrológica antes de la instalación del sistema de biorefinerías

La condición inicial se refiere al estado del nexo antes de la instalación de las biorefinerías. En este caso, $Q_{r,s}^{Initial-Out}$ es el flujo que deja el tramo r en cada escenario s , el cual es igual a la suma del flujo que entra al tramo r (Q_r^{In}), más las precipitaciones ($P_{r,s}$), descargas industriales directas ($D_{r,s}$), descargas de origen residencial ($H_{r,s}$), suma de los efluentes en los tributarias ($FT_{r,t,s}$) que entran a cada tramo y la suma de las descargas que provienen de los campos de cultivos para la producción de biomasa ($w_{m,r,s}^{Discharge-feedstocks_Initial}$) menos la suma del consumo de agua en las áreas de cultivos ($w_{m,r,s}^{Used-feedstocks_Initial}$), pérdidas por evaporación y filtración ($L_{r,s}$), entre otros usos (industrial, residencial y agrícola) ($U_{r,s}$):

$$Q_{r,s}^{Initial-Out} = Q_r^{In} + P_{r,s} + D_{r,s} + H_{r,s} + \sum_{t=1}^{N(r)} FT_{r,t,s} + \sum_m w_{m,r,s}^{Discharge-feedstocks_Initial} - \sum_m w_{m,r,s}^{Used-feedstocks_Initial} - L_{r,s} - U_{r,s}, \quad \forall r, \forall s \quad (3.1.1)$$

Donde, $FT_{r,t,s}$ indica el flujo proveniente del tributaria t que se descarga a cada tramo de río correspondiente r , nótese que un tributaria es aquella pequeña ramificación que alimenta a la cuenca del río principal.

El flujo de agua requerido para producir la biomasa en las condiciones iniciales ($w_{m,r,s}^{Used-feedstocks_Initial}$) se describe como el producto del factor de conversión de demanda de agua

para producir una unidad másica de biomasa m por hectárea ($\beta_{m,r,s}^{feedstocks}$) por el factor que establece la producción de biomasa por hectárea ($\alpha_{m,r}^{feedstock}$) y el área existente para cada cultivo ($a_{m,r}^{exist}$):

$$W_{m,r,s}^{Used-feedstocks_Initial} = \beta_{m,r,s}^{feedstocks} \alpha_{m,r}^{feedstock} \left[a_{m,r}^{exist} \right], \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.2)$$

Anterior a la introducción del sector de biocombustibles a la región, en la cuenca hidrológica ciertas actividades productivas son llevadas a cabo, algunas de las mismas pueden abastecer de materias primas como es el caso del sector agrícola y líneas de distribución. Actualmente, la actividad agrícola demanda grandes volúmenes de agua para un rendimiento en los cultivos adecuado, donde cierta proporción de agua no es aprovechada por el suelo y mediante filtración es descargada como efluente al medio ambiente ($W_{m,r,s}^{Discharge-feedstock_Initial}$) estimado mediante el producto del factor de aprovechamiento de agua en el cultivo ($\gamma_{m,r,s}^{discharge}$) y demanda de agua en el área de cultivo ($W_{m,r,s}^{Used-feedstock_Initial}$):

$$W_{m,r,s}^{Discharge-feedstock_Initial} = \gamma_{m,r,s}^{discharge} W_{m,r,s}^{Used-feedstock_Initial}, \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.3)$$

Nótese que el factor de aprovechamiento del consumo de agua debe ser menor o mayor a 1.

Condición final en la cuenca hidrológica antes de la instalación del sistema de biorefinerías

El flujo que deja el tramo de río r en la condición final para el escenario s ($Q_{r,s}^{Out}$) es igual al flujo que entra a la cuenca hidrológica (Q_r^{In}), más precipitación ($P_{r,s}$), descarga industrial ($D_{r,s}$), descargas de origen residencial ($H_{r,s}$), la suma de los flujos provenientes de los tributarias ($FT_{r,t,s}$), los efluentes producidos por la actividad agrícola ($W_{k,r,s}^{Discharge-biorefinery}$), menos el consumo de agua para la producción de los cultivos ($W_{k,r,s}^{Discharge-biorefinery}$), el consumo de agua por las biorefinerías ($W_{k,r,s}^{Used-biorefinery}$), pérdidas naturales por evaporación y filtración ($L_{r,s}$), y el uso por otras actividades humanas ($U_{r,s}$):

$$Q_{r,s}^{Out} = Q_r^{In} + P_{r,s} + D_{r,s} + H_{r,s} + \sum_{t=1}^{N(r)} FT_{r,t,s} + \sum_m W_{m,r,s}^{Discharge-feedstocks} + \sum_k W_{k,r',s}^{Discharge-biorefinery} - \sum_m W_{m,r,s}^{Used-feedstocks} - \sum_k W_{k,r',s}^{Used-biorefinery} - L_{r,s} - U_{r,s}, \quad \forall r, \forall s \quad (3.1.4)$$

Balance de materia en cada tributaria

De acuerdo con la metodología del MFA, la cuenca hidrológica es dividida en tramos considerando la instalación del tren de biorefinerías a lo largo de un río. Sin embargo, pequeñas ramificaciones llamadas tributarias desembocan su efluente en la cuenca principal. Por lo que, el flujo de los tributarias t que se descarga a los tramos de la cuenca hidrológica en el escenario s ($FT_{r,t,s}$) es calculado mediante la suma de los efluentes que no reciben ningún tratamiento previamente descargados ($S_{r,t}^{Untreated}$), efluentes que reciben un tratamiento previo ($S_{r,t}^{Treated}$), descargas industriales ($I_{r,t,s}$), precipitación ($P_{r,t,s}$), descargas directas por otras actividades productivas ($D_{r,t,s}$), menos las perdidas debido a evaporación y filtración ($L_{r,t,s}$) y consumo de agua por otros procesos productivos ajenos al sistema de biorefinerías ($U_{r,t,s}$):

$$FT_{r,t,s} = S_{r,t}^{Untreated} + S_{r,t}^{Treated} + I_{r,t,s} + P_{r,t,s} + D_{r,t,s} - L_{r,t,s} - U_{r,t,s}, \quad \forall r, \forall t, \forall s \quad (3.1.5)$$

Usos y descargas agrícolas.

Los usos y descargas para las actividades agrícolas son formulados de la siguiente manera:

$$D_{r,t,s} = \alpha_{r,t,s}^{agriculture} A_{r,t}^{Agriculture}, \quad \forall r, \forall t, \forall s \quad (3.1.6)$$

$$U_{r,t,s} = \beta_{r,t,s}^{agriculture} A_{r,t}^{Agriculture}, \quad \forall r, \forall t, \forall s \quad (3.1.7)$$

Donde, $\alpha_{r,t,s}^{agriculture}$ representa los efluentes provenientes de los campos agrícolas, $\beta_{r,t,s}^{agriculture}$ es el requerimiento de agua fresca, y $A_{r,t}^{Agriculture}$ es el área empleada para cada tipo de cultivo usado como biomasa.

Descargas de efluentes de los campos de cultivo

Como fue formulado para el caso de la condición inicial en la cuenca hidrológica, en el modelo se supone que una proporción del agua fresca que el nexo Energía-Alimento-Medio ambiente para la producción de los cultivos que son destinados como biomasa m en los tramos de río adyacentes r para el escenario s no es aprovechada siendo filtrada como un efluente por el suelo al medio ambiente ($W_{m,r,s}^{Discharge-feedstock}$), determinado por términos del uso de agua asociado (

$W_{m,r,s}^{Used-feedstock}$) y el factor de conversión ($\gamma_{m,r,s}^{discharge}$):

$$W_{m,r,s}^{Discharge-feedstock} = \gamma_{m,r,s}^{discharge} W_{m,r,s}^{Used-feedstock}, \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.8)$$

Se debe tener en cuenta que el factor de conversión $\gamma_{m,r,s}^{discharge}$ depende de la ubicación del campo y tipo de cultivo, el cual es obtenido experimentalmente.

Uso de agua para el cultivo de biomasa

El consumo de agua para el cultivo de biomasa m en el campo asociado al tramo de río r ($W_{m,r,s}^{Used-feedstocks}$) depende del factor de conversión para los requerimientos de agua por unidad de cultivo producido ($\beta_{m,r,s}^{feedstocks}$), multiplicado por la producción de biomasa ($f_{m,r,s}^{Prod-feedstocks}$):

$$W_{m,r,s}^{Used-feedstocks} = \beta_{m,r,s}^{feedstocks} f_{m,r,s}^{Prod-feedstocks}, \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.9)$$

El factor de conversión $\beta_{m,r,s}^{feedstocks}$ es estimado basado en datos experimentales y depende de la localización (por las condiciones de suelo y climatológicas).

Descarga de efluentes por las biorefinerías

La instalación de biorefinerías genera la producción de corrientes de desecho ($W_{k,r',s}^{Discharge-biorefinery}$), que es descargado a la cuenca y calculada a través del factor de conversión ($\alpha_{k,m,s}^{ww-biorefinery}$) y el rendimiento en la producción de biocombustibles ($P_{k,m,r',s}^{Bio}$):

$$W_{k,r',s}^{Discharge-biorefinery} = \sum_m \alpha_{k,m,s}^{ww-biorefinery} P_{k,m,r',s}^{Bio}, \quad \forall k, \forall r', \forall s \quad (3.1.10)$$

Donde el factor de conversión para los efluentes ($\alpha_{k,m,s}^{ww-biorefinery}$) depende del tipo de producto y el uso de biomasa.

Consumo de agua en las biorefinerías

Similarmente con las descargas, las biorefinerías demandan gran cantidad de agua fresca para la operación de los procesos necesarios para la producción de biocombustibles ($W_{k,r',s}^{Used-biorefinery}$). El uso de agua en las biorefinerías es determinado mediante el producto del factor de conversión ($\alpha_{k,m,s}^{used-biorefinery}$) y la producción de biocombustibles ($P_{k,m,r',s}^{Bio}$):

$$W_{k,r',s}^{Used-biorefinery} = \sum_m \alpha_{k,m,s}^{used-biorefinery} P_{k,m,r',s}^{Bio}, \quad \forall k, \forall r', \forall s \quad (3.1.11)$$

Donde, el factor de conversión depende del tipo de biocombustible y biomasa.

Uso del suelo para el cultivo de biomasa

El área máxima disponible para cultivar biomasa m en la localización r ($a_{m,r}^{\max}$) debe ser mayor a que el área que actualmente es destinada a la actividad agrícola ($a_{m,r}^{exist}$), más área disponible que puede ser destinada para este propósito ($a_{m,r}^{new}$):

$$a_{m,r}^{exist} + a_{m,r}^{new} \leq a_{m,r}^{\max}, \quad \forall m, \forall r \quad (3.1.12)$$

3.1.1.2 Modelación de la cadena de suministro en la producción de biocombustibles

Las siguientes ecuaciones representan el diseño de la cadena de suministro para la instalación de un sistema de biorefinerías necesarias para satisfacer la demanda del mercado considerando la producción de biomasa, distribución de las materias primas y productos, ruta de procesamiento y condiciones ambientales. El modelo es formulado como sigue:

Producción en los campos de cultivo

La biomasa producida m en el campo ubicado en el tramo de río r ($f_{m,r,s}^{Prod-feedstock}$) en cada escenario s corresponde al producto de un factor de conversión para la producción de cada tipo

de cultivo por unidad de área ($\alpha_{m,r,s}^{feedstock}$) por el área cultivada (existente y nueva a ser destinada para satisfacer la gran demanda de biomasa):

$$f_{m,r,s}^{Prod-feedstock} = \alpha_{m,r,s}^{feedstock} \left[a_{m,r}^{exist} + a_{m,r}^{new} \right], \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.13)$$

En esta ecuación, el factor de conversión depende directamente del tipo de biomasa, del suelo y de otros factores agrícolas. Muchas de las condiciones afectan a este factor. Por esa razón, el modelo debe de considerar incertidumbre. Aunque este factor puede ser determinado considerando datos históricos. Para este proyecto en particular donde se considera la producción de biocombustibles de segunda generación debido a la gran controversia que existe con la competencia con el sector alimentario. Por ejemplo, en el cultivo de maíz el producto principal es el grano y la paja es empleado como biomasa para la producción de biocombustibles. Donde el producto principal g para el campo en r asociado a la biomasa m ($f_{m,r,s}^{Prod-grains}$) es determinado multiplicando el factor de producción de granos ($\alpha_{m,r,s}^{grains}$) por el área cultivada existente y potencialmente disponible para ser destinada para el cultivo de biomasa ($a_{m,r}^{new}$).

$$f_{m,r,s}^{Prod-grains} = \alpha_{m,r,s}^{grains} \left[a_{m,r}^{exist} + a_{m,r}^{new} \right], \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.14)$$

Distribución de biomasa a las biorefinerías

La biomasa m en el campo en r ($f_{m,r,s}^{Prod-feedstocks}$) es distribuida a las biorefinerías localizadas en la posición r' ($f_{m,r,r',s}$):

$$f_{m,r,s}^{Prod-feedstocks} = \sum_{r'} f_{m,r,r',s}, \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.15)$$

Balance de masa en la producción de biomasa

El flujo de biomasa m producida en el área de cultivo adyacente al tramo de río r ($F_{m,r,s}$) puede ser segregado para su distribución para ser enviado a las biorefinerías ubicadas en la localización correspondiente en r' ($f_{m,r,r',s}$):

$$F_{m,r',s} = \sum_r f_{m,r,r',s}, \quad \forall m, \forall r', \forall s \quad (3.1.16)$$

Se debe tener en cuenta que r y r' representan las secciones en las que es dividida la cuenca hidrológica para el análisis del balance de agua, considerándolo para dos funciones específicas: la instalación de biorefinerías y la localización de los campos de cultivo.

Activación de las variables binarias para las biorefinerías

Para determinar la existencia de una biorefinería se utiliza la variable $y_{r',s}^{Biorefinery}$ empleada para cada planta en el escenario s . Donde la variable binaria representa la existencia de una biorefinería cumpliendo con los requerimientos de materias primas y servicios para que su operación satisfaga la demanda de biocombustibles requerido produciendo el menor impacto ambiental por sobreexplotación de agua fresca en la cuenca hidrológica. Cuando la variable es igual a uno la biorefinería es instalada, cuando es cero no es necesaria.

$$F_{m,r',s} \leq F_{m,r'}^{\max} y_{r',s}^{Biorefinery}, \quad \forall r', \forall s \quad (3.1.17)$$

En esta ecuación, el parámetro $F_{m,r'}^{\max}$ es usado como límite superior para la capacidad de procesamiento de biomasa para las biorefinerías.

Producción de biocombustibles

La producción de biocombustibles k en las plantas localizadas en r' ($P_{k,r',s}$) depende en gran medida del tipo de biomasa m ($F_{m,r',s}$) y las tecnologías de procesamiento asociadas al factor de rendimiento ($\alpha_{k,m,s}^{bioref}$):

$$P_{k,m,r',s}^{Bio} = \alpha_{k,m,s}^{Bioref} F_{m,r',s}, \quad \forall k, \forall m, \forall r', \forall s \quad (3.1.18)$$

La producción total de cada tipo de biocombustibles k en el sitio r' en el escenario s es igual a la suma de biocombustibles producidos por cada tipo de biomasa m :

$$P_{k,r',s} = \sum_m P_{k,m,r',s}^{Bio}, \quad \forall k, \forall r', \forall s \quad (3.1.19)$$

El tramo de río r representa el área circundante puede ser la posición posible para la instalación de una biorefinería r' .

Distribución de productos

La producción total en la posición r' ($P_{k,r',s}$) es enviada a todos los mercados j ($P_{k,r',j,s}^{Prod-market}$) para satisfacer la demanda:

$$P_{k,r',s} = \sum_j P_{k,r',j,s}^{Prod-market}, \quad \forall k, \forall r', \forall s \quad (3.1.20)$$

Productos en los mercados

El producto k en el mercado j para el escenario s proviene de la operación de las plantas instaladas en r' ($P_{k,r',j,s}^{Prod-market}$), la cual debe ser menor a la demanda máxima ($P_{k,j,s}^{prod-market-Max}$):

$$\sum_{r'} P_{k,r',j,s}^{Prod-market} \leq P_{k,j,s}^{Prod-market-Max}, \quad \forall k, \forall j, \forall s, \forall r' \quad (3.1.21)$$

Distribución de granos en los mercados

Los cultivos son usados como fuente de biomasa. Sin embargo, al ser biocombustibles de segunda generación de interés a producir en este sistema (material lignocelulósico), el producto agrícola principal ya sean granos o frutos pueden ser vendidos a los mercados para generar ganancias. En este sentido, estos productos agrícolas ($f_{m,r,j,s}^{Grain-market}$) son enviados a los mercados j desde los sitios de cultivo r :

$$f_{m,r,s}^{Prod-grains} = \sum_j f_{m,r,j,s}^{Grain-market}, \quad \forall m, \forall r, \forall s \quad (3.1.22)$$

Máxima demanda de granos

La producción de granos destinados a cada mercado ($\sum_r f_{m,r,j,s}^{Grain-market}$) debe ser menor a una demanda máxima para cada sitio ($f_{m,j,s}^{Grain-market-Max}$):

$$\sum_r f_{m,r,j,s}^{Grain-market} \leq f_{m,j,s}^{Grain-market-Max}, \quad \forall m, \forall j, \forall s \quad (3.1.23)$$

3.1.2 Ganancias y costos

Los costos y ganancias para este proyecto están relacionadas a la venta de productos (biocombustibles y granos), así como los costos de operación para las biorefinerías y la actividad agrícola asociada en el nexo (costos de agua fresca y distribución):

Ganancias obtenidas por la venta de biocombustibles

Las ganancias asociadas a la venta de biocombustibles ($G_s^{Products}$) depende del precio unitario para estos productos ($UC_{k,s}^{Product}$) por la producción de biocombustibles k que son vendidos al mercado en la localización r' ($P_{k,r',s}$):

$$G_s^{Products} = \sum_k \sum_{r'} UC_{k,s}^{Product} P_{k,r',s} \quad (3.1.24)$$

Ganancias por la venta de granos

Las ganancias por la venta de granos (G_s^{grains}) es determinado por la multiplicación entre el costo unitario de los granos g ($UC_{m,s}^{Grains}$) y la producción de granos en los sitios de cultivo r ($f_{m,r,s}^{Prod-grains}$):

$$G_s^{grains} = \sum_m \sum_r UC_{m,s}^{Grains} f_{m,r,s}^{Prod-grains}, \quad \forall s \quad (3.1.25)$$

Costos de capital para las biorefinerías

El costo de capital para las biorefinerías ($CapCost_s^{Biorefineries}$) está asociado al costo fijo y variable de la siguiente manera:

$$CapCost_s^{Biorefineries} = k_F \left[\sum_m \sum_{r'} FC_{m,r'}^{Biorefinery} y_{r',s}^{Biorefinery} + \sum_m \sum_{r'} VC_{m,r'}^{Biorefinery} (F_{m,r',s})^{\sigma_{m,r'}^{Biorefinery}} \right], \quad \forall s \quad (3.1.26)$$

Donde la variable binaria $y_{r',s}^{Biorefinery}$ representa la existencia de las biorefinerías siendo igual a 0 y 1, $\sigma_{m,r'}^{Biorefinery}$ es un exponente considerado por la economía de escala en el diseño,

mientras que $FC_{m,r'}^{Biorefinery}$ y $VC_{m,r'}^{Biorefinery}$ son los costos fijo y variables respectivamente, y k_F es un factor de anualización para el costo de capital.

Costo de operación de las biorefinerías

El costo de operación total para el sistema de biorefinerías ($OpCost_s^{Biorefineries}$) es determinado como la suma de la multiplicación del costo unitario para el procesamiento de la biomasa ($UC_{m,r'}^{Biorefinery}$) y la cantidad de biomasa alimentada a cada biorefinería instalada en el sitio r' ($F_{m,r',s}$).

$$OpCost_s^{Biorefineries} = \sum_m \sum_{r'} UC_{m,r'}^{Biorefinery} F_{m,r',s}, \quad \forall s \quad (3.1.27)$$

Costo de la biomasa

El costo de la biomasa ($OpCost_s^{Feedstocks}$) es determinado por el costo unitario para la producción de los cultivos m en cada sitio r ($UC_{m,r,s}^{Feedstocks}$) por el flujo de biomasa producida ($f_{m,r,s}^{Prod-feedstocks}$):

$$OpCost_s^{Feedstocks} = \sum_m \sum_r UC_{m,r,s}^{Feedstocks} f_{m,r,s}^{Prod-feedstocks}, \quad \forall s \quad (3.1.28)$$

Costo de agua fresca en las biorefinerías

El costo asociado al consumo de agua fresca en las biorefinerías ($OpCost_s^{Water-biorefineries}$) depende del costo unitario ($UC_{r'}^{Water-used-biorefineries}$) y el flujo de agua fresca requerido por el sistema de biorefinerías a instalar en la localización r ($w_{k,r,s}^{Used-biorefineries}$):

$$OpCost_s^{Water-biorefineries} = \sum_k \sum_{r'} UC_{r'}^{Water-used-biorefineries} w_{k,r',s}^{Used-biorefineries}, \quad \forall s \quad (3.1.29)$$

El costo unitario asociado al agua fresca en el tren de biorefinación es denominado de uso industrial y esta sujeto a una precio en función a la calidad necesaria para ser empleado en los procesos de transformación.

Donde, el costo unitario $UC_r^{Water-used-biorefineries}$ depende de las dependencias gubernamentales que dan un precio por los servicios de agua, principalmente debido a la disponibilidad de agua.

Costo de agua fresca para la producción de biomasa

El costo de agua fresca para la producción de biomasa ($OpCost_s^{Water-feedstocks}$) depende del costo unitario para la localización r ($UC_r^{Water-feedstocks}$) y el flujo de la demanda de agua fresca para esta actividad ($W_{m,r,s}^{Used-feedstocks}$):

$$OpCost_s^{Water-feedstocks} = \sum_m \sum_r UC_r^{Water-feedstocks} W_{m,r,s}^{Used-feedstocks}, \quad \forall s \quad (3.1.30)$$

Costo de transportación de biomasa

El costo de transportación para la distribución de la biomasa ($TCost_s^{Feedstocks}$) depende de los costos unitarios de trasportación entre los campos de cultivo en r a las biorefinerías ($UTC_{m,r',r}^{Feedstocks}$), y la producción total de biomasa ($f_{m,r,r',s}$):

$$TCost_s^{Feedstocks} = \sum_m \sum_r \sum_{r'} UTC_{m,r,r'}^{Feedstocks} f_{m,r,r',s}, \quad \forall s \quad (3.1.31)$$

Costo de transportación de granos

El costo de transportación para la producción de granos ($TCost_s^{Grains}$) depende del costo de transportación unitario entre los sitios r y los mercados j para cada tipo de cultivo m ($UTC_{m,r,j}^{Grains}$) y la cantidad de grano producido ($f_{m,r,j,s}^{Grain-market}$):

$$TCost_s^{grains} = \sum_m \sum_r \sum_j UTC_{m,r,j}^{grains} f_{m,r,j,s}^{grain-market}, \quad \forall s \quad (3.1.32)$$

El costo unitario del transporte de la biomasa y de los granos se debe a transportación por camiones, por lo que las rutas de distribución de deben minimizar para reducir los costos.

Costo de transportación de biocombustibles

El costo de transportación para los biocombustibles ($TCost_s^{Products}$) depende del costo unitario de transportación de los productos k para la localización r' donde se instalan las plantas industriales y los mercados j ($UTC_{k,r',j}^{Products}$) y la producción de biocombustibles ($P_{k,r',j,s}^{Prod-market}$):

$$TCost_s^{products} = \sum_k \sum_{r'} \sum_j UTC_{k,r',j}^{products} P_{k,r',j,s}^{prod-market}, \quad \forall s \quad (3.1.33)$$

3.1.3 Funciones objetivo

Costo anual total

El costo anual total para el sistema propuesto ($Profit_s$) considera las ganancias por la venta de biocombustibles ($G_s^{Products}$) y los granos (G_s^{Grains}), menos los costos de capital ($CapCost_s^{Biorefineries}$) y de operación para el sistema de biorefinerías ($OpCost_s^{Biorefineries}$), costo de la biomasa ($OpCost_s^{Feedstocks}$), costo de agua fresca para la operación de las biorefinerías ($OpCost_s^{Water-biorefineries}$) y el cultivo de biomasa ($OpCost_s^{Water-feedstocks}$), costos de transporte de la biomasa a los sitios de localización de las biorefinerías ($TCost_s^{Feedstocks}$) y granos ($TCost_s^{Grains}$), y finalmente para el transporte de los biocombustibles a los mercados ($TCost_s^{Products}$):

$$Profit_s = G_s^{Products} + G_s^{Grains} - CapCost_s^{Biorefineries} - OpCost_s^{Biorefineries} - OpCost_s^{Feedstocks} - OpCost_s^{Water-biorefineries} - OpCost_s^{Water-feedstocks} - TCost_s^{Feedstocks} - TCost_s^{Grains} - TCost_s^{Products} \quad (3.1.34)$$

Debe tenerse en cuenta que la ganancia estimada es diferente para cada escenario debido a que la incertidumbre tiene un impacto diferente para los parámetros evaluados, donde para cada escenario se consideran condiciones distintas de mercado y operación. Donde los costos de operación son que fluctúan mayormente debido a que, por ejemplo, los cambios climáticos afectan la producción de cultivos, así como los precios de adquisición de materias primas. Los costos de transporte dependen de el precio de los combustibles.

Ganancia para el mejor de los casos

Considerando el efecto de la incertidumbre para cada escenario, el modelo se propone estableciendo una ganancia esperada que corresponde al efecto de las fluctuaciones en los escenarios formulándose como sigue:

$$MProfit = \overline{Profit}_s = \frac{1}{Card(s)} \sum_s Profit_s(s), \quad \forall s \quad (3.1.35)$$

Ganancia para el peor de los casos

Es importante el análisis en el mejor de las condiciones, así como en las no más favorables, de esta manera los tomadores de decisiones pueden considerar el comportamiento del sistema bajo incertidumbre con alto riesgo y establecer precauciones. Lo antes mencionado es formulado de la siguiente manera:

$$MProfit \geq WProfit \quad (3.1.36)$$

Demanda total de agua fresca

El modelo toma en cuenta los sitios factibles para instalar biorefinerías en base a la disponibilidad de agua fresca y área de cultivo. Se calcula la demanda de agua fresca total ($Water_s^{required}$) mediante la condición inicial en el flujo a lo largo de la cuenca hidrológica ($Q_{s\ final}^{Initial}$) y la condición final ($Q_{s\ final}$):

$$Water_s^{required} = Q_{s\ final}^{Initial} - Q_{s\ final}, \quad \forall s \quad (3.1.37)$$

Consumo de agua en el mejor de los casos

De manera similar a la ganancia, en el mejor de los casos el consumo de agua fresca en el conjunto de escenarios propuestos se estima mediante la siguiente expresión:

$$MWater = \overline{Water}_s = \frac{1}{Card(s)} \sum_s Water_s^{required}(s) \quad (3.1.38)$$

Este consumo se refiere al menor dentro del conjunto de valores que se estiman para todos los escenarios.

Consumo de agua para el peor de los casos

Es esencial en este sentido establecer el consumo de agua fresca (W_{Water}) por el sistema en condiciones donde el consumo de agua es el máximo a alcanzar en el conjunto de escenarios propuestos, quedando expresado de la siguiente manera:

$$W_{Water} \geq Water_s^{required}, \quad \forall s \quad (3.1.39)$$

Cálculo de las emisiones de efecto invernadero

En el aspecto ambiental, uno de los puntos más cuestionables acerca de la factibilidad de las bioenergías es el impacto ambiental que producen. Uno de los lineamientos más fuertes en contra de los combustibles de origen fósil es la alta producción de gases de efecto invernadero.

En tanto la actividad agrícola e industrial para la operación de un sistema de biorefinerías produce gran cantidad de emisiones, por lo que el modelo debe considerar el cálculo de emisiones para establecer una comparativa real de este sistema para el análisis ambiental. Se considera para este propósito que el área requerida para el cultivo de biomasa funciona como un sistema de absorción de las emisiones producidas por las plantas instaladas adyacentes a estos campos de cultivo.

$$CO_{2s}^{total} = CO_{2s}^{prod} P_s^{biototal} - CO_{2s}^{abs} A_s^{total}, \quad \forall s \quad (3.1.40)$$

3.2 Modelamiento del balance de fósforo en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente

Una de las industrias que se ajustan al nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente, es del sector lácteo. Este sector juega un papel fundamental en una cadena de suministro compleja impulsada por una economía firme en las regiones con gran producción. Analizando esta industria como aparte del nexo, podemos identificar las interconexiones con el sector minero, químico, agrícola, urbano y el medio ambiente. La metodología de integración de procesos permite la interconexión entre los diversos sectores formando la red compleja de operación de nexo. Para comprender como funcionan estos sistemas complejos, es necesario un análisis profundo y la manera más eficaz de poder realizarlo es el estudio individual de los elementos. En este sentido, se emplea un modelo para el seguimiento de contaminantes, específicamente para el seguimiento del fósforo que es un elemento fundamental en todas las etapas del nexo. En la Figura 3.3 se muestra el esquema general del nexo Nutriente-Lácteo-Medio ambiente propuesto, donde se pueden apreciar las interconexiones entre cada uno de los sectores que lo compone.

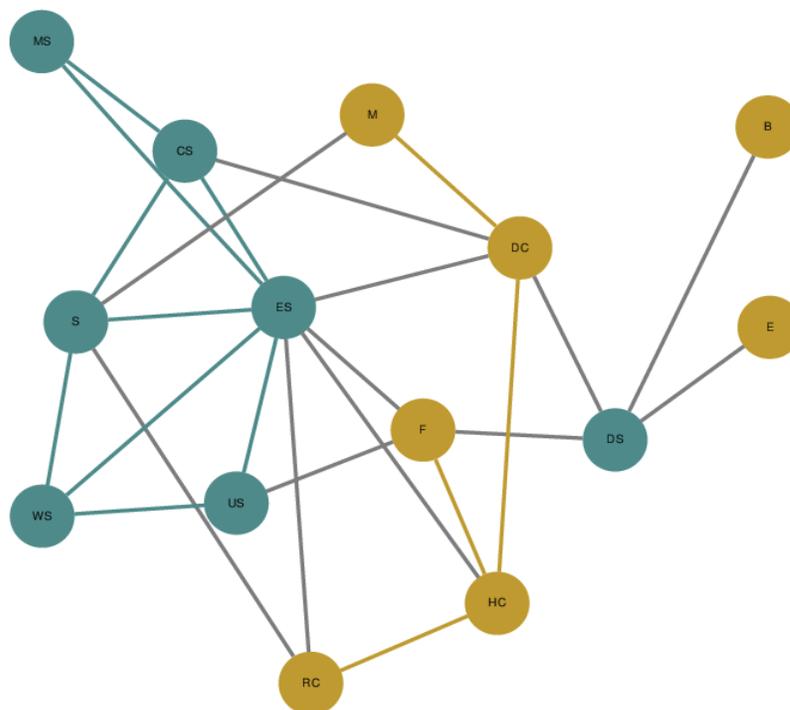


Figura 3.3. Representación del nexo Agua-Energía-Lácteos, el cual compromete en una red compleja al sector minero (MIS), sector químico (CS), sector urbano (US), sector agrícola (área de cultivo (S), producción de cultivos (RC), procesamiento de cultivos (HC)), producción de leche (DS), granjas (DC), distribución de alimentos (F), manejo de residuos (WS), manejo de estiércol (M), medio ambiente (ES), y exportaciones (E).

3.2.1 Balances de materia de fósforo

Balance de fósforo en el sector minero

El nexo demanda gran cantidad de fósforo que es abastecido de reservas naturales de roca con gran contenido de nutriente. En Estados Unidos, las reservas más importantes se encuentran en el estado de Florida y Carolina del norte. Los procesos de extracción se basan en procesos superficiales utilizando maquinaria pesada, donde las excavadoras remueven gran cantidad de roca acumulada en la superficie. La roca extraída es transportada en camiones, donde el 90% del total de la roca extraída es destinado a la actividad agrícola como materia prima para producir fertilizantes y aditivos químicos. El flujo de fósforo (P) en el sector minero (MIS) se representa como el fósforo total extraído (f_{MIS}), las pérdidas de fósforo en los procesos de extracción ($f_{MIS,ES}$) y el flujo de fósforo que va hacia el sector químico para el procesamiento a fertilizantes y aditivos ($f_{MIS,CS}$) (ver Figura 3.4.):

$$f_{MIS} = f_{MIS,CS} + f_{MIS,ES} \quad (3.2.1)$$

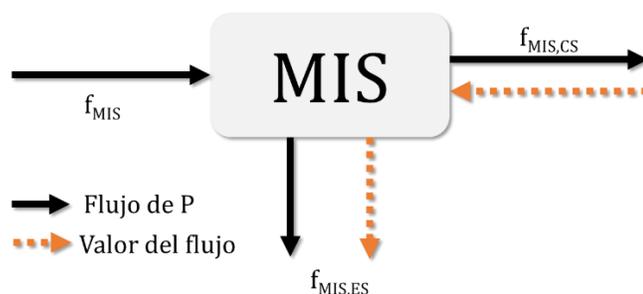


Figura 3.4. Balance de fósforo y de valor en el sector minero.

Donde, $f_{MIS,ES}$ se estima como cálculo de la eficiencia de extracción representado por α_{MIS} siendo un factor de eficiencia y f_{MIS} el flujo de fósforo en el sector minero mediante la siguiente expresión:

$$f_{MIS,ES} = \alpha_{MIS} f_{MIS} \quad (3.2.1)$$

Balance de fósforo en el sector químico

El fósforo que es extraído del sector minero es transportado a plantas de procesos que conforman al sector químico. La roca fosfórica es procesada para producir principalmente fosfato diamónico, aditivos de alimentación para ganado es uno de los productos relevantes cuando se considera la actividad del sector lácteo dentro del nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente (ver Figura 3.5). El balance de fósforo en el sector químico ($f_{MIS,CS}$) está representado por el flujo de fósforo de los fertilizantes que son destinado al sector agrícola ($f_{CS,S}$), más las pérdidas de fósforo en las etapas de producción ($f_{CS,ES}$), más el flujo de fósforo que es enviado al sector lácteo como aditivos químicos como suplementos alimenticios al ganado ($f_{CS,DC}$):

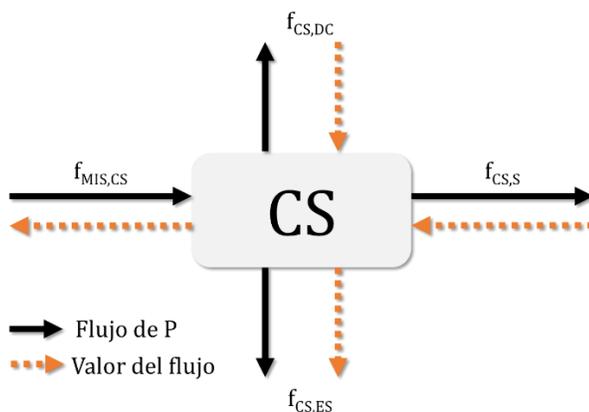


Figura 3.5. Balance de fósforo y de valor en el sector químico.

$$f_{MIS,CS} = f_{CS,S} + f_{CS,ES} + f_{CS,DC} \quad (3.2.3)$$

Las pérdidas en el sector químico (CS) están asociadas al factor de eficiencia del procesamiento de la roca fosfórica por la cantidad de roca que es tratada para posteriormente ser usada como materia prima para la producción de fertilizantes es representado de la siguiente manera:

$$f_{CS,ES} = \alpha_{CS} f_{MIS,CS} \quad (3.2.4)$$

El contenido de fósforo en la producción de aditivos ($f_{CS,DC}$) que van al sector lácteo se estima usando la siguiente expresión:

$$f_{CS,DC} = \beta_{CS,DC} P_{cow} \quad (3.2.5)$$

Donde, $\beta_{CS,DC}$ es el factor de consumo de fósforo por cabeza de ganado y P_{cow} es la población de vacas destinadas al sector lácteo.

Balance de fósforo en el sector agrícola

En el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente que se propone prestando interés en las actividades productivas necesarias para la producción de lácteos, el sector agrícola tiene un papel fundamental. Debido a que se encarga de la producción de algunos cultivos que son destinados para la alimentación del ganado impulsado por el enriquecimiento del suelo por el uso de fertilizantes de parte del sector químico. Por lo que el balance de materia en este sector se establece como el flujo de fósforo que entra al sector procedente del sector químico como fertilizantes ($f_{CS,S}$), más el flujo de fósforo suministrado como fertilizante orgánico de parte de las unidades de tratamiento de residuos del sector lácteo ($f_{M,S}$), más el fósforo por lodo enriquecido del sector de tratamiento de agua urbano, más el nutriente que proviene del aprovechamiento de residuos de cultivo mediante la técnica de *biochar*, igual a aquellas corrientes de fósforo que salen del sector en forma de cultivos cosechados a las unidades de procesamiento ($f_{S,RC}$) y las pérdidas por eficiencia de absorción del nutriente en el suelo ($f_{S,ES}$), expresado de la siguiente manera (ver Figura 3.6):

$$f_{S,RC} + f_{S,ES} = f_{CS,S} + f_{M,S} + f_{WS,S} + f_{HC,S} \quad (3.2.6)$$

Por otra parte, las pérdidas de fósforo (P) por el área sembrada se estima mediante la siguiente ecuación, donde ($\alpha_{S,ES}$) es el factor de eficiencia por fijación de fósforo en el suelo:

$$f_{S,ES} = \alpha_{S,ES} f_{CS,S} \quad (3.2.7)$$

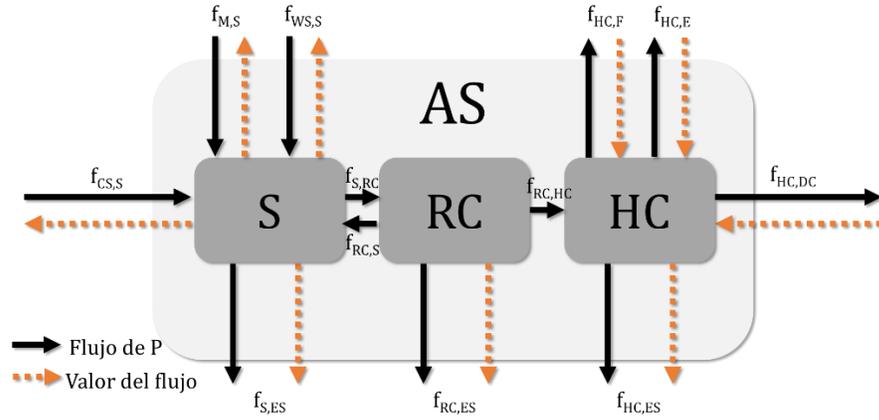


Figura 3.6. Balance de fósforo y de valor en el sector agrícola.

En la producción de muchas especies se produce gran cantidad de residuos agrícolas, tecnologías de recuperación como lo es *biochar* que mediante un tratamiento especial de estos residuos puedan ser aprovechados como un material con gran contenido de nutrientes siendo recirculados al suelo, donde $\alpha_{RC,S}$ es el factor de conversión del proceso de *biochar*:

$$f_{RC,S} = \alpha_{RC,S} f_{S,RC} \quad (3.2.8)$$

El flujo de fósforo en los cultivos que son cosechados ($f_{S,RC}$) se puede dividir en los granos y la paja siendo enviados a una etapa de procesamiento. Los granos siendo considerados como producto principal es enviado a unas etapas de procesamiento secundario ($f_{RC,HC}$), gran cantidad de los residuos agrícolas son sometidas a procesos de *biochar* para producir un fertilizante orgánico que es recirculado al suelo ($f_{RC,S}$). El balance culmina considerando las pérdidas del sector ($f_{RC,ES}$):

$$f_{S,RC} = f_{RC,HC} + f_{RC,S} + f_{RC,ES} \quad (3.2.9)$$

Donde las pérdidas son calculadas mediante el producto de $\alpha_{RC,ES}$, siendo el factor de eficiencia de las unidades de procesamiento de cultivos en el sector agrícola y el flujo de nutriente que entra a esta etapa:

$$f_{RC,ES} = \alpha_{RC,ES} f_{S,RC} \quad (3.2.10)$$

Los cultivos cosechados que entran a la segunda etapa de procesamiento en el sector agrícola ($f_{RC,HC}$) es igual al flujo de fósforo que es enviado al sector alimenticio ($f_{HC,F}$), más aquellos cultivos que son destinados como alimento para el ganado en el sector lácteo ($f_{HC,DC}$), más el flujo de fósforo contenido en exportaciones ($f_{RC,HC} = f_{HC,F} + f_{HC,DC} + f_{HC,ES} + f_{HC,E}$) y las pérdidas de la actividad en este sector ($f_{HC,ES}$):

$$f_{RC,HC} = f_{HC,F} + f_{HC,DC} + f_{HC,ES} + f_{HC,E} \quad (3.2.11)$$

El flujo de la segunda etapa de procesamiento de los productos agrícolas enviados al sector alimenticio es igual a la demanda por la población del sector urbano:

$$f_{HC,F} = x_{corn} \beta_{pc} P_{human} \quad (3.2.12)$$

Donde, x_{corn} es el factor de contenido de fósforo en maíz, β_{pc} es el factor de consumo de maíz por persona y P_{human} es la población urbana.

Las pérdidas de fósforo en esta etapa del nexo ($f_{HC,ES}$) se estiman mediante la siguiente expresión:

$$f_{HC,ES} = \alpha_{HC,ES} f_{RC,HC} \quad (3.2.13)$$

Donde, $\alpha_{HC,ES}$ es el factor de eficiencia en las etapas de procesamiento y $f_{RC,HC}$ es el flujo del cultivo a ser tratado.

Distribución de distribución de alimentos

En el sector alimentario se concentra la demanda de alimentos que son producidos por el sector agrícola y lácteo del nexo. El balance está representado por las corrientes de fósforo que

entran al sector, los productos agrícolas (granos) ($f_{HC,F}$) más los productos lácteos (leche y queso) ($f_{DS,F}$) igual a la suma de las corrientes que salen del sector compuesta por el flujo al sector urbano ($f_{F,US}$) y las pérdidas ($f_{F,ES}$) expresado de la siguiente manera (ver Figura 3.7):

$$f_{HC,F} + f_{DS,F} = f_{F,US} + f_{F,ES} \quad (3.2.14)$$

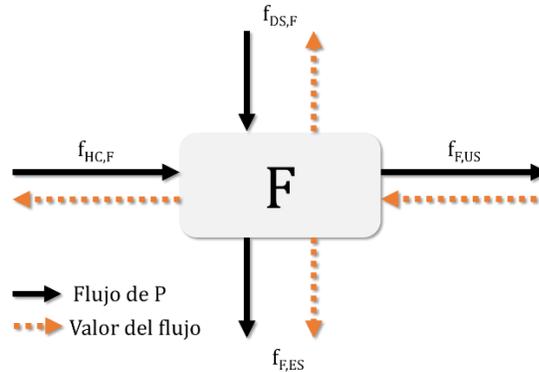


Figura 3.7. Balance de fósforo y de valor en el sector de alimentos.

Las pérdidas son estimadas con la siguiente expresión:

$$f_{F,ES} = \alpha_{F,ES} f_{HC,F} \quad (3.2.15)$$

Donde, $\alpha_{F,ES}$ es el factor de eficiencia para la distribución y almacenamiento.

Balance de fósforo en el sector urbano

EL sector humano representa la población que demanda productos agrícolas y lácteos según la disponibilidad del nexo. El contenido de fósforo (P) contenido en cada producto es ingerido por la población y procesado por el metabolismo de cada individuo donde cierta parte es excretada por diversas formas para ser luego tratado como residuos urbanos para la mayor parte ser recuperados y pasar por un sistema de tratamiento en los centros de disposición en el sector de manejo de residuos (WS), mientras el resto es vertido al medio ambiente (ES) originando graves problemas de contaminación y de salud. El balance de materia para este sector es representado como sigue (ver Figura 3.8):

$$f_{F,US} = f_{US,WS} + f_{US,ES} \quad (3.2.16)$$

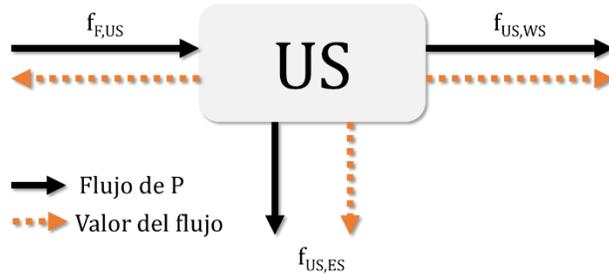


Figura 3.8. Balance de fósforo y de valor en el sector urbano.

Donde las pérdidas de este sector ($f_{US,ES}$) son igual al producto de un factor de eficiencia ($\alpha_{US,ES}$) y el flujo de fósforo que entra al sector por suministro de producto ($f_{F,US}$):

$$f_{US,ES} = \alpha_{US,ES} f_{F,US} \quad (3.2.17)$$

Balance de fósforo en el sector de manejo de residuos

El gran impacto ambiental por los desechos urbanos ha impuesto una normativa cada vez más estricta que exige el tratamiento de la mayoría de los efluentes urbanos para reducir gran cantidad de consecuencias ambientales y proteger la calidad del agua. El sector de manejos de residuos urbanos propuesto para este sector se basa en un sistema de unidades de tratamiento de efluentes con gran concentración de fósforo generado a lo largo del proceso lodo enriquecido y una corriente de producto que cumple con las condiciones idóneas para ser vertidas al medio ambiente (ver Figura 3.9). El balance es expresado como:

$$f_{US,WS} = f_{WS,S} + f_{WS,ES} \quad (3.2.18)$$

El lodo enriquecido en fósforo es empleado como fertilizante orgánico y reciclado al sector agrícola para ser aprovechado, donde la producción de lodo en este sector se representa con la siguiente ecuación:

$$f_{WS,S} = \alpha_{WS,S} f_{US,WS} \quad (3.2.19)$$

Donde, $\alpha_{WS,S}$ es el factor de eficiencia del proceso de tratamiento del sector del manejo de residuos urbanos y $f_{US,WS}$ es el flujo de fósforo contenido en el flujo que entra al sector.

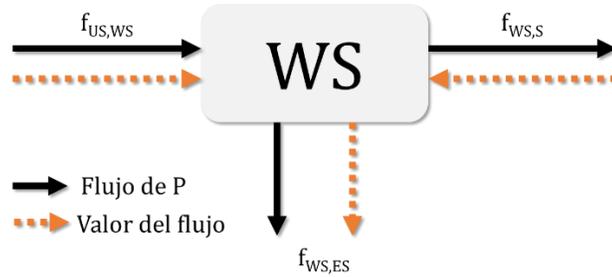


Figura 3.9. Balance de fósforo y de valor en el sector de tratamiento de residuos urbanos.

Balance de fósforo en el sector lácteo

El sector lácteo está compuesto en dos subsectores: granjas (DC) donde el ganado es criado y la leche es producida, así además por plantas industriales del procesamiento de productos lácteos (donde se lleva a cabo la pasteurización y producción de queso) (DS). El balance del sector de lácteo se formula como sigue (ver Figura 3.10):

$$f_{CS,DC} + f_{HC,DC} = f_{DC,DS} + f_{DC,ES} + f_{DC,M} \quad (3.2.20)$$

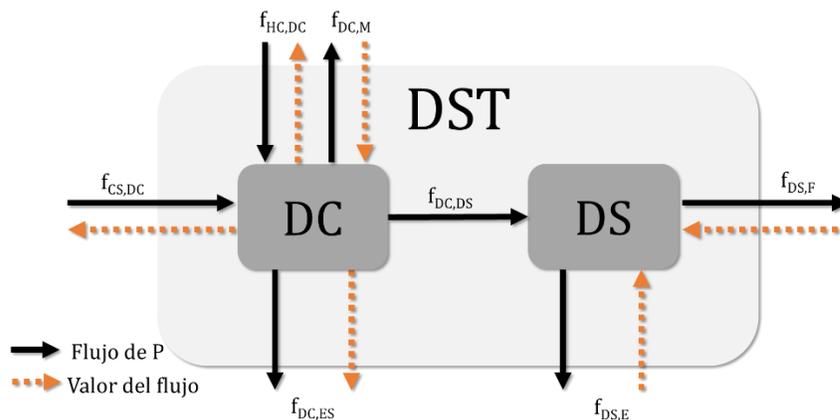


Figura 3.10. Balance de fósforo y de valor en el sector lácteo.

Donde, $f_{CS,DC}$ es el fósforo que entra al sector como aditivos para el crecimiento de ganado en las granjas, $f_{HC,DC}$ es el nutriente proveniente del cultivo destinado como alimento del ganado. Mientras que las corrientes que salen del sistema se consideran $f_{DC,DS}$ como la corriente de la leche producida en las granjas enviada a las unidades de procesamiento, $f_{DC,ES}$ pérdidas del sector por eficiencia metabólica en absorción de fósforo y $f_{DC,M}$ corriente de estiércol producidas en las granjas que es enviado a un sistema de tratamiento para producir fertilizantes orgánico.

La demanda de fósforo como requerimiento de nutriente mediante alimento se representa con la expresión siguiente:

$$f_{HC,DC} = (x_{corn}\beta_{rc} + x_{silage}\beta_{rs})P_{cow} \quad (3.2.21)$$

Donde, x_{corn} es el contenido de fósforo en maíz, β_{rc} es el factor para el consumo de maíz por cabeza de ganado, x_{silage} factor del contenido de fósforo en paja, β_{rs} factor de requerimiento de consumo de paja por cabeza de ganado y P_{cow} es la población de vacas destinadas para la producción de lácteos.

Las pérdidas del sector se formulan como sigue:

$$f_{DC,ES} = \alpha_{DC,ES}f_{HC,DC} \quad (3.2.22)$$

Donde, $\alpha_{DC,ES}$ es el factor de eficiencia para la absorción de fósforo por la población de ganado.

El balance de fósforo para el subsector de las unidades de procesamiento se define a continuación:

$$f_{DC,DS} = f_{DS,F} + f_{DS,E} \quad (3.2.23)$$

Donde, $f_{DS,F}$ es la corriente al exceso de producción y $f_{DS,E}$ se refiere a la salida de nutrientes por la explotación de productos lácteos. En el subsector industrial, el contenido de fósforo se expresa por el contenido de fósforo en leche y queso siendo los productos principales en el nexo propuesto.

$$f_{DC,DS} = f_{pch} + f_{pm} \quad (3.2.24)$$

El contenido de fósforo en la producción de queso se representa con la siguiente formulación:

$$f_{pch} = \beta_{mc} x_{cheese} \beta_{prc} P_{milk} \quad (3.2.25)$$

Donde, β_{mc} es el factor de leche necesaria para producir queso, x_{cheese} es el factor que expresa el contenido de fósforo por unidad másica de queso, β_{prc} el factor del requerimiento de leche para producir queso, mientras que P_{milk} es la población de vacas destinadas a la producción de lácteos. El fósforo en la leche producida es:

$$f_{pm} = (1 - \beta_{mc}) x_{milk} P_{milk} \quad (3.2.26)$$

Donde, x_{milk} es el contenido de fósforo en leche.

La producción de leche en este sector se determina de la siguiente manera:

$$P_{milk} = \beta_{milk} P_{cow} \quad (3.2.27)$$

Donde, β_{milk} es el factor de rendimiento de las vacas lecheras en las granjas.

Mientras que la demanda de productos lácteos para el sector urbano queda definida por la siguiente expresión:

$$f_{DS,F} = (\beta_{mp} x_{milk} + \beta_{chp} x_{cheese}) P_{human} \quad (3.2.28)$$

Donde, P_{human} es la población que representa al sector urbano.

Balance de fósforo en el sector de manejo de residuos orgánicos del sector lácteo

Los desechos de las granjas tienen un gran impacto en las regiones donde están asentadas debido a las grandes cantidades de estiércol generadas; mismas que provocan contingencia ambiental y de salud. Buscando el aprovechamiento de los residuos, unidades de tratamiento se operan para la producción de fertilizante orgánico, el balance en este sector se propone de la siguiente manera (ver Figura 3.11):

$$f_{DC,M} = f_{M,S} + f_{M,ES} \quad (3.2.29)$$

Donde, $f_{M,S}$ es el flujo de fósforo como fertilizante orgánico y $f_{M,ES}$ son las pérdidas del sector por eficiencia en el tratamiento de los residuos de parte del sector lácteo.

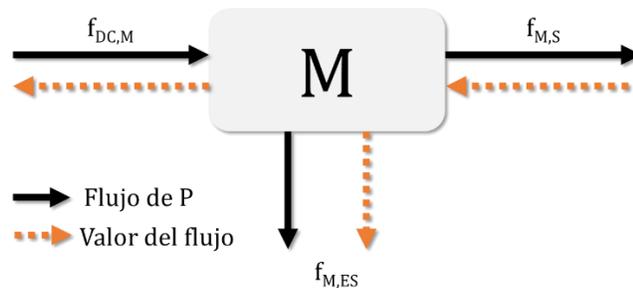


Figura 3.11. Balance de fósforo y de valor del tratamiento de residuos orgánicos de las granjas.

Balance de fósforo en matriz

La solución del modelo para el balance de fósforo puede ser resuelto por el sistema lineal de la ecuación 3.2.30, donde f es el vector que posee todas las variables de flujo del nutriente, mientras que M es la matriz de incidencia siendo cuadrática y de 28 dimensiones. Como es un sistema lineal solo hay una única solución. El valor de todos los parámetros está contenido en el material suplementario anexo al final del documento.

$$M * f = r \quad (3.2.30)$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_{MIS} \\ f_{MIS,ES} \\ f_{MIS,CS} \\ f_{CS,ES} \\ f_{CS,S} \\ f_{CS,DC} \\ f_{S,ES} \\ f_{S,RC} \\ f_{RC,S} \\ f_{WS,S} \\ f_{M,S} \\ f_{RC,ES} \\ f_{RC,HC} \\ f_{HC,F} \\ f_{HC,ES} \\ f_{HC,DC} \\ f_{HC,H} \\ f_{F,US} \\ f_{F,ES} \\ f_{DS,F} \\ f_{US,ES} \\ f_{US,WS} \\ f_{WS,ES} \\ f_{DC,ES} \\ f_{DC,M} \\ f_{DC,DS} \\ f_{DS,E} \\ f_{M,ES} \end{bmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 100100 \\ 0 \\ 0 \\ \beta_{CS,DC} P_{cow} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sum_c Y_c x_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_{human} \sum_c x_c \beta_{p,c} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{\sum_i W_i m_i^p}{1000} \\ 0 \\ 0 \\ f_{pcht} + f_{pm} + f_{plf} \\ P_{human} \sum_d \beta_{p,d} x_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sector minero

El balance económico en este sector está dado por la ecuación (3.2.30). La roca fosfórica extraída de las minas es comprada por el sector químico al precio donde, en base a la demanda de roca fosfórica, se puede estimar el costo total del flujo de fósforo, considerando las pérdidas para tener un balance robusto mediante la siguiente expresión:

$$B_{MIS} = Cf_{MIS,CS} - Cf_{MIS,ES} \quad (3.2.30)$$

Donde, $Cf_{MIS,CS}$ es el costo del flujo de fósforo para la roca extraída del sector minero demandada por el sector químico y $Cf_{MIS,ES}$ es el costo asociado al tratamiento de los efluentes generado por el tratamiento necesario para la eliminación de fósforo para cumplir las normativas ambientales para poder ser descargadas al medio ambiente.

El costo de la roca fosfórica se estima mediante la siguiente ecuación:

$$Cf_{MIS,CS} = \frac{1}{x_{rock}} C_{rock} f_{MIS,CS} \quad (3.2.31)$$

Donde, x_{rock} es el contenido de fósforo en la roca extraída de las minas, C_{rock} es el costo de fósforo presente en este producto, y $f_{MIS,CS}$ es el flujo de fósforo del sector minero al químico.

En tanto que las pérdidas en el sector minero son debidas a factores de eficiencia en los procesos de tracción, ya que debido al uso de maquinaria pesada y a los procesos de tratamiento de la roca, cierta cantidad no puede ser recuperada. Por lo que el costo que se genera por la disposición de estos residuos ($Cf_{MIS,ES}$) se estima de la siguiente manera:

$$Cf_{MIS,ES} = C_{waste} f_{MIS,ES} \quad (3.2.32)$$

Donde, C_{waste} es el costo unitario para tratar el nutriente presente en los residuos y $f_{MIS,ES}$ es el flujo de fósforo debido a estas pérdidas.

Sector químico

El balance económico en este sector considera las entradas de ingreso y pérdidas por las diversas corrientes de fósforo. El balance es estimado por la siguiente expresión:

$$B_{CS} = Cf_{CS,DC} + Cf_{CS,S} - Cf_{MIS,CS} - Cf_{CS,ES} \quad (3.2.33)$$

Donde, $Cf_{CS,DC}$ son las ganancias del sector químico por la venta de aditivos para la dieta del ganado en el sector lácteo, $Cf_{CS,S}$ las ganancias por la venta de fertilizantes al sector agrícola, $Cf_{MIS,CS}$ es el costo por la adquisición de roca fosfórica del sector minero y $Cf_{CS,ES}$ el costo por el tratamiento de las pérdidas del sector, todo lo anterior en base al contenido de fósforo.

Las ganancias de la corriente de fósforo por lo aditivos producidos en el sitio y enviados a las granjas se formula como:

$$Cf_{CS,DC} = \frac{1}{x_{add}} C_{add} f_{CS,DC} \quad (3.2.34)$$

Donde, x_{add} es el contenido de fósforo en los aditivos, C_{add} es el costo unitario de los aditivos y $f_{CS,DC}$ es el flujo de fósforo en el flujo de aditivos enviados al sector lácteo.

Las ganancias debido a los fertilizantes se calculan con la ecuación (3.2.35):

$$Cf_{CS,S} = \frac{1}{x_{fert}} Cf_{fert} f_{CS,S} \quad (3.2.35)$$

Donde, x_{fert} es el factor del contenido de fósforo en los fertilizantes, Cf_{fert} es el costo de los fertilizantes y $f_{CS,S}$ es el flujo de fósforo en la corriente de fertilizantes enviados al sector agrícola.

El costo por el tratamiento de las pérdidas de fósforo, siendo de lo contrario vertidas al medio ambiente se estima como:

$$Cf_{CS,ES} = C_{waste} f_{CS,ES} \quad (3.2.36)$$

Donde, C_{waste} es el costo unitario por unidad másica de fósforo tratado, y $f_{CS,ES}$ es el flujo de fósforo como perdidas hacia el medio ambiente.

Sector agrícola

El sector agrícola (AS), donde los cultivos son sembrados, cosechados y procesados, es dividido en tres subsectores: suelo (S), etapa de procesamiento 1 (RC), etapa de procesamiento 2 (HC). Las propiedades del suelo definen el rendimiento y la calidad de los productos. EL contenido de fósforo (P) impulsa el crecimiento de los cultivos, este nutriente tomado de forma orgánica o química de parte diversos fertilizantes. Los costos de este sector se basan en la compra de estos fertilizantes ($Cf_{M,S}$, $Cf_{WS,S}$, $Cf_{CS,S}$), y los costos de tratamiento de los efluentes ($Cf_{S,ES}$, $Cf_{RC,ES}$, $Cf_{HC,ES}$); mientras que las ganancias vienen por la venta de los productos agrícolas como alimento para el sector urbano ($Cf_{HC,DC}$) y lácteo ($Cf_{HC,F}$) o el exceso como exportaciones ($Cf_{HC,B}$).

$$B_{AS} = Cf_{HC,F} + Cf_{HC,DC} + Cf_{HC,B} - Cf_{M,S} - Cf_{WS,S} - Cf_{CS,S} - Cf_{S,ES} - Cf_{RC,ES} - Cf_{HC,ES} \quad (3.2.37)$$

El costo del flujo de fósforo en los productos agrícolas (paja, granos) desde la etapa de tratamiento 2 al sector alimenticio viene dado por la expresión siguiente:

$$Cf_{HC,F} = \frac{1}{x_{corn}} C_{corn} f_{HC,F} \quad (3.2.38)$$

Donde, x_{corn} es el contenido de fósforo en los granos, C_{corn} es el costo unitario del cultivo, mientras que $f_{HC,F}$ es el flujo de fósforo contenido en los productos que son enviados al sector alimenticio desde esta etapa. Para el caso del cálculo del valor de la corriente de fósforo en su forma de paja y granos, cuya función es ser empleado como alimento para el ganado en las granjas, se formula como sigue:

$$Cf_{HC,DC} = \left(\frac{X_{corn} C_{corn}}{x_{corn}} + \frac{X_{silage} C_{silage}}{x_{silage}} \right) f_{HC,DC} \quad (3.2.39)$$

Donde, X_{corn} es la fracción de granos en la producción total, C_{corn} es el precio unitario del cultivo (maíz), x_{corn} es el contenido de fósforo en este producto. Para el caso de la paja (producto secundario del sector agrícola), X_{silage} es la fracción de paja en la producción total, C_{silage} es el costo unitario, x_{silage} es el contenido de fósforo, mientras $f_{HC,DC}$ es el flujo de fósforo contenido en los productos agrícolas que son enviados al sector lácteo.

Para finalizar, las exportaciones se estiman de la siguiente manera:

$$Cf_{HC,B} = \frac{1}{x_{corn}} C_{corn} f_{HC,B} \quad (3.2.40)$$

Donde, $f_{HC,B}$ es el flujo de fósforo en el exceso de productos agrícolas que pueden ser exportados.

Los fertilizantes sintetizados químicamente siguen siendo predominantes, sin embargo, debido a las regulaciones ambientales, han surgido alternativas orgánicas que producen fertilizantes con los residuos de otras etapas de procesamiento en el nexo y permiten reducir el consumo global de este nutriente en específico. Las que se consideran en este sector son en base a estiércol, lodos enriquecidos de tratamientos de agua, y *biochar*. Los costos que se generan por la adquisición de estos fertilizantes son:

Para el caso del fertilizante producido en base estiércol:

$$Cf_{M,S} = \frac{1}{x_{manure,t}} C_{manure,t} f_{M,S} \quad (3.2.41)$$

Donde, $x_{manure,t}$ es el contenido de fósforo en el estiércol, $C_{manure,t}$ es el costo designado por el mercado por el estiércol como materia prima para producir fertilizante orgánico, y $f_{M,S}$ es

el flujo de fósforo por los fertilizantes proveniente del sector de tratamiento de residuos del sector lácteo.

El costo debido a fertilizante por lodo enriquecido proveniente del sector de manejo de residuos urbano se formula como sigue:

$$Cf_{WS,S} = \frac{1}{x_{sludge}} C_{sludge} f_{WS,S} \quad (3.2.42)$$

Donde, x_{sludge} es el contenido de fósforo en el lodo enriquecido, C_{sludge} es el costo unitario del lodo enriquecido y $f_{WS,S}$ es el flujo de fósforo en la corriente de fósforo en el lodo enriquecido que es enviado al sector agrícola.

En el sector agrícola, las pérdidas de fósforo a lo largo de los subsectores (suelo, etapa de procesamiento 1 y 2) se estiman mediante las siguientes ecuaciones:

$$Cf_{S,ES} = C_{waste} f_{S,ES} \quad (3.2.43)$$

$$Cf_{RC,ES} = C_{waste} f_{RC,ES} \quad (3.2.44)$$

$$Cf_{HC,ES} = C_{waste} f_{HC,ES} \quad (3.2.45)$$

Las pérdidas dependen de la absorción del nutriente en el suelo, el tratamiento de los productos agrícolas, el rendimiento del *biochar* por los residuos agrícolas en la primera etapa de procesamiento, etc.

Sector urbano

El balance económico se presenta en la ecuación (3.2.46), el flujo monetario en este sector es negativo en todos los términos ya que cada una de las corrientes que entran o salen del sector genera un costo por los alimentos de parte del sector alimenticio (granos productos lácteos) ($Cf_{F,US}$), penalización por pérdidas de fósforo que no pueden ser recuperadas para tratamiento ($Cf_{US,ES}$), costo para el tratamiento de efluentes ($Cf_{US,WS}$).

$$B_{US} = -Cf_{F,US} - Cf_{US,WS} - Cf_{US,ES} \quad (3.2.46)$$

Desglosando estos costos, el costo por productos provenientes del sector alimenticio se define como:

$$Cf_{F,US} = Cf_{HC,F} + Cf_{DS,F} \quad (3.2.47)$$

Donde, $Cf_{HC,F}$ es el precio que tiene que pagar el sector alimentario por los productos agrícolas y $Cf_{DS,F}$ costo de los productos lácteos que son suministrados.

La tarifa para el tratamiento del fósforo en los residuos urbanos se presenta en la ecuación (3.2.47); donde, x_{desh} es el contenido de fósforo en los desechos urbanos, C_{desh} es la penalización por la descarga directa de los desechos con esa concentración de fósforo, y $f_{US,WS}$ es el flujo de fósforo presente en la producción de desechos que son recuperados para ser tratados en un sistema tratamiento de residuos.

$$Cf_{US,WS} = \frac{1}{x_{desh}} C_{desh} f_{US,WS} \quad (3.2.48)$$

La penalización por las descargas de fósforo al medio ambiente se formula con la expresión:

$$Cf_{US,ES} = C_{waste} f_{US,ES} \quad (3.2.49)$$

Donde, C_{waste} es el costo unitario por la penalización por la descarga de desechos al medio ambiente.

Sector manejo de residuos urbanos

El balance económico del sistema de tratamiento está dado por la ecuación (3.2.50). El ingreso al sector se debe a las ganancias por la venta de lodo enriquecido que es usado como fertilizantes en el sector agrícola, así como al ingreso por el tratamiento de los residuos por la

penalización del sector urbano. Mientras que las pérdidas ($Cf_{US,ES}$) por baja eficiencia en la operación del sistema de tratamiento generan un costo a este sector.

$$B_{WS} = Cf_{WS,S} + C_{US,WS} - Cf_{WS,ES} \quad (3.2.50)$$

$$Cf_{US,ES} = C_{waste} f_{US,ES} \quad (3.2.51)$$

Sector lácteo

Los precios en el mercado de los productos lácteos dependen de las condiciones del mercado que están basados en las fluctuaciones de los precios de las materias primas o recursos demandados por el sector. En general, el balance económico está definido con la ecuación (3.2.51), donde $Cf_{DC,M}$ es la ganancia por la venta de estiércol para la producción de fertilizante, $Cf_{DS,E}$ es la ganancias que generan la exportación de productos lácteos y $Cf_{DS,B}$ por exceso de producción, $Cf_{HC,DC}$ es el costo que genera la adquisición de productos agrícolas como alimento para el ganado en las granjas productoras de leche, $Cf_{DC,ES}$ es el costo por penalización al sector por la descarga de efluentes con gran concentración de fósforo, $Cf_{CS,DC}$ costo por la compra de aditivos alimentación al sector químico.

$$B_{DST} = Cf_{DC,M} + Cf_{DS,B} + Cf_{DS,E} + Cf_{DS,F} - Cf_{HC,DC} - Cf_{DC,ES} - Cf_{CS,DC} \quad (3.2.52)$$

El valor del estiércol generado es estimado con la ecuación (3.2.52), donde $x_{manure,r}$ es el contenido de P en este residuo orgánico, $C_{manure,r}$ es el costo unitario actual, y $f_{DC,M}$ es el flujo de fósforo en la producción total de estiércol en las granjas.

$$Cf_{DC,M} = \frac{1}{x_{manure,r}} C_{manure,r} f_{DC,M} \quad (3.2.53)$$

Las ganancias por las exportaciones de los productos agrícolas ya sea por demanda ($Cf_{DS,E}$) o exceso ($Cf_{DS,B}$) se calculan mediante las ecuaciones (3.2.53), (3.2.54) y (3.2.55). Donde, X_{milk}

es la fracción de leche pasteurizada como producto final, C_{milk} es el costo unitario de leche, x_{milk} es el contenido de fósforo en leche, X_{cheese} es la fracción de leche que es procesada como queso, C_{cheese} costo unitario del queso, x_{cheese} es el contenido de fósforo en el queso.

$$Cf_{DS,B} = \left(\frac{X_{milk} C_{milk}}{x_{milk}} + \frac{X_{cheese} C_{cheese}}{x_{cheese}} \right) f_{DS,B} \quad (3.2.54)$$

$$Cf_{DS,E} = \left(\frac{X_{milk} C_{milk}}{x_{milk}} + \frac{X_{cheese} C_{cheese}}{x_{cheese}} \right) f_{DS,F} \quad (3.2.55)$$

$$Cf_{DS,E} = (\beta_{mp} C_{milk} + \beta_{chp} C_{cheese}) P_{human} = \left(\frac{X_{milk} C_{milk}}{x_{milk}} + \frac{X_{cheese} C_{cheese}}{x_{cheese}} \right) f_{DS,F} \quad (3.2.56)$$

El costo de los productos agrícolas y aditivos es evaluado en las ecuaciones (3.2.39) y (3.2.34). Mientras que el costo generado por las penalizaciones ambientales ($Cf_{DC,ES}$) por las pérdidas de fósforo en el sector está dado por:

$$Cf_{DC,ES} = C_{waste} f_{DC,ES} \quad (3.2.57)$$

Manejo de residuos del sector lácteo

El balance económico en el sistema de tratamiento de estiércol esta dado en la ecuación (3.2.58). Los términos positivos en el balance representan las ganancias por la venta de estiércol tratado como fertilizante urbano ($Cf_{M,S}$), los términos negativos representan los gastos por la adquisición del estiércol como materia prima y la penalización por la descarga de efluentes al medio ambiente ($Cf_{M,ES}$).

$$B_M = Cf_{M,S} - Cf_{DC,M} - Cf_{M,ES} \quad (3.2.58)$$

Donde el gasto por penalización ($Cf_{M,ES}$) es estimado por la siguiente ecuación:

$$Cf_{M,ES} = C_{waste} f_{M,ES} \quad (3.2.59)$$

Balance económico total

El balance económico global para el nexo se presenta por la suma del valor económico acumulado para cada uno de los sectores (ver ecuación (3.2.60)). Cada valor interpreta las ganancias o costos.

$$B_{TOTAL} = B_{MIS} + B_{CS} + B_{AS} + B_{US} + B_{WS} + B_{DTS} + B_M \quad (2.60)$$

Capítulo IV. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados por la aplicación de los modelos de optimización propuestos para los casos de estudio establecido en el estudio del nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente y establecer un análisis robusto.

4.1 Análisis de resultados para la localización de biorefinerías considerando incertidumbre en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente

El modelo de optimización que se propone de acuerdo con el tipo de ecuaciones corresponde a un problema mixto entero no lineal (MINLP por sus siglas en inglés). La no linealidad la da un término dentro de la ecuación (3.1.26) debido el exponente de la economía de escala ($\sigma_{m,r}^{Biorefinery}$). Debido a problemas de convergencia, capacidad y tiempo de cómputo se linealiza tal ecuación mediante la suposición de que el factor antes mencionado en la ecuación económica sea igual a 1 para poder tener un problema de optimización mixto entero lineal (MILP). La superestructura del sistema propuesto para el sistema de biorefinerías, así como las interacciones con el sector agrícola, urbano y el medio ambiente se muestra en la Figura 3.2. Se establece el diseño considerando la producción de biocombustibles necesaria para satisfacer la demanda del mercado considerando los requerimientos de biomasa, suelo y agua como principales limitantes Cabe resaltar que, al estar considerando la incertidumbre, gran cantidad de datos tienen que ser evaluados para definir los parámetros con mayor fluctuación, lo que dará lugar a la generación de escenarios (la generación de los escenarios se realizó en Excel). El modelo propuesto se codificó en GAMS (de las siglas en inglés por *General Algebraic Modeling System*) [25], siendo un software de alto rendimiento para resolver modelos de programación matemática con gran variedad de *solvers* y aplicaciones. El modelo propuesto se restringe a cumplir objetivos económicos y ambientales. El objetivo económico se refiere a la maximización de la ganancia en el mejor de los escenarios, mientras que el objetivo ambiental se establece con la minimización del consumo de agua para el mejor de los escenarios; cabe mencionar que para ambos objetivos también se estiman las condiciones en el peor de los escenarios, eso quiere decir que se analiza el estado del sistema con la mínima ganancia y el máximo consumo de agua de entre todas las soluciones posibles, esta estrategia de solución se esquematiza en la Figura 4.1.

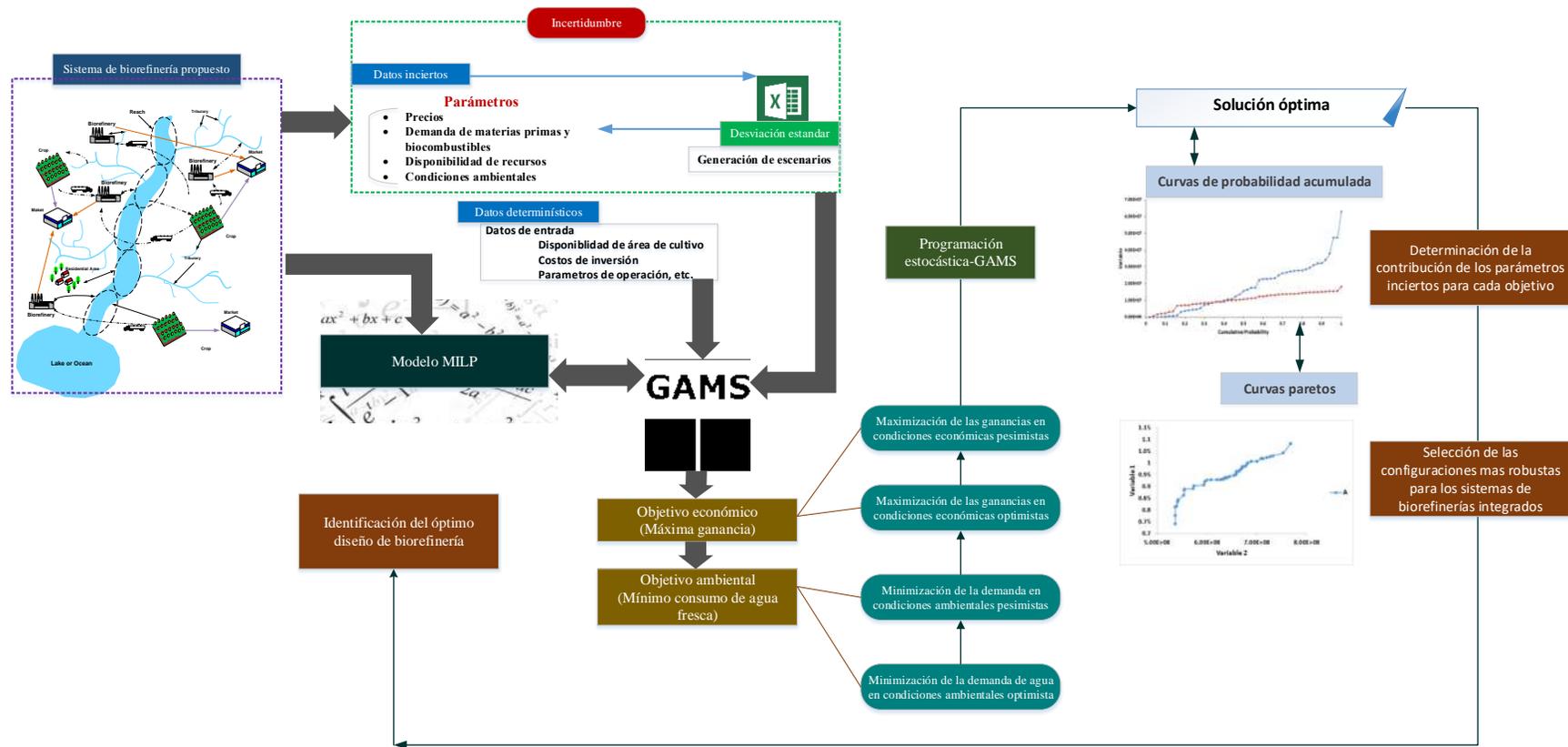


Figura 4.1. Estrategia de solución del modelo de optimización.

Lo anterior permite establecer la flexibilidad del sistema, un punto a favor a ser considerado como una herramienta importante para quienes toman decisiones ya que brinda información sobre el riesgo potencial y las ventajas del sistema de biorefinerías propuesto. Dentro del aspecto ambiental, también es considerado el cálculo global de las emisiones de CO₂ debido al fundamento principal de las energías renovables de producir el mínimo impacto ambiental, la producción de emisiones de efecto invernadero es uno de los lineamientos que han producido mayor controversia. En la Figura 4.1 se formula desde la conceptualización del problema con la superestructura hasta la estrategia de solución del problema de optimización. En la superestructura se esquematiza las características del nexo representando las interconexiones entre el sector agrícola, bioenergética, medio ambiente y otros sectores como el urbano que interaccionan con la cuenca hidrológica de estudio. La incertidumbre siendo una parte fundamental a considerar en el modelo matemático establecido, se tiene un tratamiento de estos parámetros con la finalidad de aplicar la desviación correspondiente necesaria para poder formular los escenarios de interés. A continuación, se programa en el *solver* GAMS ^[31] y se cargan los parámetros necesarios que conforma el caso de estudio, para proceder a resolver, y finalmente darles un tratamiento a los resultados para poder presentarlos.

Caso de estudio

Este caso de estudio es definido para evaluar el modelo de optimización propuesto. Un sistema de biorefinación a gran escala se propone para satisfacer la demanda energética de la zona centro del país (área con la mayor demanda) considerando las condiciones climatológicas, geográficas, de planeación y diseño. Debido a las condiciones climatológicas y geográficas, la actividad agrícola es predominante en esta región, además tiene gran potencial para la producción de ciertos cultivos con gran rendimiento en la generación de biocombustibles. El río Balsas es propuesto como cuenca hidrológica de estudio, el cual es una excelente disposición de agua fresca y área de cultivos, que según la metodología del MFA propuesta para el análisis ambiental es dividido en 23 tramos, donde en cada uno hay condiciones idóneas para la instalación de una biorefinería en base a disposición de agua, suelo y materias primas. En base a las proyecciones energéticas de SENER (secretaría de energía) ^[32] para los próximos años, el 10 por ciento de la demanda energética total del país deberá ser satisfecha por biocombustibles. Esta demanda se divide en 10 mercados representados por ciudades principales de los estados circundantes

(Querétaro, Guadalajara, Ciudad de México, Toluca, Cuernavaca, Morelia, Lázaro Cárdenas, Uruapan, León, Puebla). El esquema agrícola se define en base a los parámetros como el área potencial de cultivo, condiciones del suelo (nutrientes, erosión, porosidad y permeabilidad), rendimiento de los cultivos, demanda de agua de cultivo, costos de cultivo, descarga de efluentes al medio ambiente, área disponible, etc., estos datos obtenidos de estudios realizados por SAGARPA-SIAP (2016) ^[33] y FAO (2017) ^[34]. Un estudio geográfico se llevó a cabo para establecer las condiciones climáticas de las áreas de cultivo, gran parte de los datos respecto a la filtración del suelo en esta región, evaporación y precipitación fueron proporcionados por CONAGUA (Comisión nacional del agua, 2017) ^[35]. Las demandas de agua y descargas de efluentes por las actividades humanas (sector agrícola, sector urbano y sector industrial) asentadas a lo largo de la cuenca determinan un sistema hídrico que fluctúa considerablemente siendo de las aportaciones más importante en este sistema.

Debido al desarrollo del sector bioenergético, las rutas de producción se han perfeccionado abriendo lugar a nuevos productos con alto valor agregado (por ejemplo: productos aromáticos, aminoácidos, xilitol, ácido láctico, fenoles, fertilizantes, entre otros) buscando la rentabilidad económica para esta actividad. Sin embargo, para un diseño y planeación de biocombustibles a gran escala se tiene que tener una base de datos amplia y actualizada, por esta razón para el presente caso de estudio se consideró solamente la producción de bioetanol y biodiesel. En la Tabla 4.1 se presentan las demandas de biocombustibles para cada uno de los mercados. La materia prima empleada son residuos lignocelulósicos de cultivos agrícolas producidos en la región de estudio, donde para la producción de bioetanol se emplea maíz, trigo, sorgo y caña de azúcar, mientras para la producción de biodiesel se procesa jatrofa y palma de aceite.

Respecto al esquema económico, los precios de venta de los biocombustibles son: US\$0.45/L para bioetanol y US\$0.66/L para biodiesel, el precio de venta de granos y frutos de los cultivos empleados que son considerados como una retribución económica al sistema son: maíz a US\$140/Ton, trigo US\$142/Ton, sorgo US\$138/Ton, caña de azúcar US\$30/Ton, jatrofa US\$4000/Ton y palma de aceite US\$304/Ton. Para los costos de la biomasa son: residuos de maíz US\$11.20/Ton, trigo US\$11.80/Ton, sorgo US\$9.70/Ton, caña de azúcar US\$3.65/Ton, jatrofa US\$13.50/Ton, palma de aceite US\$4.70/Ton.

Tabla 4.1. Demanda de biocombustibles en el mercado.

Demanda estimada (L/año)		
<i>Mercado</i>	<i>Bioetanol</i>	<i>Biodiesel</i>
1 Querétaro	3.24x10 ⁶	3.99 x10 ⁶
2 Guadalajara	6.02 x10 ⁶	7.43 x10 ⁶
3 DF	3.56 x10 ⁷	4.40 x10 ⁷
4 Toluca	1.97 x10 ⁶	2.43 x10 ⁶
5 Cuernavaca	1.36 x10 ⁶	1,.68 x10 ⁶
6 Morelia	2.40 x10 ⁶	2,.97 x10 ⁶
7 Lázaro Cárdenas	7.19 x10 ⁵	8.89 x10 ⁵
8 Uruapan	1.27 x10 ⁶	1.57 x10 ⁶
9 León	4.98 x10 ⁶	6.16 x10 ⁶
10 Puebla	2.32 x10 ⁷	2.88 x10 ⁷

La inclusión de la incertidumbre en el modelo de optimización representa una metodología en especial para ser modelada, por lo cual se realiza un análisis estadístico para cada parámetro donde se determina la desviación estándar para el tratamiento de datos históricos de los parámetros recolectados de las fuentes antes mencionadas. Mediante el método de Montecarlo se generan 50 escenarios a partir del caso de estudio principal variando para cada uno de estos los parámetros antes seleccionados (demanda de biocombustibles, disponibilidad de área de cultivo, precio de venta de materias primas y productos, condiciones climatológicas (precipitación, evaporación y filtración) y del suelo (porosidad, erosión, y permeabilidad), distribución de biomasa y biocombustibles, distribución de cultivos, precio de agua fresca, área disponible de cultivo y rendimiento de producción de cultivos). El modelo de optimización fue codificado en GAMS y fue resuelto mediante el *solver* CPLEX, cuyo caso de estudio se componen por 309,650 variables continuas, 23 variables binarias, y 84,947 restricciones. En horizonte de tiempo de 10 años de inversión, la solución y el análisis para el diseño del sistema de biorefinerías se muestra a continuación:

Solución

El tiempo de cómputo y las soluciones del problema de optimización se muestran en la Tabla 4.2. El problema es resuelto considerando el objetivo económico, primeramente,

maximizando la ganancia para el mejor de los escenarios (condiciones económicas optimistas) y de igual manera para el caso contrario donde se maximiza la ganancia para el peor de los escenarios. En la Figura 4.2 se presenta la curva de Pareto para la ganancia y la demanda de agua, donde algunos escenarios particulares fueron seleccionados para el análisis (etiquetados como 1, 2 y 3), donde cada escenario representa una configuración diferente del sistema y de la cadena de suministro.

Tabla 4.2. Solución de los casos de estudio.

Caso	Tiempo de cómputo (s)	SOLUCIÓN OPTIMA
<i>Maximización Mprofit</i>	2426	US\$6.79x10 ⁸ /año
<i>Maximización Wprofit</i>	90.4	US\$6.44 x10 ⁸ /año
<i>Minimización Mwater</i>	244.7	0.639 m ³ /s
<i>Minimización Wwater</i>	27.05	0.016 m ³ /s

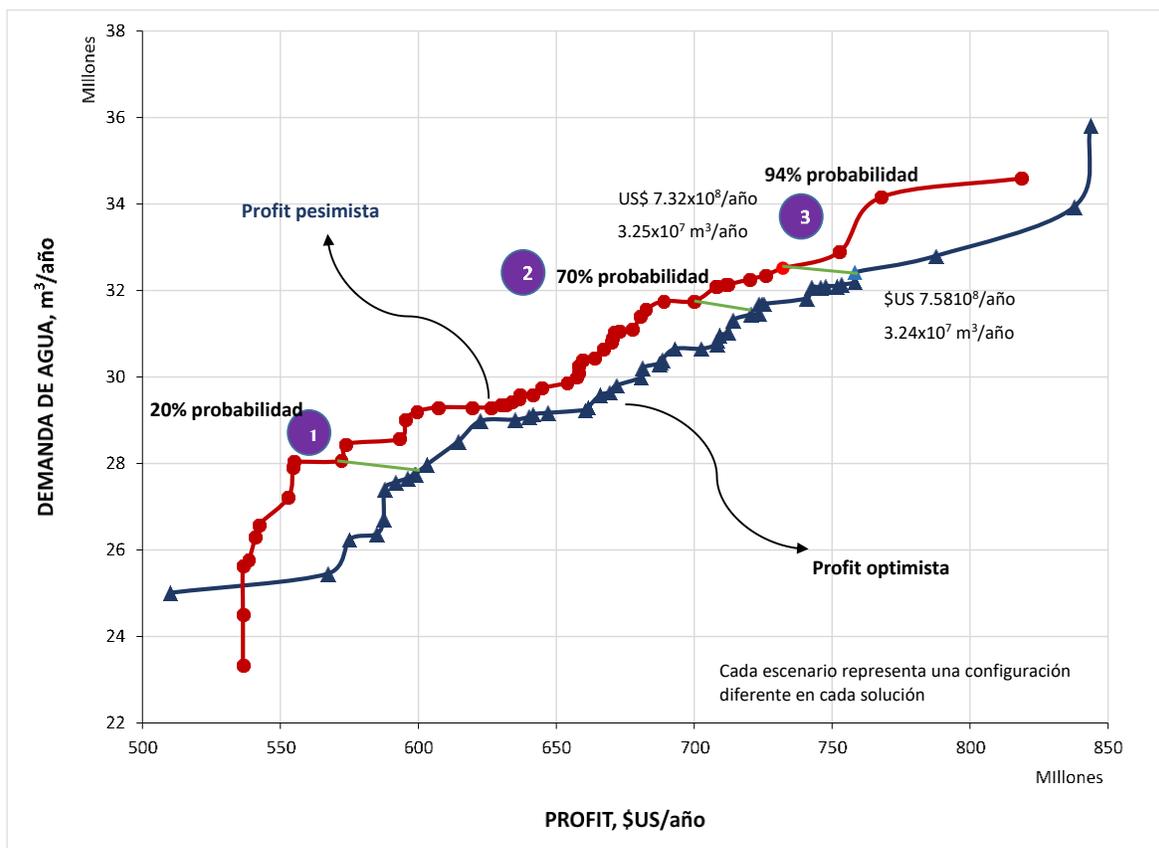


Figura 4.2. Curva de Pareto para la ganancia vs la demanda de agua.

Los detalles de la solución para los puntos antes mencionados se presentan en la Tabla 4.3 en términos de la ganancia en condiciones favorables y pesimistas y de igual manera para el consumo de agua. La relación entre los objetivos económico y ambiental son contrapuestas, ya que por ejemplo en un escenario con unas ganancias más altas el consumo de agua debe ser mayor debido que las ganancias del sistema lo dan la venta de biocombustibles y granos de los cultivos, donde para alcanzar esto se tienen que sembrar grandes áreas por lo que el consumo de agua fresca se incrementará considerablemente provocando gran afectación en la cuenca hidrológica. Por lo que en otras palabras en condiciones económicas pesimistas para el sistema de biorefinación se tiene un daño ambiental menor y lo mismo de manera opuesta, de igual forma materia prima se ajusta a seleccionar cultivos que demanden menor cantidad de agua como la palma de aceite o jatrofa siendo la producción de biodiesel una prioridad.

En la Figura 4.3 se muestra la producción de biocombustibles en cada una de las condiciones propuestas señalando el tipo de residuos de cultivos usados como biomasa. Destacando que cuando el agua se restringe dado una menor producción de cultivos, la producción de biocombustibles disminuye considerablemente y de igual manera las ganancias al sistema. Sin embargo, el impacto ambiental es menor.

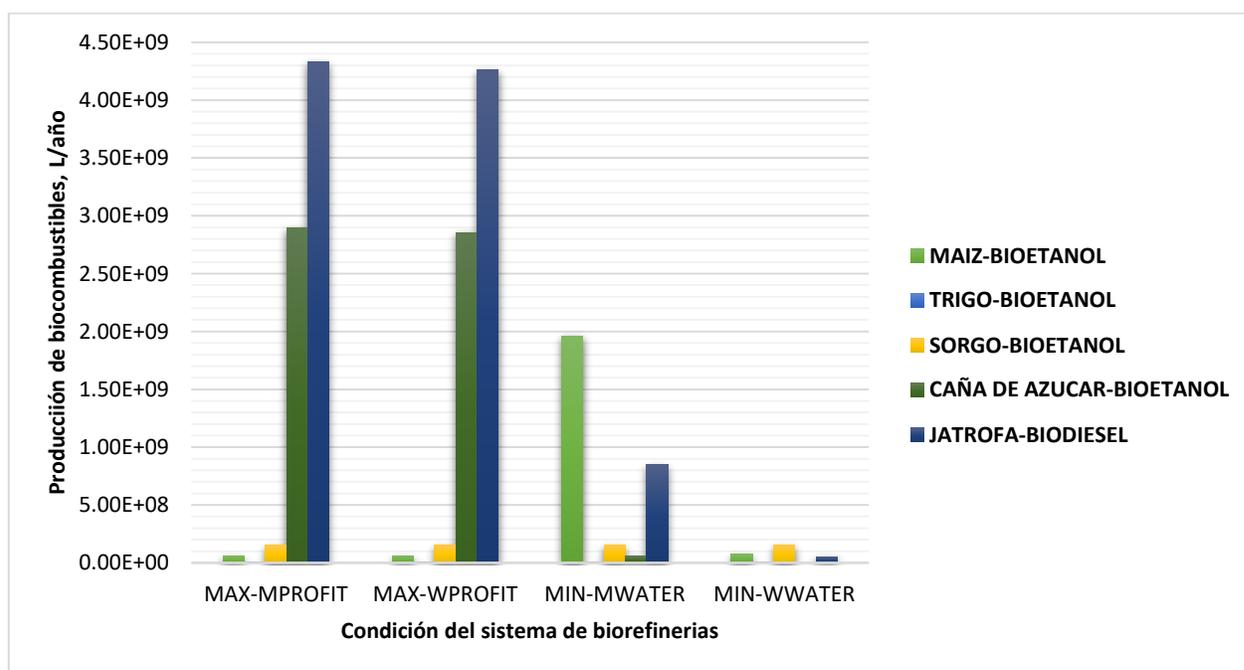


Figura 4.3 Producción de biocombustibles para los casos de estudio en la solución.

Tabla 4.3. Soluciones para los diferentes escenarios.

PUNTO	PROFIT (\$US/año)		DEMANDA DE AGUA (m ³ /año)	
	OPTIMISTA	PESIMISTA	OPTIMISTA	PESIMISTA
1	5.87E ⁸	5.41 x10 ⁸	2.59 x10 ⁷	2.77 x10 ⁷
2	6.87x10 ⁸	6.89 x10 ⁸	2.99 x10 ⁷	3.13 x10 ⁷
3	7.58 x10 ⁸	7.53 x10 ⁸	3.18 x10 ⁷	3.24 x10 ⁷

Debido al comportamiento del sistema presentado en los escenarios que son analizados, el escenario 3 es seleccionado para un análisis más profundo ya que tiene una aproximación estrecha entre las condiciones optimistas y pesimistas en el aspecto económico, en otras palabras las ganancias del sistema en ambas en circunstancias económicas favorables y no para la instalación de un sistema de biorefinación en la región propuesta presentan un diseño y operación muy parecido dado un rango de resiliencia estable.

En las Figuras 4.4 y 4.5 se presentan los esquemas para la distribución de las biorefinerías en la región de estudio, así como los mercados y las rutas de distribución de los productos para satisfacer la demanda. En la solución del escenario 3 en condiciones económicas optimista, se requiere la instalación de 8 biorefinerías para satisfacer la demanda de los mercados obteniéndose una ganancia de US\$ 7.5810⁸/año, un consumo total de agua de 3.18x10⁸ m³/año; para el caso donde el sistema presente un ambiente económico no favorable para dar marcha a un proyecto como el propuesto, la solución establece que la instalación de 7 biorefinerías pueden ser instaladas dando una ganancia de US\$ 7.53x10⁸ /año con un consumo de agua fresca global de 3.24 x10⁷ m³/año.

La siembra y cosecha de los cultivos seleccionados en este caso de estudio delimitan la producción de biocombustibles, en la Figura 4.6 se presenta la producción de biomasa para cada uno de los cultivos señalando en que tramo de río la actividad agrícola se lleva a cabo; para una producción total de biocombustibles de 1.59x10⁸ L/año (6.0859x10⁸ L/año para bioetanol y 9.8659x10⁸ L/año para biodiesel), ver Tabla 4.4.

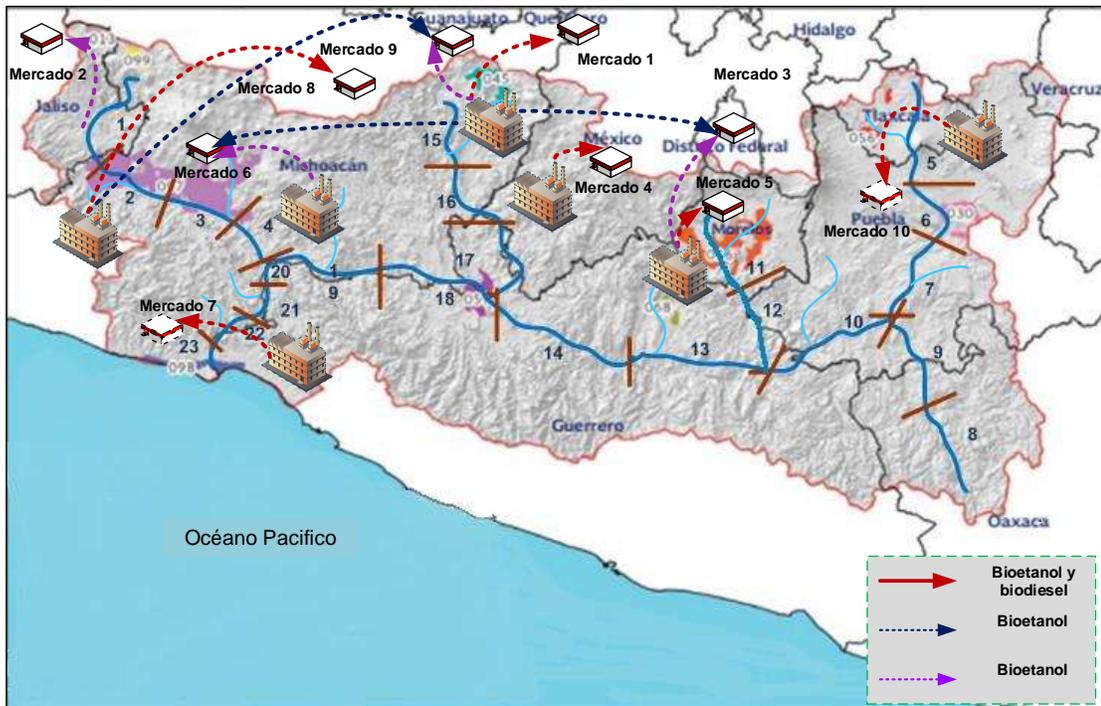


Figura 4.4. Configuración óptima para las condiciones optimistas económicas en el escenario 3.

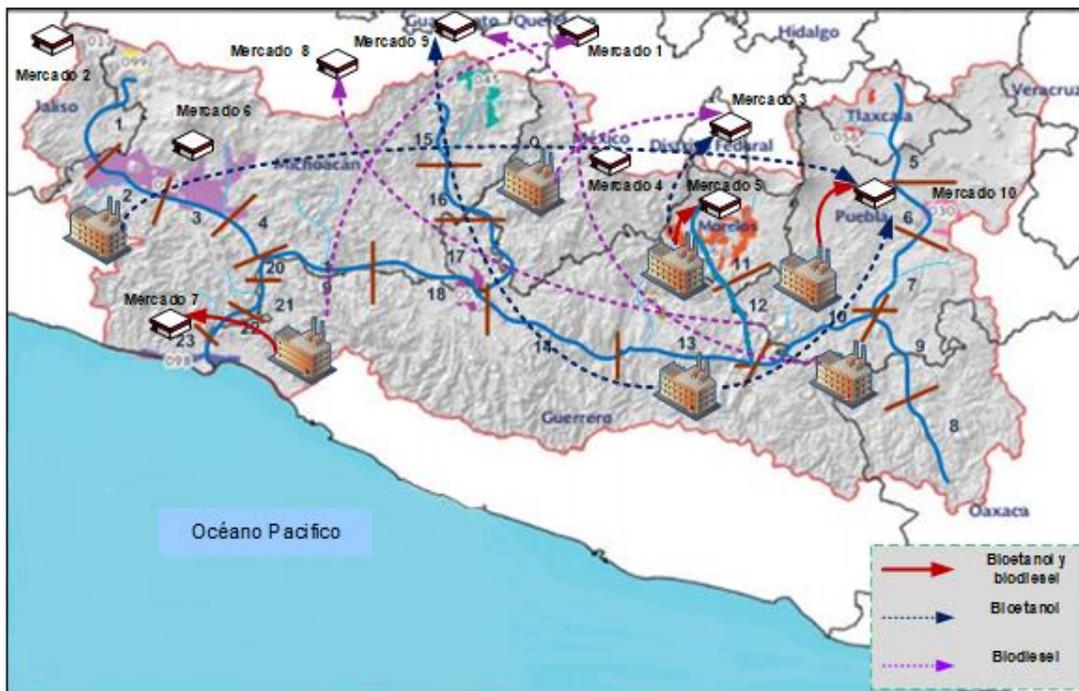


Figura 4.5. Configuración óptima para las condiciones económicas pesimistas para el caso de estudio.

Tabla 4.4. Producción de biocombustibles para la ganancia esperada.

BIOFUEL PRODUCTION	
CROP	(L/año)
Bioetanol	
Maíz	1.26 x10 ⁶
Trigo	1.24 x10 ⁵
Sorgo	3.06 x10 ⁶
Azúcar de caña	5.64 x10 ⁷
Biodiesel	
Jatrofa	9.86 x10 ⁷

Por otra parte, en las Figuras 4.8 y 4.9 se presentan los gráficos para el porcentaje de abastecimiento para cada uno de los mercados. En condiciones económicas optimistas, la cadena de suministros funciona de tal manera que le permite abastecer casi todos los mercados excepto para Guadalajara y León donde en ambos bioetanoles no se destina, y para biodiesel solo cubre cerca del 45% de la demanda que requiere.

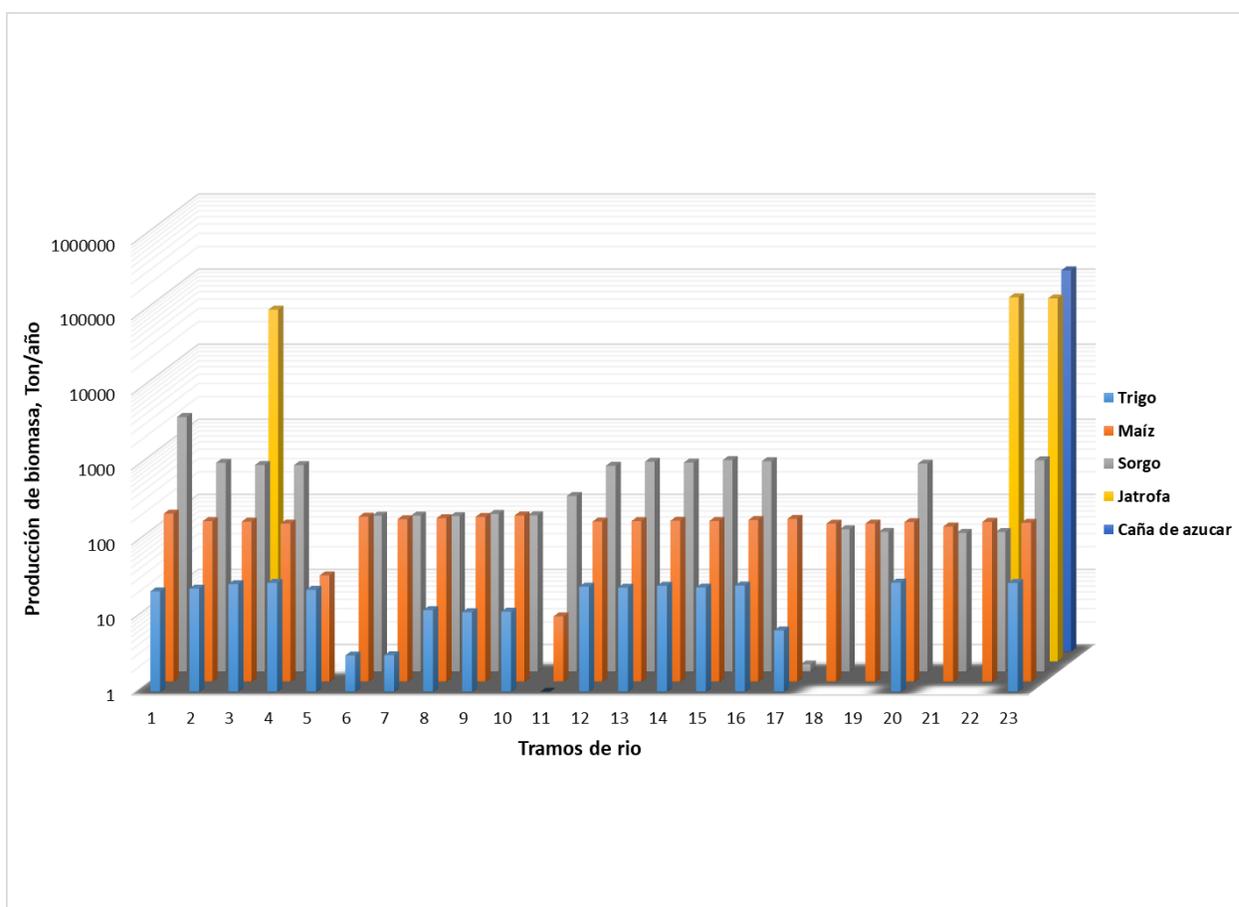


Figura 4.6. Producción de biomasa en la cuenca hidrológica para el sistema en condiciones económicas optimistas.

En la condición opuesta la demanda para bioetanol es cubierta de la siguiente manera: Ciudad de México 53%, Cuernavaca 100%, León 100%, Puebla 100%; para el caso de biodiesel: Querétaro 100%, Ciudad de México 100%, Cuernavaca 100%, Uruapan 100%, León 100% y Puebla 100%. La producción de biocombustibles siendo 1.14×10^6 L/año, donde 5.9059×10^8 L/año en producción de bioetanol y 8.8859×10^8 L/año (ver tabla 4.4). En tanto, la producción de biomasa se presenta en la Figura 4.7, puede destacarse que en comparativa de ambas soluciones que en condiciones económicas pesimistas la producción de biodiesel es mayor, esto representa principalmente un incremento en la producción de residuos agrícolas de jatrofa para la producción de bioetanol; y la localización de las áreas de cultivo para la jatrofa se ubican en el tramo 3 (44,695 Ton/año), 22 (82,060 Ton/año) y 23 (74,165 Ton/año).

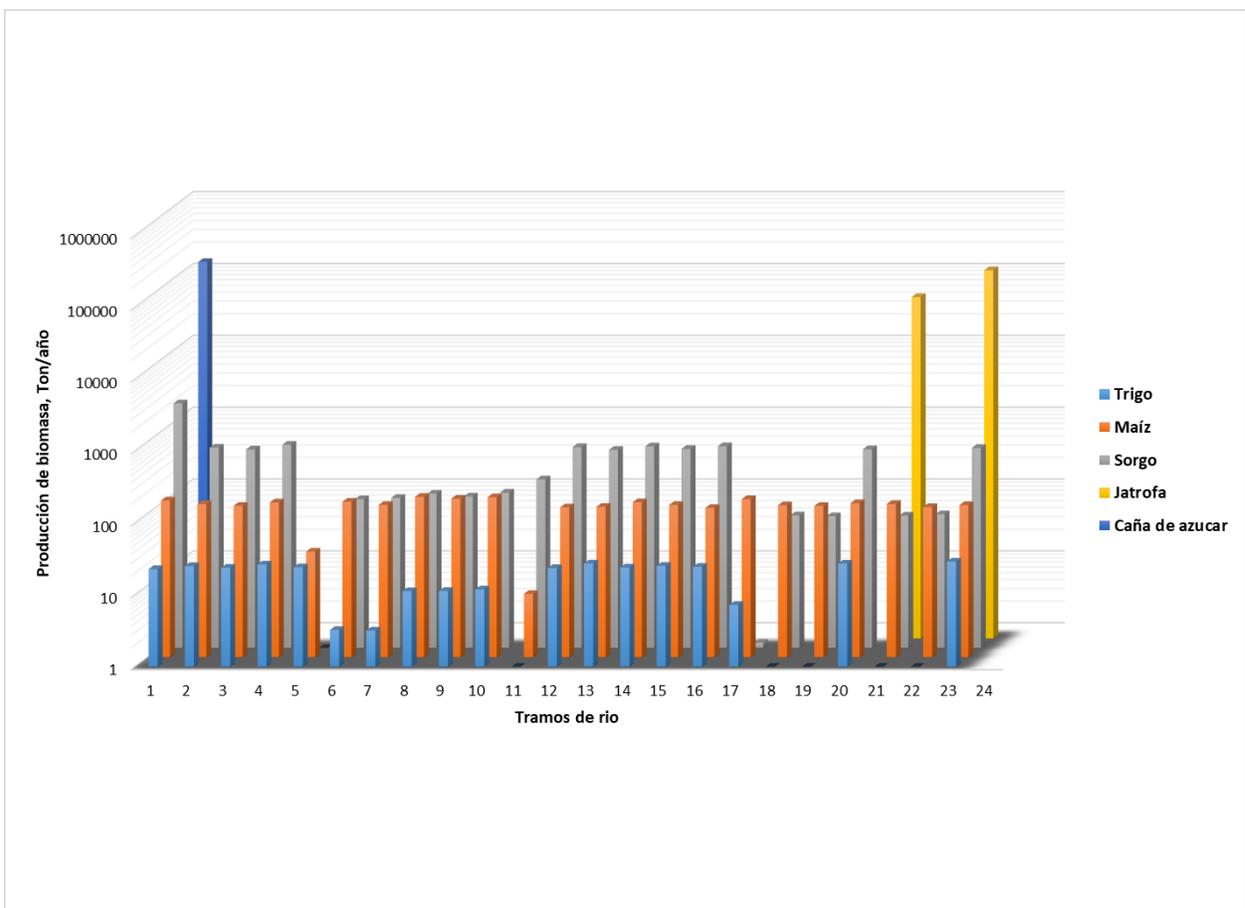


Figura 4.7. Producción de biomasa en la cuenca hidrológica para el sistema en condiciones económicas pesimistas.

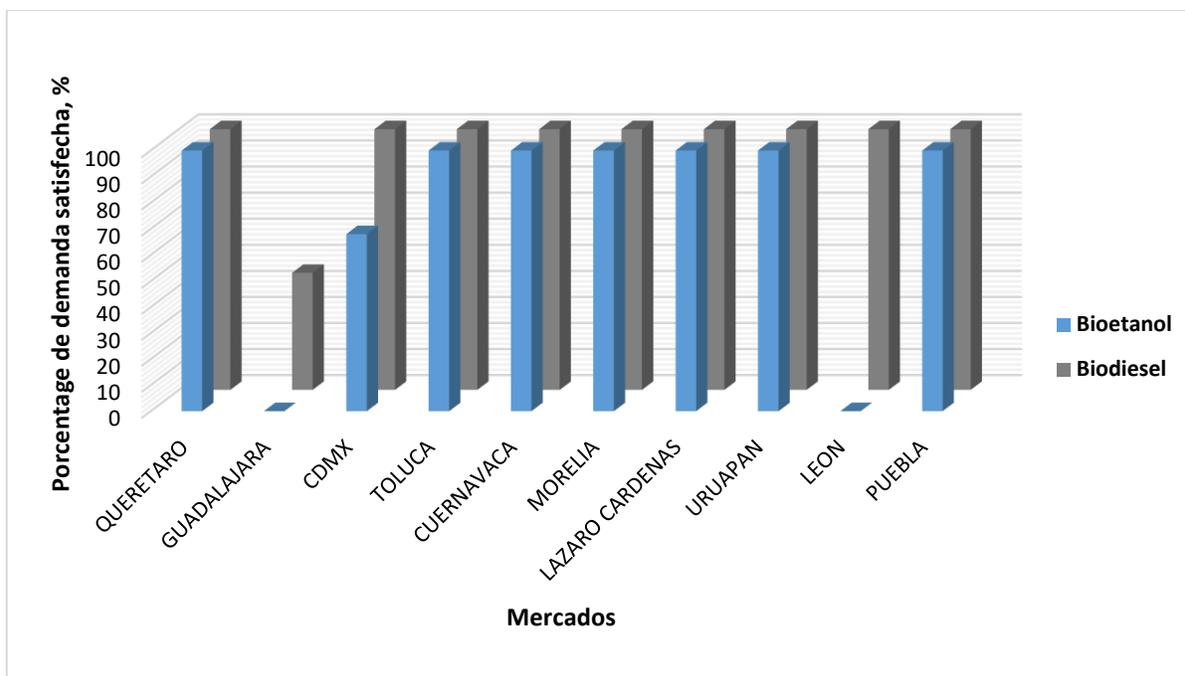


Figura 4.8. Demanda satisfecha de biocombustibles para la ganancia esperada en el escenario optimista.

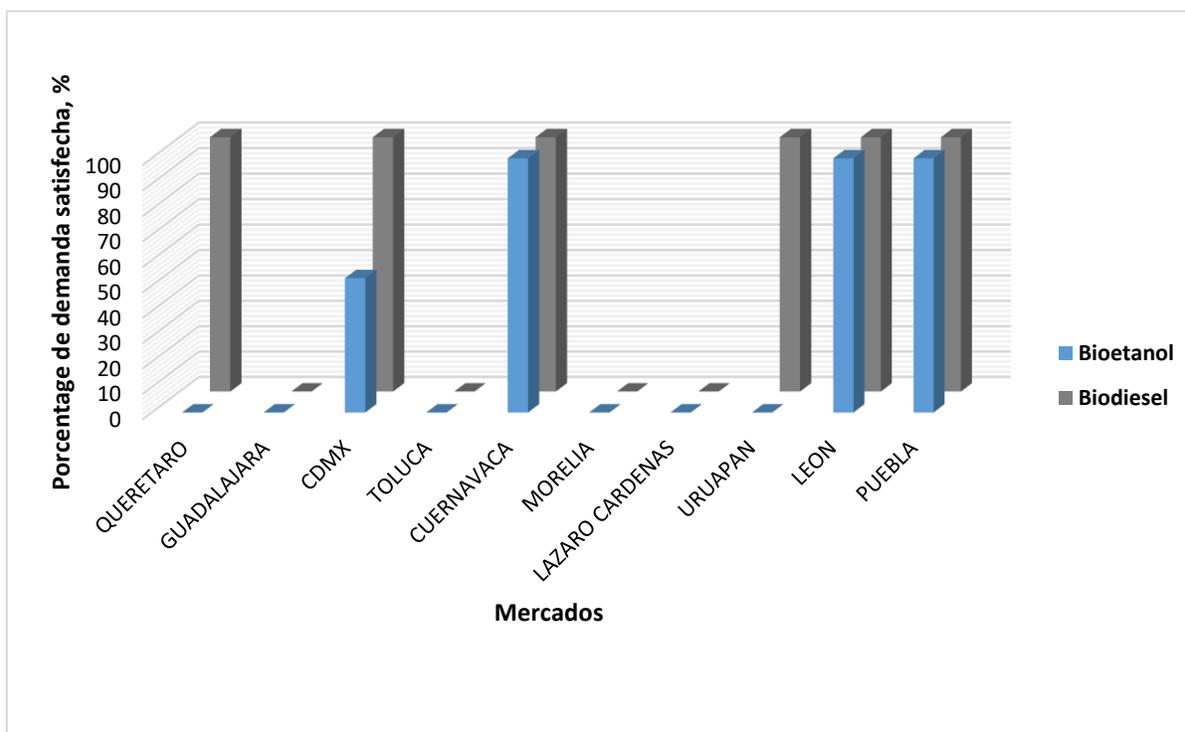


Figura 4.9. Demanda satisfecha de biocombustibles para la ganancia esperada en el escenario pesimista.

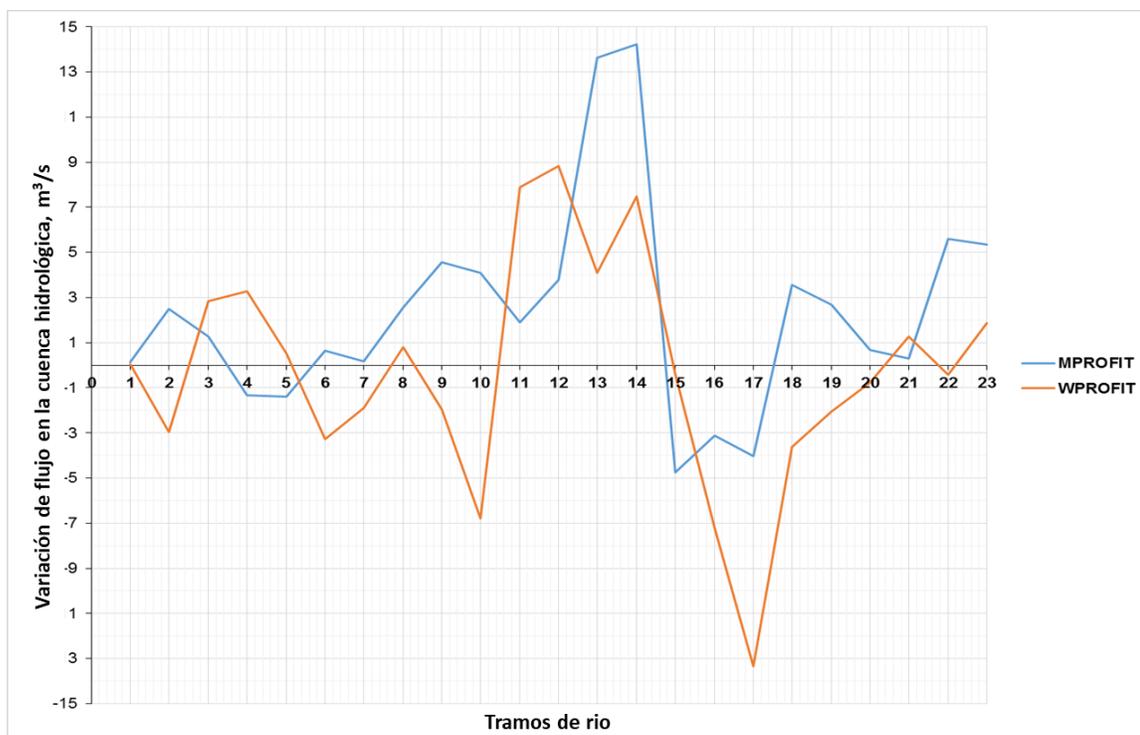


Figura 4.10. Comparación del flujo de agua en condiciones económicas optimistas.

Es de notarse, que las soluciones muestran la condición de la cuenca hidrológica como consecuencia del consumo de agua fresca y la descarga de efluentes se presenta en la Figura 4.10. Específicamente, en la solución correspondiente al mejor de los escenarios en condiciones optimistas, el tramo 15 posee una disminución del flujo de la cuenca (cerca de 5 m³/s), debido a operación cerca de biorefinerías y la actividad agrícola asociada. Y en el caso de la optimización del peor de los escenarios el tramo con mayor afectación se presenta en el tramo 17 con una disminución en el flujo de 13 m³/s, ya que una planta de gran capacidad es instalada en un tramo anterior.

En ese tenor, en la Figura 4.11 se grafica la probabilidad acumulada para los 50 escenarios contra la ganancia. Aquí, la solución del escenario donde su ocurrencia es del 70% de presentan ganancias menores a US\$ 6.72 x10⁸ /año, llegando a alcanzar ganancias de **US\$ 7.2 x10⁸ /año** (incremento del 7.14%); si se compara con la curva para el consumo de agua no se presenta una diferencia considerable. Esto quiere decir, que si se quiere abastecer la demanda de biocombustibles propuesto se debe incrementar el área de cultivo. Por ejemplo, para la anterior solución se requiere

incrementar 34,224 ha de maíz, 0.187 ha de trigo, 55.47 ha de caña de azúcar y 3,268 ha de palma de aceite.

Por último, en el Figura 4.12 se grafican las emisiones de CO₂ para todos los escenarios, el cálculo de este término se realizó en base a la producción de emisiones de efecto invernadero por la actividad industrial asociada a las etapas de producción en la generación de combustibles, así como a transporte de materias primas y biocombustibles a los sitios de procesamiento y mercados respectivamente. Es de mencionar que el comportamiento de la producción de emisiones es directamente proporcional a la cantidad de biorefinerías que se instalen.

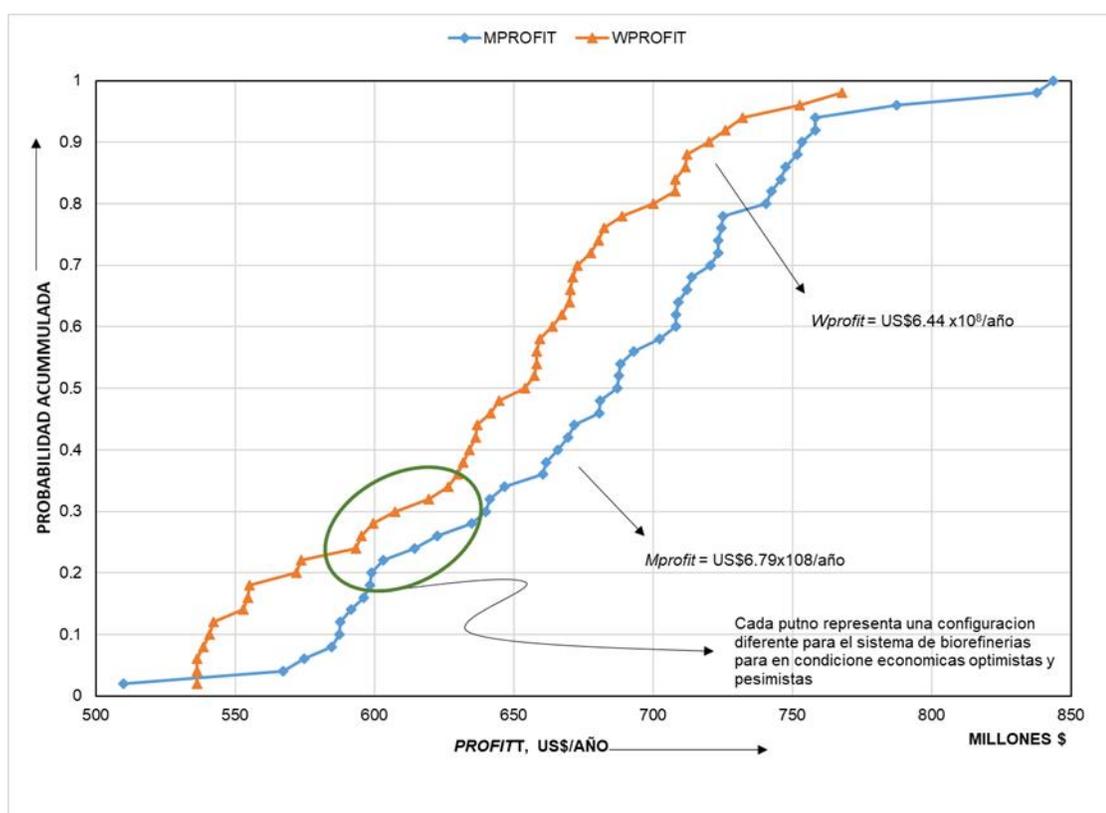


Figura 4.11. Curva de probabilidad acumulada vs ganancia.

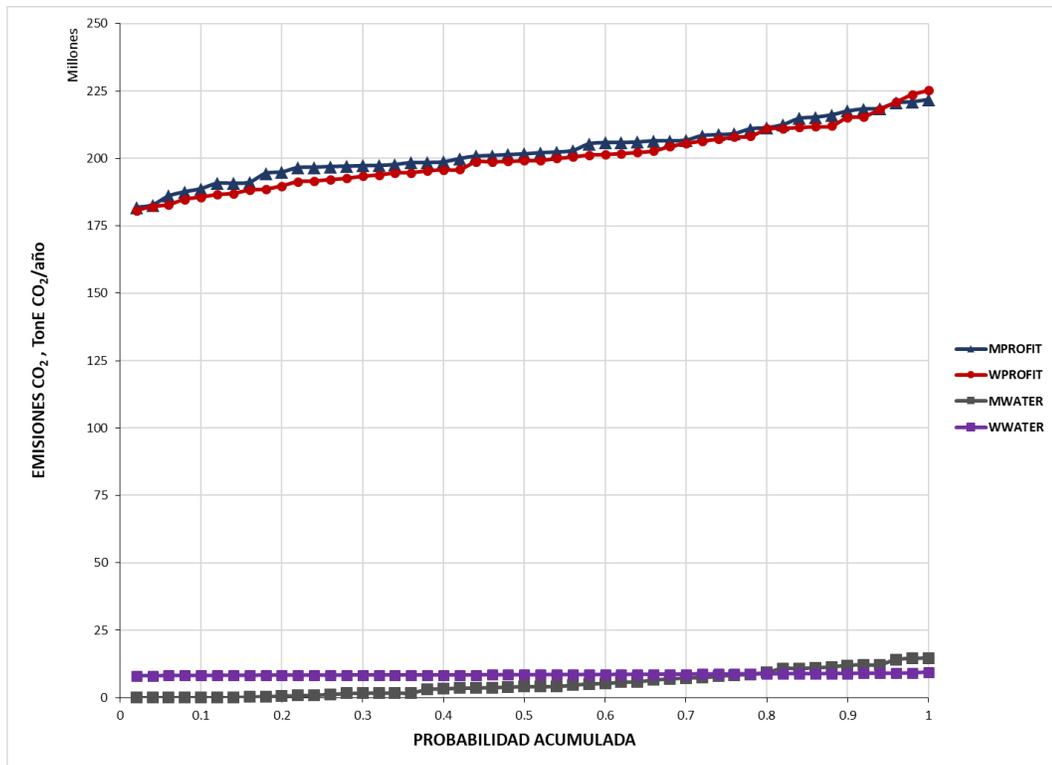


Figura 4.12. Probabilidad acumulada de emisiones de efecto invernadero en la solución de los escenarios.

4.2 Análisis de resultados del balance de fósforo en el nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente

La problemática que se propone resolver con el modelo matemático en la sección 3.2 se define en el siguiente caso de estudio:

Caso de estudio

El sector lácteo en los Estados Unidos es una industria con gran repercusión en la economía y desarrollo en las regiones con gran actividad. Actualmente, Wisconsin se ubica como el estado con mayor producción de queso (2.8 mil millones lb/año) y el segundo en leche (29 mil millones lb/año) ^[36]. La inclusión de esta actividad productiva tiene tal relevancia que gran parte de la población tiene gran parte de identidad cultural alrededor de este sector como de igual manera ocurren en otras partes alrededor del mundo. La industria del sector lácteo, al igual que otras grandes actividades productivas tiene un impacto ambiental y económico relevante en la región de asentamiento liderado principalmente debido al consumo de grandes cantidades de recursos. El crecimiento del sector lácteo está ligado principalmente a la alta demanda de productos lácteos por el cambio de regímenes alimenticios que han estado cambiando durante los últimos años. Para tener un esquema más amplio, el estado de Wisconsin posee una población de 1.28 millones de cabezas de ganado ^[37], donde el rendimiento de producción de leche por unidad es de aproximadamente 10,367 litros de leche anualmente.

Los requerimientos de fósforo a lo largo de la cadena se establecen de acuerdo en la demanda de cada uno de los sectores y la disponibilidad de aquellos que pueden proporcionar el nutriente, en la Figura 4.13 se presenta el balance de fósforo del caso de estudio base en las condiciones actuales para el nexo para el estado de Wisconsin. Los parámetros requeridos en el caso de estudio, como son: la población de ganado, población urbana, rendimientos del suelo para la producción de cultivos que son empleados como alimento tanto para el ganado lechero como urbano, disponibilidad de roca fosfórica de las reservas, rendimiento del suelo para absorción de fósforo, rendimiento de etapas de tratamiento de cultivos, demanda de productos lácteos para el sector urbano estatal, demanda externa de productos lácteos, demanda de productos agrícolas por el sector urbano, demanda externa de productos agrícola, rendimiento de las unidades de tratamiento de residuos y fluctuación de los precios de las materias primas, nutrientes, y productos se presentan en el apéndice.

Por otra parte, en el sector minero el 90% del total de la roca fosfórica extraída es destinada a satisfacer al sector químico para la producción de fertilizantes (al sector agrícola) y aditivos (al sector lácteo)^[38]. Debido al agresivo proceso de extracción se presentan pérdidas de roca fosfórica, presentando un rango del 9% de la extracción total^[39]. En cuanto al sector agrícola, dentro del nexo este tiene la función principal de abastecer de los cultivos necesarios que se requieren como alimento en las granjas, así como de los que se demandan en el sector urbano. En las granjas, para el ganado se propone una dieta conformada de aproximadamente 60% forraje (principalmente de maíz y pastura) y 40% en concentrado (preparado con granos de cereales) para términos prácticos. Las pérdidas en este sector están estimadas en 13% del P total que entra al sector debido a las condiciones y la eficiencia de aprovechamiento del nutriente en el suelo de cultivo, en las etapas de tratamiento de cultivos las pérdidas se calculan en 9%^[40].

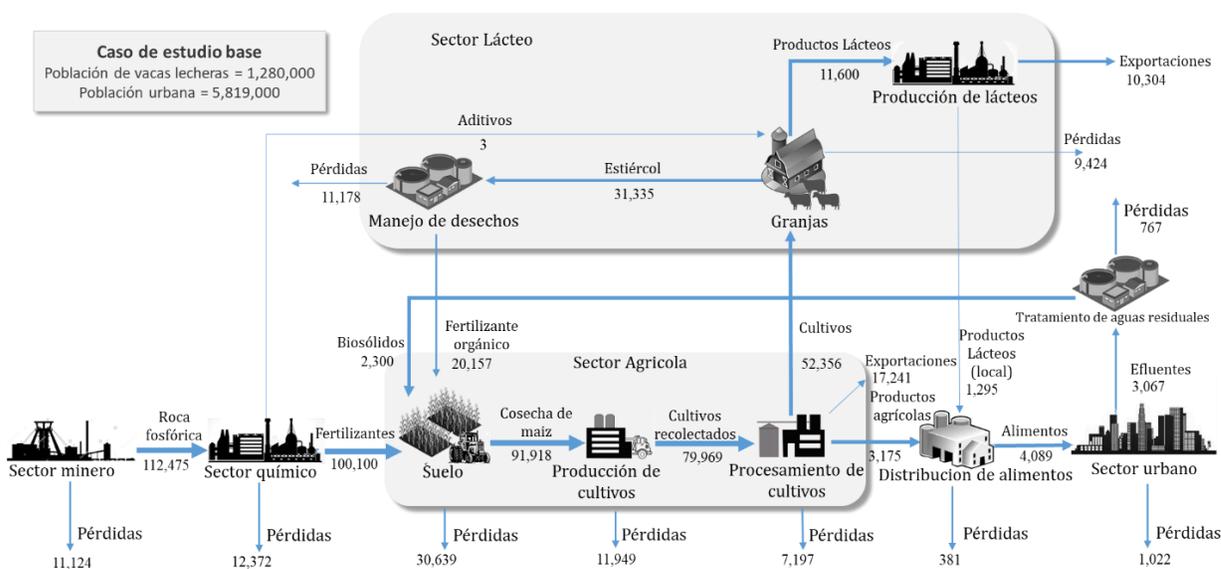


Figura 4.13. Flujo de fósforo en el caso de estudio base.

En torno al sector urbano se considera a la población del estado de Wisconsin, siendo de 5,819,000 ha en 2018^[41]. El servicio estadístico nacional de agricultura (US-NASS) da a conocer que el rango de consumo por habitante es de 67.682 L/año para leche y 79.1 lb/año para consumo de queso. Por lo que la demanda total de leche es de 3.938×10^8 L/año, sin embargo, la producción total de este estado en el mismo año fue de 1.326×10^{10} L/año.

En otras palabras, la demanda representa cerca del 3% de la producción total por lo que el resto es destinado a exportación (alrededor del 90%) o a la producción de queso. Para el año 2017, la producción de queso en Wisconsin fue de 1.008×10^5 Ton/año cubriendo la demanda interna (que equivale al 7% del total), lo que indica que el 93% fue exportado ^[42]. Se considera en este modelo que una vez que la población consume los alimentos que se abastecen se metabolizan excretando luego mediante orina y heces al fósforo en concentraciones de 21-270 mg/L en los efluentes urbanos ^[43]. Gran parte de estos efluentes son procesados en plantas de tratamiento de aguas, considerando lodos activados para degradar el material orgánico. Debido a eso los lodos producidos tienen alto contenido de nutrientes, mientras se les aplique el tratamiento adecuado pueden ser utilizados como fertilizantes, según reportes en sistemas urbanos integrados el 75% de estos lodos son destinados para este fin ^[44].

Respecto al sector lácteo, cada vaca lechera produce 10,367 litros de leche anualmente ^[45]. Cada litro de leche contiene 0.958 g de P ^[46] (11,600 ton P/año), donde el 90% de la producción total es procesado en queso ^[47]. El contenido de P en el queso es de 7.806 g por kg ^[46]. El sector exporta un estimado de 88% de la producción total de lácteos (10,304 Ton P) ^[48], el resto se consume internamente (1,265 Ton P). En las granjas, la problemática principal asociada a la gran producción de leche es la producción de estiércol, con una producción anual de 12 Ton por cabeza de ganado ^[49], con una concentración de 1.45 g de P por Ton de estiércol ^[50], dando un total de 312,335 Ton P/año. En cuanto al manejo de residuos del sector lácteo, se trata este residuo para producir fertilizante orgánico, las pérdidas por este tratamiento se estiman en 11,178 Ton P, correspondiendo a un rango de recuperación del reúso del nutriente de 65%. Resultado que el fertilizante orgánico producido a partir del estiércol equivale al 10% de la demanda de fósforo como fertilizante químico; por lo que el reúso de estiércol en mayor medida puede reducir considerablemente el uso de este tipo de fertilizante en el sistema teniendo gran repercusión tanto ambiental como económica. La entrada de tal nutriente al sector alimentario es de 4,470 Ton P/año donde 381 Ton P son pérdidas por cuestiones de manejo y transporte para la distribución. Nótese que este valor está dado en dos órdenes de magnitud menor que para el sector agrícola o lácteo, esto se debe a que la demanda de cultivo de maíz por los residentes es mucho menor que la demanda de las granjas. Un total de 4,089 Ton P es enviado al sector urbano como alimentos y 3,067 Ton P al sector de manejo de residuos urbanos, aquí 2,300 Ton P presentes en lodo enriquecido es enviado

al sector agrícola como fertilizantes; mientras que 767 Ton P es vertido al medio ambiente como efluente de desecho de este sector.

En base a lo anterior en el modelo propuesto se consideran restricciones en base a las cuencas hidrológicas más importantes y el impacto que tendría por el vertido de los efluentes del sistema. Para este caso de estudio, se considera el lago Monona en Madison, Wisconsin debido a sus graves problemas de eutrofización que según recientes estudios es debido a la gran concentración de P por la actividad del sector agrícola. Reportes han permitido estimar una concentración de riesgo para eutrofización de 200 ppm por lo que los efluentes totales del sistema tendrían que ser menores para no producir una afectación ambiental en este cuerpo hídrico ^[51], asumiendo que una concentración cero inicial de P, la descarga total de P debe ser de 22,000 Ton P en un año considerando un volumen del lago de 1.1×10^{11} L ^[52]. Obviamente, la concentración de P en los lagos no es cero y el riesgo para eutrofización podría ser menor a la indicada en este estudio. Además, que la concentración del nutriente con el tiempo va disminuyendo por degradación natural, aun es peligroso para el ecosistema tener estos grados de P en el agua.

Impacto del sistema a las externalidades

Como se observa en el caso de estudio base, la demanda de cultivos para las granjas lácteas tiene gran impacto en la operación global del nexo ya que delimita la operación del sector minero, agrícola e interviene en los rendimientos totales del sector. Otros factores son la población urbana, el área disponible de cultivo, y el adecuado manejo de nutrientes a lo largo de la cadena de suministro del nexo. Para tener un estudio más detallado, se proponen los escenarios A, B, C, D, E y F basados en fluctuaciones en las condiciones de operación y condiciones del mercado. A continuación, se especifican y se presentan los resultados para cada uno:

En el caso A (ver Figura 4.14), se prueba el impacto de la población urbana en todo el nexo. De acuerdo con el censo de la población en 2010 era de 5, 690,000 habitantes, mientras que para el 2018 corresponde a 5, 819,000 habitantes, lo cual representa un rango de crecimiento de 0.31% en el período mencionado. Basado en datos históricos y asumiendo un rango de crecimiento constante para el año 2050 se estima una población de 6,416,000 habitantes, en la Figura 4.14 se presenta el flujo de fósforo (P) para esta población, manteniendo los demás parámetros fijos. Puede observarse que a pesar de que la población urbana delimita la demanda de los productos lácteos y agrícolas, el balance de P muestra que las pérdidas del nexo no presentan una diferencia significativa

con el caso de estudio base. Esto se debe a que los requerimientos de P por la población urbana en la región son mucho menores a la que demanda el sector lácteo en las granjas (donde el mayor flujo de P se encuentra en los productos lácteos que se exportan que a los que pertenecen en el nexo).

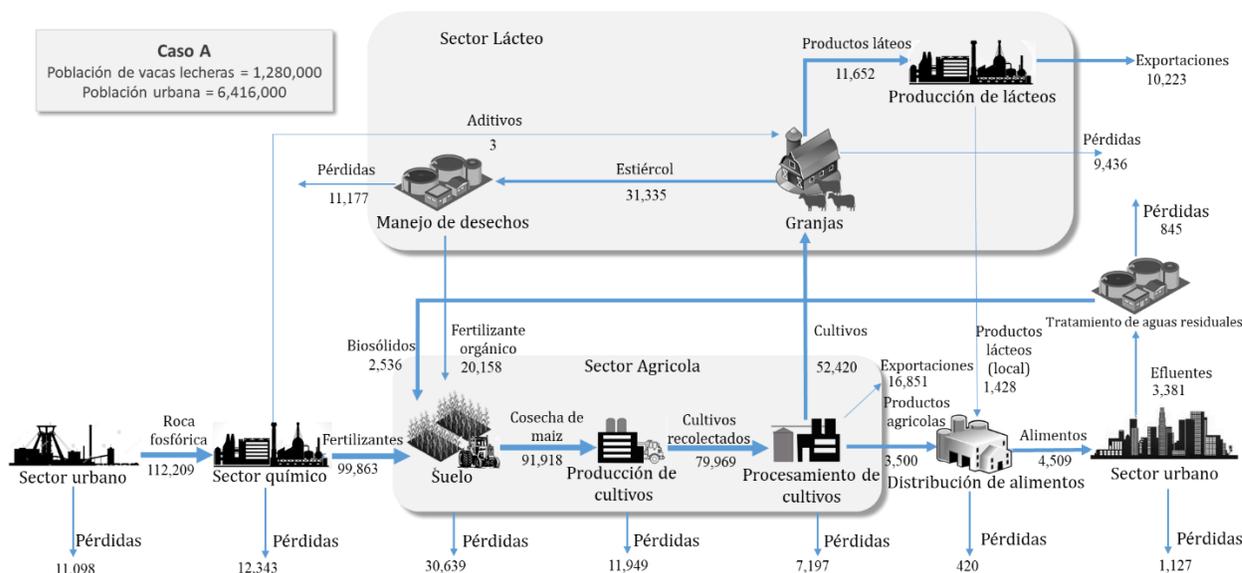


Figura 4.14. Flujo de fósforo en el caso A.

En los casos B y C cuyas soluciones corresponden a las Figuras 4.15 y 4.16, se comparó el comportamiento del sistema para fluctuaciones en el crecimiento de la población de ganado del sector lácteo. Es de mencionarse que, en los Estados Unidos de América, el departamento de agricultura tiene un seguimiento de la población de vacas lecheras dado la importancia de esta actividad en la región. En el caso B, se usa el rango de crecimiento poblacional de 0.14% anual; mientras que en el caso C se utiliza la tendencia de crecimiento más reciente de 0.39%. La población correspondiente con proyección para el año 2050 sería de 1, 339,000 habitantes y 1, 124,000 habitantes respectivamente. Tales resultados se presentan en las Figuras 4.15 y 4.16. Particularmente para el caso B, los resultados muestran que la demanda de productos agrícolas se incrementa a la hora de satisfacer los requerimientos del ganado, mientras que la exportación de productos agrícolas disminuye. Teniendo una población de ganado mayor, la producción de leche y queso incrementa en la misma proporción. En este caso, se asume que los granjeros continúan aplicando las estrategias de manejo de residuos orgánicos (estiércol); el rango de recuperación de

fósforo por el aprovechamiento adecuado del estiércol permite la reducción de fertilizante químico en un 1%. En tanto que para el caso C, el sistema tiende a tener un comportamiento inverso. En otras palabras, la demanda de cultivos disminuye considerablemente y por consecuencia manteniéndose una producción constante se puede tener una exportación de productos agrícolas mayor (representa un incremento de 36.5%). Con una población menor de ganado, la producción de leche disminuye por lo que, satisfaciendo la demanda local, las exportaciones tienden a disminuir en 13%. A su vez, la producción de estiércol de igual manera disminuye por lo que los requerimientos de P se satisfacen de mayor medida por fertilizantes sintetizados para mantener la eficiencia en el sector agrícola.

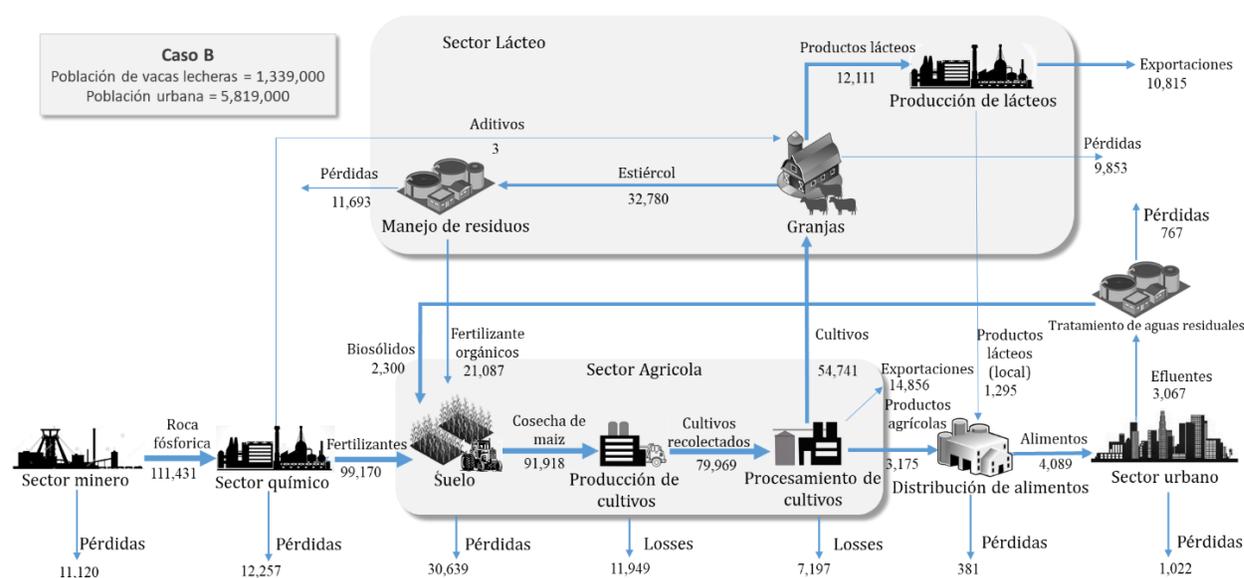


Figura 4.15. Flujo de fósforo en el caso B.

Para el caso D, el impacto de la activada agrícola en el nexo es analizado. En Wisconsin, el área cultivada ha disminuido las últimas dos décadas. En el año 2002, el área cubierta era de 15, 742,000 acres, y para el año 2012 cubría solamente 14, 569,000 acres. Se calculó el rango anual de reducción, siendo -0.76% basado en datos históricos. Si este rango se mantiene constante para los próximos años, para el año 2050 se tendrá un área destinada al cultivo de maíz de 10, 906,000 acres (78.36% del área actual).

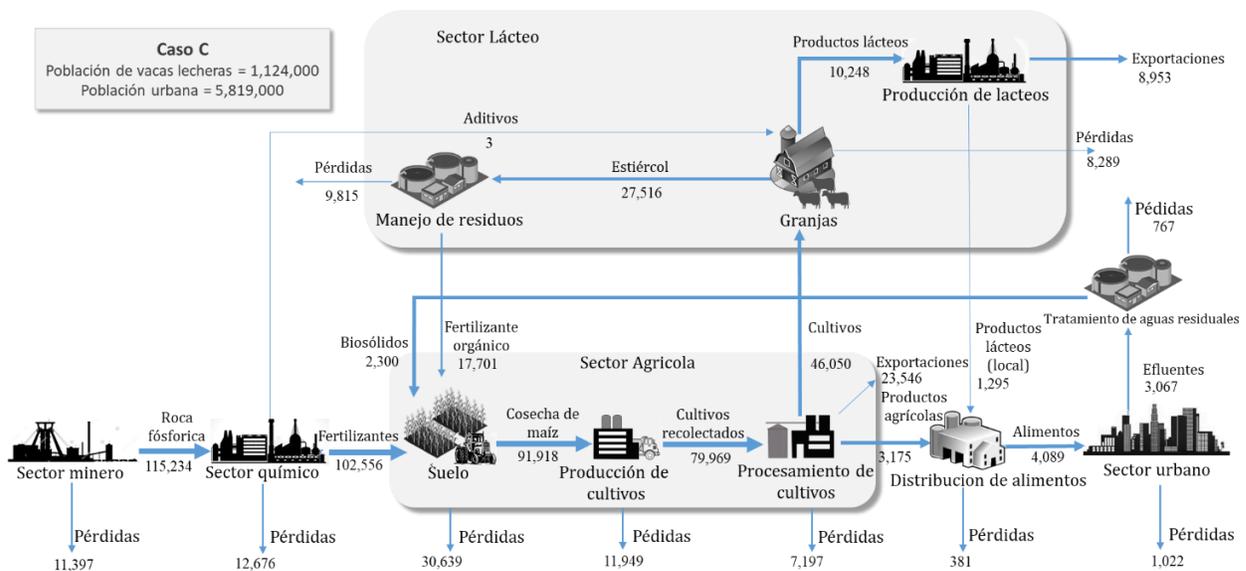


Figura 4.16. Flujo de fósforo en el caso C.

El flujo de fósforo del nexo para este caso de estudio se presenta en la Figura 4.17. Con un área menor de cultivo, los requerimientos de fósforo tienen el mismo comportamiento y la producción de fertilizante químico disminuye en 26%. La solución muestra un rango de exportación positiva, lo cual muestra que aún con la reducción en el área de cultivo, se puede satisfacer la demanda de alimentos del ganado en las granjas permitiendo producir lácteos para cumplir con la demanda local (ver Figura 4.17).

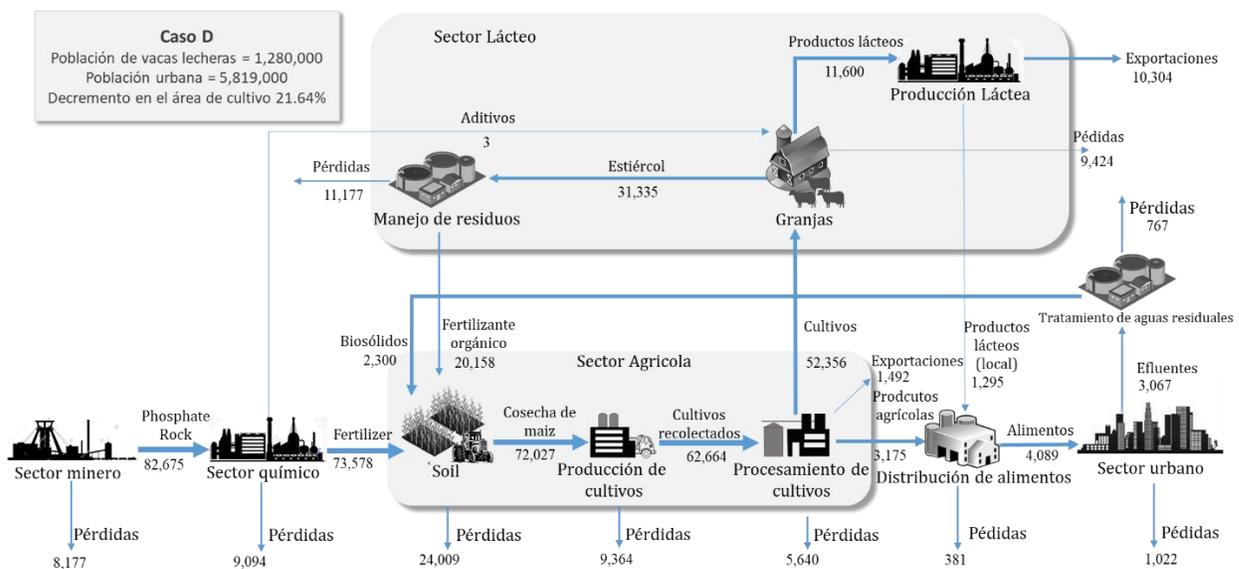


Figura 4.17. Flujo de fósforo en el caso D.

En los casos E y F, se analizó las prácticas de reciclaje de nutrientes que permite el desarrollo y despliegue de las tecnologías. Especialmente en el caso E, se supone que todo el estiércol producido es reciclado y reusado en el suelo de cultivo, y en el caso F se considera que todos los residuos de la cosecha de maíz no pueden ser utilizados al propósito del nexo y son procesados para producir *biochar* que es regresado al campo de cultivo. Aunque los dos casos no son realistas, este análisis es interesante para estudiar el comportamiento del nexo en condiciones extremas. Los resultados de estos escenarios se muestran en las Figuras 4.18 y 4.19. Para ambos escenarios, la aplicación de estas prácticas de recuperación de fósforo reduce el consumo de fósforo del exterior en 11%. En la Figura 4.19 se presentan las ganancias del nexo (donde se consideran los costos y ganancias por la utilización de materias primas y productos que contienen fósforo). En la Figura 4.20 se ilustran las pérdidas globales del nexo para cada uno de los escenarios analizados (se consideran todas las corrientes que se descargan al medio ambiente a lo largo de toda la cadena de suministro).

Los ingresos del sistema alcanzan más de 10 mil millones de dólares al año, destacando el enorme impacto del fósforo (P) en el nexo Agua-Lácteo-Medio ambiente planteado. También se destaca que el sector lácteo contribuye económicamente en mayor medida (en todos los casos), mientras que el sector agrícola tiene mayor relevancia en el balance de P. Esto quiere decir que, si el sector agrícola posee un rango de eficiencia de fósforo bajo, la alta demanda de fertilizantes que se necesitará hará que el sistema incremente sus gastos para compensarlo. El sector urbano estimula el crecimiento económico, ya que un crecimiento en la población aumenta la demanda interna de alimentos. Por lo que la mejor estrategia sería una combinación de mejora en el manejo de nutrientes y el incremento de productos lácteos en la dieta de la población para generar mayores ganancias económicas y tener un menor impacto ambiental.

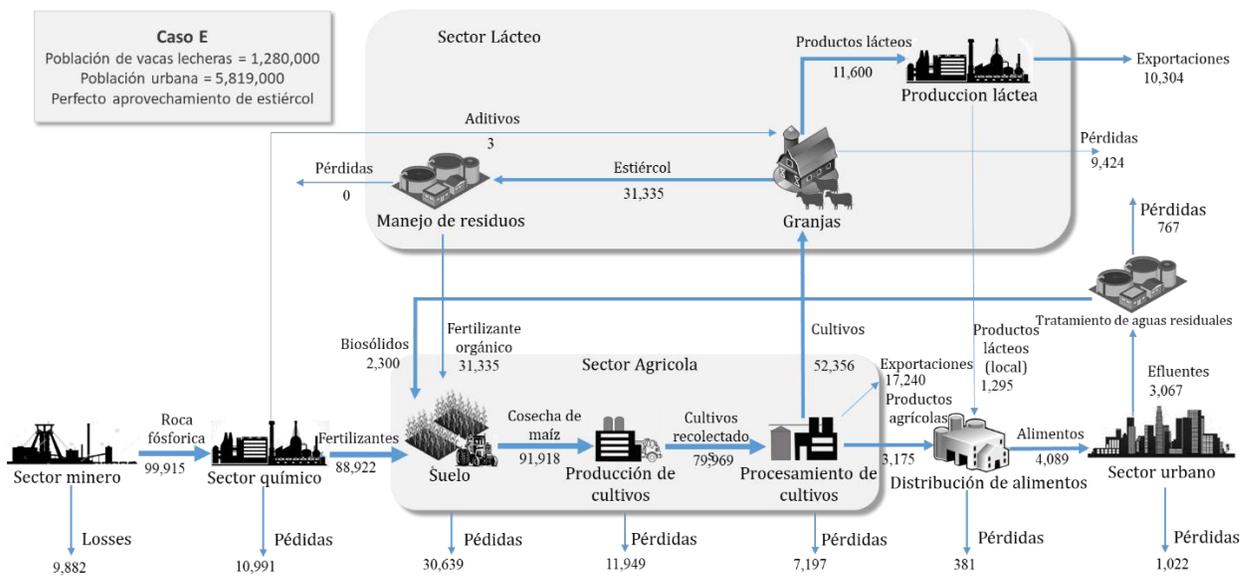


Figura 4.18. Flujo de fósforo en el caso E.

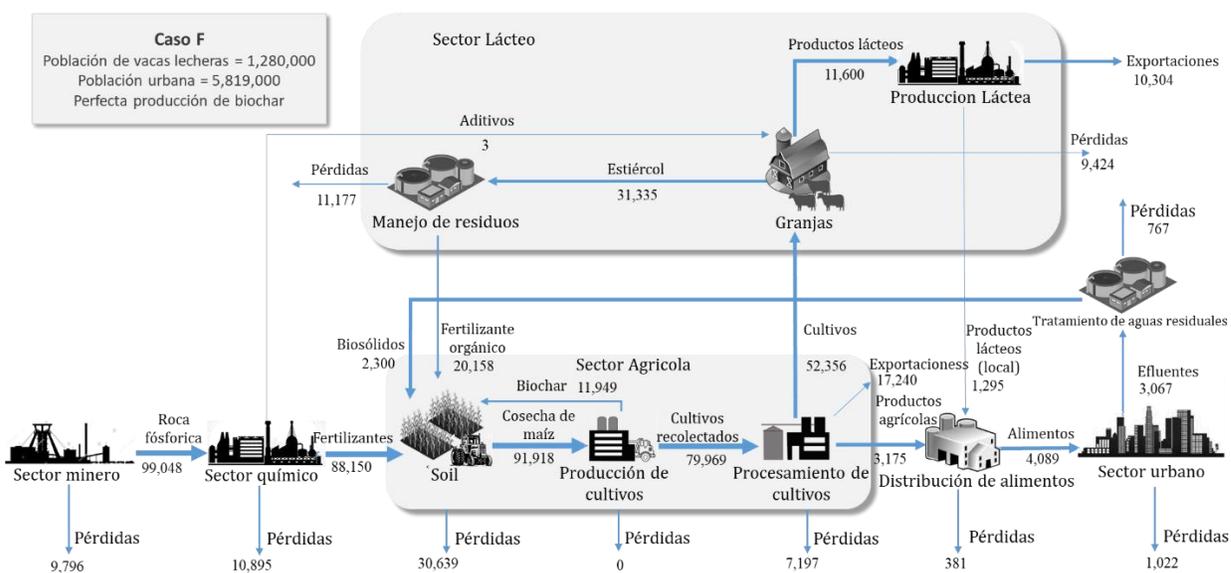


Figura 4.19. Flujo de fósforo en el caso F.

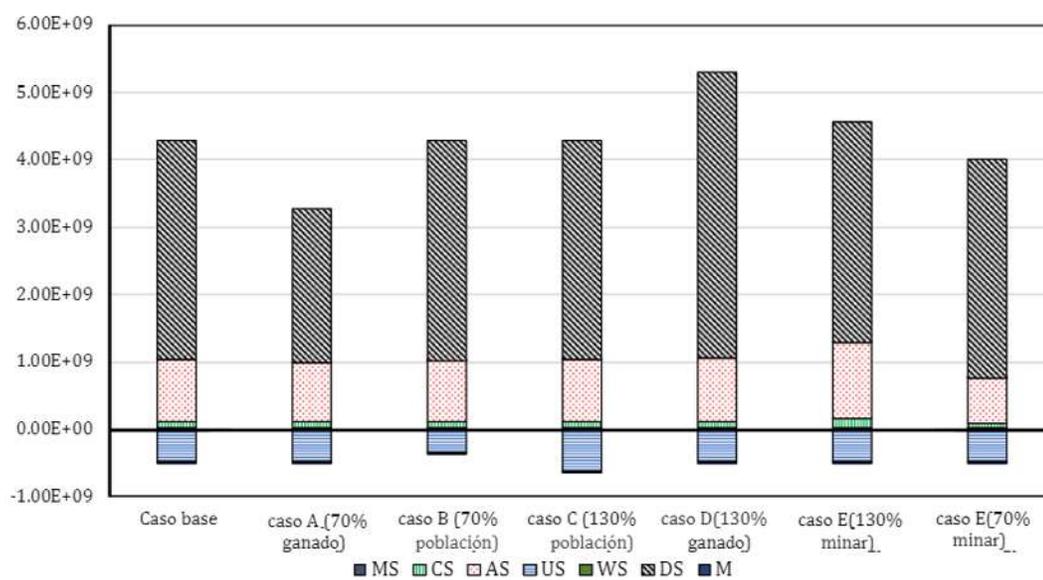


Figura 4.20. Ganancia para todos los casos (USD/año).

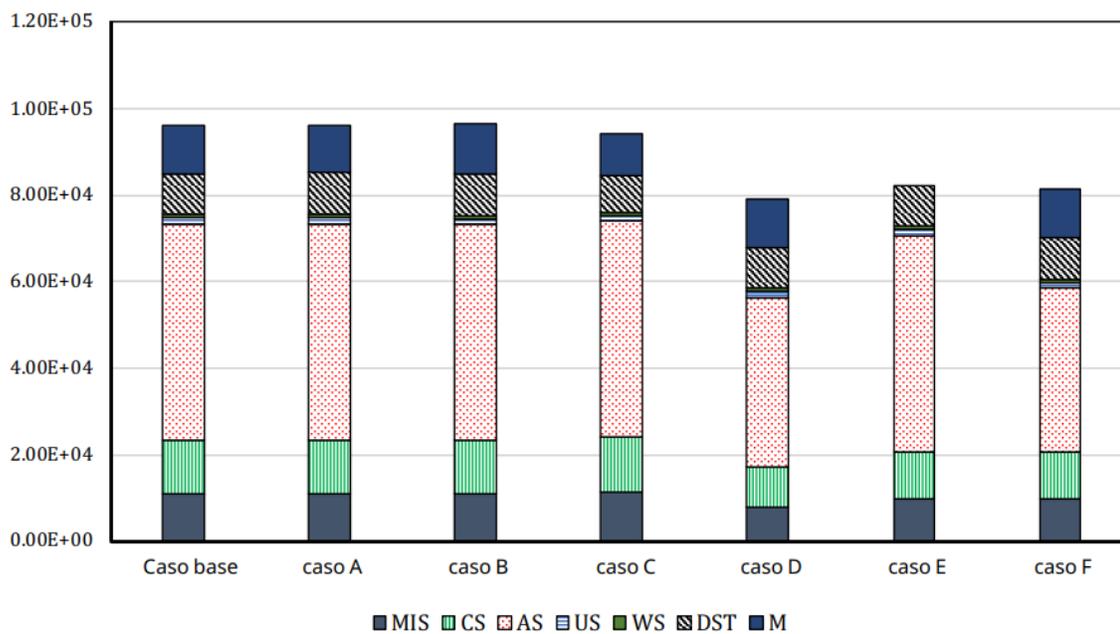


Figura 4.21. Pérdidas de fósforo para todos los casos (Ton P/año).

Conclusiones

Debido al crecimiento poblacional la demanda de energía y alimentos seguirá incrementando, siendo uno de los principales intereses de quienes toman decisiones que impactan en la sociedad tanto entes particulares como gubernamentales y de la sociedad en general. Debido a la complejidad de operación de las grandes industrias por las interconexiones que presentan con otras actividades productivas, es imprescindible realizar estudios estrictos a cerca del comportamiento de estos sistemas con la finalidad de establecer las condiciones ideales de operación, logística y diseño. En los modelos de optimización matemática que se proponen a lo largo de este proyecto se plantea el comportamiento de las actividades productivas como parte del nexo Energía-Alimentos-Medio ambiente.

En primer lugar, se presenta el diseño de un sistema de biorefinería para satisfacer la demanda a gran escala de biodiesel y bioetanol en la región de la cuenca del río Balsas considerando la disponibilidad de recursos de la región y la demanda de biocombustibles. Las soluciones óptimas permiten determinar la localización del conjunto de plantas, nuevas áreas de cultivo, demanda de agua fresca, producción de biomasa y biocombustibles, emisión de efecto invernadero y rutas de distribución considerando la incertidumbre de las condiciones de operación, climatológicas y de mercado. El análisis permite identificar la estrecha dependencia con el sector agrícola, aun en la producción de biocombustibles de segunda generación, así como el impacto ambiental por el consumo de agua en una región con problemas disponibilidad donde otras actividades productivas tienen operación. Para el caso del segundo modelo propuesto, el interés del estudio se centra en el seguimiento del fósforo en la producción de lácteos. En regiones con gran actividad del sector, el fósforo está presente como un agente altamente contaminante afectando a los reservorios de agua fresca ocasionando un gran problema ambiental. El balance de fósforo en el nexo permite identificar al sector agrícola como el mayor responsable de las pérdidas de fósforo por lo que se proponen sistemas de control, remediación y recuperación para reducir la alimentación de fósforo al sistema para este sector. Ambas propuestas son herramientas importantes para el diseño robusto de sistemas industriales cuya actividad se encuentre comprometida a otros sectores productivos.

Material suplementario

Tabla A1. Parámetros

Los parámetros que se emplean para los casos de estudio en el modelo de fósforo que se plantea se presentan a continuación con la nomenclatura correspondiente.

Parámetro	Valor	Referencia	Localización específica	Notas
x_{corn}	2.7×10^{-3}	[53]	No	Cita directa
x_{silage}	5.55×10^{-4}	[53]	No	Cita directa
$x_{alfalfa}$	2.36×10^{-3}	[53]	No	Cita directa
$x_{soybean}$	6.05×10^{-3}	[53]	No	Cita directa
x_{potato}	5.63×10^{-4}	[53]	No	Cita directa
x_{wheat}	3.31×10^{-3}	[53]	No	Cita directa
x_{beans}	4.78×10^{-3}	[53]	No	Cita directa
$x_{sweetcorn}$	3.50×10^{-3}	[53]	No	Cita directa
$\beta_{p,corn}$	2.70×10^{-3}	[54]	No	Cita directa
$\beta_{p,silage}$	5.55×10^{-4}	[54]	No	Cita directa
$\beta_{p,alfalfa}$	2.36×10^{-3}	[54]	No	Cita directa
$\beta_{p,soybean}$	6.05×10^{-3}	[54]	No	Cita directa
$\beta_{p,potato}$	5.63×10^{-4}	[54]	No	Cita directa
$\beta_{p,wheat}$	3.31×10^{-3}	[54]	No	Cita directa

$\beta_{p,beans}$	4.78×10^{-3}	[54]	No	Cita directa
$\beta_{p,maizdulce}$	3.50×10^{-3}	[54]	No	Cita directa
$\alpha_{MIS,ES}$	0.09	[40]	No	Calculado usando la Tabla A1
$\alpha_{CS,ES}$	0.11	[40]	No	Calculado usando la Tabla A1
$\alpha_{S,ES}$	0.25	[40]	No	Calculado usando la Tabla A1
$\alpha_{RC,ES}$	0.13	[40]	No	Calculado usando la Tabla A1
$\alpha_{RC,S}$	0	NA	No	NA
$\alpha_{HC,ES}$	0.09	[40]	No	Calculado usando la Tabla A1
$\alpha_{F,ES}$	0.12	[55]	No	Cita directa, página 11
$\alpha_{US,ES}$	0.25	[40]	No	Calculado usando la Tabla A1
$\alpha_{WS,S}$	0.75	[44]	No	Promedio de los valores reportados
$\alpha_{DC,ES}$	0.18	[40]	No	Calculado usando la Tabla A1
$\beta_{CS,DC}$	2.5×10^{-6}	[40]	No	Calculado usando la Tabla 1, gran incertidumbre
β_{mc}	0.9	[36]	Si	Cita directa
x_{beef}	6.10×10^{-4}	Fuente online	No	Cita directa
x_{cheese}	7.81×10^{-3}	Fuente online	No	Cita directa

x_{milk}	9.58×10^{-7}	Fuente online	No	Cita directa
β_{milk}	10,570	[45]	Si	Cita directa
$\beta_{p,milk}$	67.682	[54]	Si	Cita directa
$\beta_{p,cheese}$	0.0174	[54]	No	Cita directa
β_{prc}	1.03×10^{-4}	[36]	Si	Cita directa
$\beta_{p,beef}$	0.036	[54]	No	Cita directa
α_{NMP}	0.38	[56]	Si	Calculado a partir de datos de tierra disponible
A_{corn}	3.17×10^6	[57]	Si	Cita directa
A_{silage}	6.7×10^5	[57]	Si	Cita directa
$A_{alfalfa}$	2.21×10^6	[57]	Si	Cita directa
$A_{soybean}$	2.2×10^6	[57]	Si	Cita directa
A_{potato}	7.2×10^4	[57]	Si	Cita directa
A_{wheat}	2.4×10^5	[57]	Si	Cita directa
A_{beans}	7×10^4	[57]	Si	Cita directa
$A_{sweetcorn}$	5.9×10^4	[57]	Si	Cita directa
r_{corn}^P	1.40×10^{-2}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
r_{silage}^P	1.60×10^{-2}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
$r_{alfalfa}^P$	7.98×10^{-3}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo

$r_{soybean}^P$	1.10×10^{-2}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
r_{potato}^P	1.60×10^{-2}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
r_{wheat}^P	6.99×10^{-3}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
r_{beans}^P	3.99×10^{-3}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
$r_{sweetcorn}^P$	4.99×10^{-3}	[58]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
Y_{corn}	1.39×10^7	[57]	Si	Cita directa
Y_{silage}	1.21×10^7	[57]	Si	Cita directa
$Y_{alfalfa}$	5.88×10^6	[57]	Si	Cita directa
$Y_{soybean}$	2.88×10^6	[57]	Si	Cita directa
Y_{potato}	1.29×10^6	[57]	Si	Cita directa
Y_{wheat}	3.86×10^5	[57]	Si	Cita directa
Y_{beans}	2.99×10^4	[57]	Si	Cita directa
$Y_{sweetcorn}$	4.35×10^5	[57]	Si	Cita directa
$W_{milkcow}$	3.78×10^5	[59]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
W_{drycow}	7.12×10^4	[59]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
W_{heifer}	1.42×10^5	[59]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
W_{calves}	6.35×10^4	[59]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo

$W_{beefcow}$	1.62×10^5	[59]	Si	Promedio respecto a las condiciones del suelo
$m_{milkcow}^P$	0.027	[37]	No	Cita directa
m_{drycow}^P	0.0080	[37]	No	Cita directa
m_{heifer}^P	0.0073	[37]	No	Cita directa
m_{calves}^P	0.0058	[37]	No	Cita directa
$m_{beefcow}^P$	0.013	[37]	No	Cita directa
C_{rock}	88	Fuente online	Si	Promedio del precio del mercado
x_{corn}	0.131	Fuente online	No	Asumiendo 30% de P_2O_5
C_{add}	500	Fuente online	No	Promedio del precio en el mercado, alta incertidumbre
x_{add}	0.21	[60]	No	Cita directa
x_{fert}	0.20	Fuente online	No	Asumiendo solo el uso del fertilizante DAP
C_{corn}	137.8	[57]	Si	Cita directa
C_{silage}	28	[57]	Si	Cita directa
$C_{alfalfa}$	161.3	[57]	Si	Cita directa
$C_{soybean}$	316.2	[57]	Si	Cita directa
C_{potato}	264.6	[57]	Si	Cita directa
C_{wheat}	165.4	[57]	Si	Cita directa

C_{beans}	166.5	[57]	Si	Cita directa
$C_{sweetcorn}$	92.4	[57]	Si	Cita directa
C_{feed}	96.75	[57]	Si	Cita directa
$\gamma_{HC,DC}$	3.19×10^{-3}	NA	Si	Calculada en base a otros parámetros
$\gamma_{HC,E}$	3.40×10^{-3}	NA	Si	Calculada en base a otros parámetros
X_{corn}	0.295	[48]	Si	Calculado en base a cantidad exportada
$X_{soybean}$	0.234	[48]	Si	Calculado en base a cantidad exportada
X_{feed}	0.349	[48]	Si	Calculado en base a cantidad exportada
X_{potato}	0.122	[48]	Si	Asumiendo que otros cultivos corresponden a papas
$C_{manure,t}$	7.85	[61]	Para Iowa	Cita directa y asumiendo que el mismo valor corresponde a WI
$C_{manure,r}$	7.56	[61]	Para Iowa	Cita directa y asumiendo que el mismo valor corresponde a WI
x_{manure}	1.08×10^{-3}	[37,59]	No	Calculado usando la composición del estiércol
C_{sludge}	15	[62]	Para Europa	Asumiendo que es válido para USA
x_{sludge}	0.064	NA	Si	Distrito Metropolitano de alcantarillado de Madison, WI

C_{desh}	0.428	[62]	Para Europa	Asumiendo que es válido para USA
x_{desh}	1.46×10^{-4}	NA	Si	Distrito Metropolitano de alcantarillado de Madison, WI
C_{milk}	1.15	[63]	No	Cita directa
C_{cheese}	724.4	[63]	No	Cita directa
C_{beef}	1.18×10^4	[64]	No	Cita directa
X_{milk}	0.11	NA	Si	Calculado usando otros parámetros
X_{cheese}	0.84	NA	Si	Calculado usando otros parámetros
X_{beef}	0.05	NA	Si	Calculado usando otros parámetros

Estimaciones de los casos de estudio

Para el caso A, se presenta la actual población en el estado de Wisconsin en la siguiente tabla.

Tabla A2. Población urbana en Wisconsin ^[65].

Año	Población	Rango de crecimiento
2010	5,690,479	0.59%
2011	5,7044,755	0.25%
2012	5,719,855	0.26%
2013	5,736,952	0.30%
2014	5,751,974	0.26%
2015	5,761,406	0.16%
2016	5,772,958	0.20%
2017	5,792,051	0.33%
2018	5,813,568	0.37%
2019	5,832,661	0.33%
2020 (Predicción)	5,851,754	0.33%

El rango de crecimiento poblacional ha incrementado en promedio los últimos 10 años un 0.31%, asumiendo que este crecimiento es constante en el futuro, estimamos que la población para el año 2050 será de 6, 416,000 hab.

Para el caso B y C, la población de ganado de vacas lecheras se muestra en la Tabla A.3.

Tabla A3. Población de vacas lecheras en Wisconsin ^[66].

Año	Población	Rango de crecimiento
2008	1,250,000	NA
2009	1,255,000	0.40%
2010	1,260,000	0.40%
2011	1,265,000	0.40%
2012	1,265,000	0.00%
2013	1,270,000	0.40%
2014	1,270,000	0.00%
2015	1,275,000	0.39%
2016	1,280,000	0.39%
2017	1,280,000	0.00%
2018	1,275,000	-0.39%
2019	1,270,000	-0.39%

Para el caso B, se usó el incremento promedio de crecimiento del 0.14% y se extendió esa tendencia a los próximos años. Para el caso C, observamos que en los recientes años la población del ganado criado para la producción de leche decrece en un rango de 0.39% y se prolonga al futuro.

Para el caso D, se reporta que el área de cultivo en el estado de Wisconsin es de 15,741,552 acres, 15,190,804 acres, y 14,568,926 acres en los años 2002, 2007, 2012 ^[67], respectivamente; presentando un incremento en el rango de crecimiento de 0.76%.

Bibliografía

- [1] Linnhoff, B., Townsend, D. W., Boland, D., Hewitt, G. F., Thomas, B. E. A., Buy, A. R., Marsland, R. H. User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy. The Institution of Chemical Engineers, Rugby, U.K., 1982.
- [2] Floudas, C. A., Ciric, A. R., Grossmann, I. E. Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations. *AIChE Journal*, 1986, 32(2): 276–290.
- [3] Furman, K. C.; Sahinidis, N. V. A Critical Review and Annotated Bibliography for Heat Exchanger Network Synthesis in the 20th Century. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41 (10):2335–2370.
- [4] Ponce-Ortega J.M., Serna-González M., Jiménez-Gutiérrez A. Synthesis of Heat Exchanger Networks with Optimal Placement of Multiple utilities. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010, 49: 2849-2856.
- [5] Aviso, K. B., Tan, R. R., Culaba, A. B. Designing eco-industrial water exchange networks using fuzzy mathematical programming. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2010, 12(4), 353–363.
- [6] Olesen, S. G., & Polley, G. T. Dealing with plant geography and piping constraints in water network design. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, 1996. 74: 273–276.
- [7] Chew, I. M. L., Foo, D. C. Y., Ng, D. K. S. Targeting for plant-wide water integration. In *Joint symposium for chemical and metallurgical engineering Pretoria, South Africa*, 2007.
- [8] Foo, D. C. Y. Flowrate targeting for threshold problems and plant-wide integration for water network synthesis. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(2): 253–274.
- [9] Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., Jiménez-Gutiérrez, A., El-Halwagi, M.M. A global optimal formulation for the water integration in eco-industrial parks considering multiple pollutants. *Computers and Chemical Engineering*, 2011, 35 (8): 1558-1574.
- [10] Acobsen, N. B. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, 2006, 10: 239–255.

- [11] Lim, S. R., Park, J. M. Interfactory and intrafactory water network system to remodel a conventional industrial park to a green eco-industrial park. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49: 1351–1358.
- [12] Wang, G., Feng, X., Hoonga, C. K. Symbiosis analysis on industrial ecological system. *Chin. J. Chem. Eng.* 2014, 22 (6): 690–698.
- [13] Boix, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Domenech, S. Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87 (1), 303–317.
- [14] Mele, F.D., Kostin, A.M., Guillen-Gonsalbez, G., Jimenez, L. Multi-objective model for more sustainable fuel supply chains. A case study of the sugar industry in Argentina. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2011. 50(9): 4939-4958.
- [15] Papapostolou, C., Kondili, E., Kaldellis, J.K. Development and implementation of an optimization model for biofuels supply chain. *Energy*. 2011, 36(10): 6019-6026.
- [16] Zhang, F.L., Johnson, D.M., Johnson, M.A. Development of a simulation model of biomass supply chain for biofuel production. *Renewable Energy*. 2012, 44: 380-391.
- [17] Yue, D., You, F., Snyder, S.W. Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: overview, key issues and challenges. *Computers and Chemical Engineering*. 2014, 66: 36-56.
- [18] El-Baz, A.A., Ewida, K.T., Shouman, M.A., El-Halwagi, M.M. Material flow analysis and integration of watersheds and drainage system. *Clean Technology and Environmental Policy*. 2005, 7:51-61.
- [19] Burgara-Montero, O., El-Baz, A.A., Ponce-Ortega, J.M., EL-Halwagi, M.M. Optimal Design of a distributed treatment system for the increasing dissolved oxygen in watershed through self-rotating discs. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2013, 1(10): 1267-1279.
- [20] López-Villarreal, F., Lira-Barragán, L.F., Rico-Ramírez, V., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M.M. An MFA optimization approach for pollution trading considering the sustainability of the surrounded watersheds. *Computers and Chemical Engineering*. 2014, 63(1): 140-151.

- [21] Vakilifard N., Anda M., Bahri P.A., Ho G. The role of water-energy nexus in optimising water supply system-Review of techniques and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018:1424-1432.
- [22] Mannan M., Al-Ansari T., Mackey H.R., Al-Ghamdi S.G. Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 193: 300-314.
- [23] Thiede S., Kurlle D., Herrmann C. The water-energy nexus in manufacturing system: Framework and systematic improvement approach. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2017, 66: 49-52.
- [24] Silalertruksa T., Gheewala S.H. Land-water-energy nexus of sugar cane production in Thailand. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 182:521-528.
- [25] Serrano-Tovar T., Peñate-Suárez B., Musicki A., De la fuente-Bencomo J.A., Cabello V., Giampietro M. Structuring an integrated water-energy-food nexus assessment of a local wind energy desalination system for irrigation. *Science of the Total Environment*. 2019, 689: 945-957.
- [26] Frankowska A., Jeswani H.K., Azapagic A. Environmental sustainability issues in the food-energy-water nexus in the UK vegetables sector: Energy and water consumption. 2nd International Conference on Sustainable Energy and Resource Use in Food Chains, ICSEF 2018. 2019, 161: 150-156.
- [27] Helmenstine, A.M. «What Is Chemical Engineering? What Do Chemical Engineers Do? Web source, About.com. Consultado el Julio 2019.
- [28] Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology. What is Chemical Engineering? Web source, <http://web.mit.edu/cheme/about/what.html>, 2014.
- [29] Leck, H., Conway, D., Bradshaw, M., Rees, J. Tracing the Water-Energy-Food Nexus: Description, Theory and Practice. *Geography Compass*. 2015, 445-460.
- [30] Bizikova, L., Roy, D., Swanson, D., Venema, H. D. and McCandless, M. The water-energy-food security nexus: towards a practical planning and decision-support framework for landscape

investment and risk management. Winnipeg, Canada: International Institute for Sustainable Development. 2013.

[31] Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeruas, A.; Raman, R. GAMS Language guide; GAMS Development Corp.: Washington, DC, 2015.

[32] SENER-BID-GTZ Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México, México City, México. 2006.

[33] SAGARPA-SIAP, Mexican System of Information about Agriculture and Fishing. Advance of planting and harvesting for Mexico. Mexico City, Mexico. 2016. www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=4347 (Consultado, marzo 2017).

[34] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. www.fao.org/home/en (Consultado marzo 2017).

[35] CONAGUA. Water Atlas in Mexico. Mexican National Water Commission. Mexico City, Mexico. 2013.

[36] Wisconsin Milk Marketing Board, 2017 Dairy Data - A Review of the Wisconsin Dairy Industry, 2017.

[37] Lorimor, J. Manure characteristics; Report, Iowa State University, 2000.

[38] Smil, V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. Annual review of energy and the environment. 2000, 25, 53–88.

[39] Ridder M., Jong S., Polchar J., Ligemann S. HCSS, The Hague Center for Strategic Studies. Risk and opportunities in the global phosphate rock market, report. 2012.

[40] Suh, S., Yee, S. Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US. Chemosphere. 2011, 84, 806–813.

[41] United States Census Bureau, Population and Housing Unit Estimates. <https://www.census.gov/programs-surveys/popest.html>, last visit on 2018-08.

[42] Cordell, D., Drangert, J.O., White, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. Global Environmental Change. 2009, 19: 292–305.

- [43] Kataki, S., West H., Clarke, M., Baruah, D.C. Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pre-treatments. *Waste management*. 2016, 49: 437-454.
- [44] Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., Zessner, M. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*. 2016, 571: 522–542.
- [45] United States Department of Agriculture, USDA National Agricultural Statistics Service, Wisconsin Field Office. https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/Wisconsin/Publications/Dairy, last visit on 2018-08.
- [46] U.S, Department of Veterans Affairs, VA Pittsburgh Healthcare System, Phosphorus Content in Food. 2005.
- [47] Chart, E.C. Cheese Chart. <https://ehlenbachscheese.com/>, Consultado Agosto 2018.
- [48] United States Department of Agriculture Economic Research Service, State Export Data; <https://www.ers.usda.gov/data-products/state-export-data/>, 2019.
- [49] USDA United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service. Animal manure management. 2018. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/wi/technical/cp/cta/?cid=nrcs143_014211.
- [50] Peters J. UW-University of Wisconsin, Department of Soil Sciences, Integrated pest and crop management. Phosphorus content of dairy rations and manure Wisconsin trends 2002-2010. <https://ipcm.wisc.edu/blog/2011/02/phosphorus-content-of-dairy-rations-and-manure-wisconsin-trends-2002-2010/>.
- [51] Lathrop R.C. Perspectives on the eutrophication of the Yahara lakes. *Lake and Reservoir Management*. 2007, 23: 345-365.
- [52] USGS United States Geological Survey. Feature Detail Report for: Lake Monona. 2018.
- [53] United States Department of Agriculture, USDA Crop Nutrient Tool; <https://plants.usda.gov/npk/main>, 2019.

[54] United States Department of Agriculture Economic Research Service, USDA Food Consumption and Nutrient Intakes; <https://www.ers.usda.gov/data-products/food-consumption-and-nutrient-intakes/>, 2019.

[55] Buzby, J. C.; Farah-Wells, H.; Hyman, J. The estimated amount, value, and calories of postharvest food losses at the retail and consumer levels in the United States. USDA-ERS Economic Information Bulletin 2014.

[56] Wisconsin Department of Agriculture, Trade, and Consumer Protection, Nutrient Management Update; 2018.

[57] United States Department of Agriculture National Agricultural Statistics Service, 2018 STATE AGRICULTURE OVERVIEW – Wisconsin, 2018.

[58] Laboski, C. A., Peters, J. B., Bundy, L. G. Nutrient application guidelines for field, vegetable, and fruit crops in Wisconsin; Division of Cooperative Extension of the University of Wisconsin-Extension, 2006.

[59] Aguirre-Villegas, H. A., Larson, R. A. Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools. *Journal of cleaner production* 2017, 143:169–179.

[60] Shaver, R. D. By-product feedstuffs in dairy cattle diets in the Upper Midwest. *Forage Resources & Information* 2013.

[61] Andersen, D. S., Pepple, L. M. A county-level assessment of manure nutrient availability relative to crop nutrient capacity in Iowa: Spatial and temporal trends. *Transactions of the ASABE* 2017, 60:1669–1680.

[62] Moral Pajares, E., Gallego Valero, L.; Roman Sánchez, I. M. Cost of Urban Wastewater Treatment and Ecotaxes: Evidence from Municipalities in Southern Europe. *Water* 2019, 11: 423.

[63] United States Department of Agriculture Agricultural Marketing Service, Dairy Market Statistics- 2018 Annual Summary, 2018.

[64] United States Department of Agriculture Economic Research Service, Meat Price Spreads; <https://www.ers.usda.gov/data-products/meat-price-spreads/>, 2019.

[65] World Population Review, Wisconsin Population 2019. <http://worldpopulationreview.com/states/wisconsin-population>, last visit on 2019-08.

[66] United States Department of Agriculture, USDA National Agricultural Statistics Service, Quick Stats. <https://quickstats.nass.usda.gov/results/021EA4CD-48DB-33CF-BAA9-C8A2D88A1E06>, last visit on 2019-08.

[67] Farmland Information Center, Wisconsin Statistics. <https://www.farmlandinfo.org/statistics/wisconsin>, last visit on 2019-08.

APENDICE

A. Artículos publicados

A continuación, se presentan los artículos publicados de los proyectos que investigación que se abordaron durante los estudios de doctorado.

Clean Technologies and Environmental Policy
https://doi.org/10.1007/s10098-018-1611-6

ORIGINAL PAPER



Optimal design of water networks for shale gas hydraulic fracturing including economic and environmental criteria

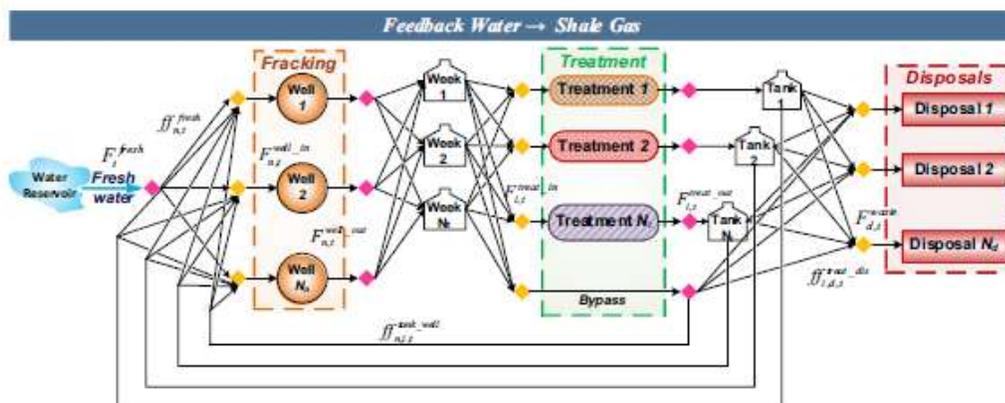
Dulce Celeste López-Díaz¹ · Luis Fernando Lira-Barragán¹ · Eusiel Rubio-Castro² · Fengqi You³ · José María Ponce-Ortega¹

Received: 21 May 2018 / Accepted: 17 September 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

This work proposes an optimization approach for designing efficient water networks for the shale gas production through the recycle and reuse of wastewater streams reducing the freshwater consumption and effluents considering economic and environmental goals. The economic objective function aims to minimize the total annual cost for the water network including the costs associated with storage, treatment and disposal (capital cost) as well as freshwater cost, treatment cost and transportation costs. The environmental objective is addressed to deal with the minimization of the environmental impact associated with the discharged concentration of total dissolved solids in the wastewater streams and the freshwater consumption through an environmental function that represents the benefit for removing pollutants using the eco-indicator 99 methodology. The methodology requires a given scheduling for the completion phases of the target wells to be properly implemented by the available hydraulic fracturing crews during a time horizon. The model formulation is configured to determine the optimal sizes for the equipment involved by the project, particularly the sizes for storage and treatment units are quantified by the optimization process. A case study is solved to evaluate the effectiveness of the proposed optimization approach.

Graphical abstract



Keywords Shale gas · Optimization · Hydraulic fracturing · Recycle and reuse water networks · Sustainable systems

✉ José María Ponce-Ortega
jmponce@umich.mx

Extended author information available on the last page of the article

Published online: 22 September 2018

Springer

Optimization of biofuels production via a water–energy–food nexus framework

Dulce Celeste López-Díaz¹ · Luis Fernando Lira-Barragán¹ · Eusiel Rubio-Castro² · Medardo Serna-González¹ · Mahmoud M. El-Halwagi^{3,4} · José María Ponce-Ortega¹ 

Received: 17 April 2017 / Accepted: 13 July 2017
© Springer-Verlag GmbH Germany 2017

Abstract Biofuels have emerged as an attractive renewable alternative to satisfy the global energy demands. The large-scale production of biofuels requires the installation of biorefining systems that involve strategic decisions for the logistics and operation in the production of biofuels such as location, feedstock type(s), production capacities and interactions with the surrounding environment. This work proposes an optimization framework for the design of a biorefining system while accounting for the interactions with the surrounding watershed using a material flow analysis technique through the design of an efficient supply chain for the production and distribution of feedstocks, grains and biofuels considering the water and land requirements. The proposed model deals with the uncertainty involved in the project (e.g., prices of feedstocks and products, biofuel demands and precipitation in the watershed). A mixed-integer linear programming model is proposed to simultaneously consider the economic and environmental objectives. A case study located in Mexico is solved for a set of scenarios with the purpose of illustrating the capabilities of the proposed optimization

approach. The results show strong trade-offs between the considered objectives and the impact of uncertainties.

Keywords Biorefineries · Uncertainty · Supply chains · Material flow analysis · Biofuels

List of symbols

$a_{m,r}^{max}$	Maximum available area to cultivate a feedstock (ha)
$a_{m,r}^{new}$	New available area to cultivate feedstocks (ha)
$A_{r,t}^{Agriculture}$	Used area for other agricultural activities surrounded the watershed (ha)
A_s^{total}	Total used area for cultivating in the system (ha)
$CapCost_s^{Biorefineries}$	Capital cost for the installation of a biorefinery (US\$/year)
$CO_{2_e}^{abs}$	Factor for the absorption of CO ₂ in cultivating area (kgCO ₂ /ha)
$CO_{2_e}^{prod}$	Factor for the production of CO ₂ for the industrial activity in the production of biofuels (kgECO ₂ /L)
$CO_{2_e}^{total}$	Factor for the production of CO ₂ in the supply chain per unit of produced biofuel (kgECO ₂ /L)
$D_{r,s}$	Direct water discharges to the reach r in each scenario s (m ³ /s)
$D_{r,t,s}$	Water discharges in the tributary t of the reach r in each scenario s (m ³ /s)
$f_{m,r,j,s}^{Gain-market}$	Amount of grain m produced on the field located in reach r in scenario s (tonne/year)

 José María Ponce-Ortega
jmponce@umich.mx

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

² Chemical and Biological Sciences Department, Universidad Autónoma de Sinaloa, 80000 Culiacán, Sinaloa, Mexico

³ Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA

⁴ Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah 21589, Saudi Arabia

Published online: 20 July 2017

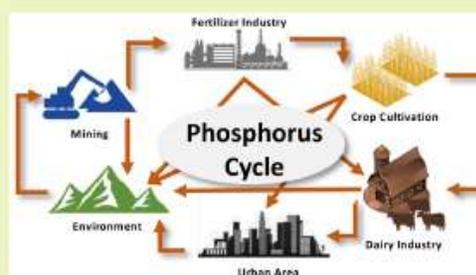
 Springer

Systems-Level Analysis of Phosphorus Flows in the Dairy Supply Chain

Dulce Celeste López Díaz,[†] Yicheng Hu,[‡] Winnie Chan,[‡] José María Ponce Ortega,[†] and Victor M. Zavala^{*†‡}[†]Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacan 53040, México[‡]Department of Chemical and Biological Engineering, University of Wisconsin-Madison, 1415 Engineering Drive, Madison, Wisconsin 53706, United States

Supporting Information

ABSTRACT: The dairy sector plays a vital role in the food supply chain, but it is also highly resource-intensive, consuming vast amounts of water, energy, and nutrients. Nutrients such as phosphorus (P) are key economic drivers in this interconnected system, as they serve as catalysts that enable efficient production of crops that in turn support dairy cow diet requirements and subsequent production of milk and derived products such as cheese and ice cream. As such, the dairy sector is tightly interconnected with mining, chemical, agricultural, and urban sectors. Unfortunately, nutrients are also emitted throughout the supply chain and create widespread environmental impacts. Specifically, P losses that result from urban discharges and overapplication of fertilizer in croplands impact the quality of water reservoirs (e.g., eutrophication). Moreover, natural P resources are finite, and thus efficient recycling and reuse of this valuable nutrient is essential to ensure the long-term viability of the dairy sector. In this work, we provide a systems-level analysis framework that captures the flow of inorganic P throughout the dairy sector and its interdependent sectors. We use this framework to analyze how changes in different sectors and externalities propagate throughout the system. A case study using real data for the State of Wisconsin is used to illustrate the insights that can be obtained with the proposed framework.

KEYWORDS: Dairy, Nutrients, Phosphorus, Systems engineering, Recycling

INTRODUCTION

The dairy sector of the United States is a multibillion enterprise that comprises millions of dairy cows. The State of Wisconsin alone produces 29 billion pounds of milk and 2.8 billion pounds of cheese annually. The dairy sector is also an integral part of the cultural identity and a major societal driver in diverse parts of the world.¹ Unfortunately, the dairy sector consumes large amounts of water, energy, and nutrients and creates significant environmental impacts. Such resource intensity and associated impacts are driven by high dairy product demands from urban sectors. To give some perspective on the numbers involved, consider the fact that a single dairy cow produces approximately 9500 L of milk and 19,000 L of manure a year (approximately two liters of manure are generated per liter of milk produced). Manure is a complex waste stream that contains a high concentration of decomposable organic matter and nutrients that in turn cause air and water pollution when discharged to the environment.^{2,3} Significant research is currently being conducted to identify technologies and management strategies that can maximize the resource use efficiencies and determine more environmentally friendly dairy product portfolios.^{4–6}

A rigorous analysis of the environmental impacts of the dairy sector must consider all aspects of its supply chain, which is interconnected with other industrial sectors such as the mining, chemical, agriculture, waste management, and urban sectors. The strong interdependence between these sectors makes them vulnerable to externalities (e.g., changes in efficiencies, losses, markets, and policy). Systems-level analysis can provide important insights into investment decisions and policies that can be effective when implemented at a large scale.⁷ For instance, the dairy sector is strongly dependent on the agricultural sector, which generates the feed for dairy cows. In the State of Wisconsin, crop demands from dairy farms represent over 50% of the total crop production.⁸ The diet of a cow consists of a mixture of grass, hay, and grains such as corn.⁹ Consequently, growth in the dairy sector can disrupt corn supply to urban or biofuel (transportation) sectors. At the same time, a significant portion of nutrient supply to the agricultural sector (over 30%)

Received: June 5, 2019

Revised: September 9, 2019

Published: September 13, 2019