



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



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

**INTEGRACIÓN SUSTENTABLE DE REFINERÍAS Y BIOREFINERÍAS
CON ECO-INDUSTRIAS FORESTALES PARA DISMINUCIÓN DE
EMISIONES DE CO₂, A TRAVÉS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA**

TESIS presentada por:

AURORA DE FÁTIMA SÁNCHEZ BAUTISTA

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

MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor

Dr. en Ciencias en Ingeniería Química. José María Ponce Ortega

Co-asesor

Dr. en Ciencias en Ingeniería Química. Medardo Serna González

Morelia, Michoacán.

Febrero 2016

RESUMEN

INTEGRACIÓN SUSTENTABLE DE REFINERÍAS Y BIOREFINERÍAS CON ECO-INDUSTRIAS FORESTALES PARA DISMINUCIÓN DE EMISIONES DE CO₂, A TRAVÉS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

Por

Aurora de Fátima Sánchez Bautista

Febrero del 2016

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

Co-Asesor: Dr. Medardo Serna González

El incremento de emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂, está asociado al calentamiento global. Recientemente se han propuesto alternativas para disminuir la tasa de emisiones de CO₂ a la atmosfera; una de las más aceptadas es el uso de la biomasa como materia prima para la producción de bioenergéticos, que se pueden usar en combinación con los combustibles fósiles. El objetivo de este trabajo es presentar un modelo de optimización multi-objetivo para la integración de refinerías y biorefinerías con eco-industrias forestales para disminuir gases de efecto invernadero, principalmente CO₂. El modelo propuesto se basa en la representación de un sistema integrado de refinerías y biorefinerías con Eco-industrias, las cuales consisten en comunidades dedicadas a plantaciones forestales para captura de CO₂ y considera funciones objetivo económica, ambiental y social; las cuales son la maximización de las ganancias totales y la minimización de las emisiones totales de gases de CO₂ y la generación de empleos. El modelo fue resuelto para un caso de estudio a nivel nacional mostrando que es posible la disminución de las emisiones de CO₂ y obtener beneficios económicos a la vez. El modelo propuesto es un esquema de optimización de un problema multi-objetivo de sistemas de producción de combustibles y biocombustibles, reconociendo que la biomasa es capaz de capturar parte de las emisiones producidas por la quema de combustibles durante su crecimiento, y simultáneamente se considera que la biomasa forestal puede utilizarse como sumidero de carbono a través de empresas denominadas eco-industrias.

Palabras clave: Calentamiento global, Sistema integrado, Optimización multi-objetivo, Eco-Industrias forestales, Sumidero de Carbono.

Abstract

The production of fossil fuels to satisfy energy demand has caused a drastic increment in the greenhouse gas emissions, which are associated directly with the global warming problem. Installing biorefineries is an interesting alternative to address this problem because biomass can capture CO₂ emissions during its growth. On the other hand, a new interesting approach to promote economic growth in low-income regions is through new eco-industries dedicated to cultivate trees and taking care of the forest. These forest plantations help to capture CO₂ emissions produced by petroleum refineries and biorefineries. Therefore, a system able to integrate fuels production through refineries and biorefineries with the use of forest plantations to decrease the greenhouse gas emissions can be an attractive solution to significantly improve the environmental sustainability. However, the implementation of this project has to consider several factors, including the life time of the project, the availability of resources, the amount and type of products that should be produced, the allocation and capacity of the involved refineries, biorefineries and forest plantations, among others. For this reason, this paper presents an optimization model for the optimal planning of an integrated system for the production of fossil fuels and biofuels considering the interaction with eco-industries, which are able to capture emissions from biorefineries and refineries and receive an economic benefit. The proposed mathematical model takes into account the availability of biomass, the production of oil, a set of existing biorefineries and refineries as well as the possibility to install new facilities. The mathematical approach was applied to a nationwide case study from Mexico, considering the creation of new jobs, overall emissions and net profit as objectives. The results are shown through a Pareto curve, which is useful to make decisions about the planning of the interactions between these types of industries as well as determining the supply chain configuration in order to satisfy overall demand of products.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
RELACIÓN DE TABLAS	vii
RELACIÓN DE FIGURAS	viii
NOMENCLATURA	ix
AGRADECIMIENTOS	xvi
CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1. Cambio climático y gases de efecto invernadero	1
1.1.2. Sustentabilidad energética	5
1.2 Justificación	7
1.3 Objetivo general	8
1.4 Objetivos particulares	8
1.5 Hipótesis	9
CAPITULO 2.- MARCO TEORICO	10
2.1 Estrategia de comercio de emisiones	10
2.2 Captura de CO₂ a través de plantaciones forestales	13
2.3 Antecedentes	15
CAPITULO 3.- DESARROLLO DEL PROBLEMA	18
3.1 Definición del problema	18
3.2 Metodología	20
3.2.1 Formulación del modelo matemático	20
3.2.1.1 Ecuaciones para refinerías	20

3.2.1.2	<i>Ecuaciones para biorefinerías</i>	24
3.2.1.3	<i>Ecuaciones para Eco-industrias forestales</i>	28
3.2.1.4	<i>Ecuaciones para costo de transporte</i>	30
3.2.1.5	<i>Ecuaciones para emisiones por actividad e instalaciones</i>	36
3.2.1.6	<i>Ecuaciones para demanda de productos</i>	40
3.2.1.7	<i>Ecuaciones para cálculo de empleos generados</i>	41
3.2.1.8	<i>Funciones Objetivo</i>	41
3.2.2	Resolución del modelo para un caso de estudio	42
CAPITULO 4.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		49
CONCLUSIONES		58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		60
APÉNDICE		62

RELACIÓN DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1. Localización de las refinerías para el caso de estudio considerado	43
Tabla 3.2 Descripción de los productos y materias primas para el caso de estudio	45
Tabla 3.3. Disponibilidad de materia prima por lugar de suministro	45
Tabla 3.4. Capacidades y costos unitarios de refinerías y biorefinerías	47
Tabla 3.5. Datos usados para Eco-industrias forestales	48
Tabla 4.1. Resultados para emisiones	51
Tabla 4.2. Resultados para generación de empleos	52
Tabla 4.3. Cantidad de petróleo de petróleo procesado por refinería seleccionada para los puntos A y B de la Figura 4.2	52
Tabla 4.4. Capacidad de captura de las eco-industrias forestales y porcentaje de contribución	53
Tabla 4.5. Cantidad y porcentaje de demanda satisfecha por materia prima para los diferentes bioproductos en el punto B de la Figura 4.2	54

RELACIÓN DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Diagrama de emisiones de gases de efecto invernadero para México, SEMARNAT (2015).	4
Figura 2.1 Representación esquemática del intercambio de contaminantes propuesto.	15
Figura 3.1. Superestructura del problema abordado	19
Figura 3.2. Representación esquemática del caso de estudio abordado	44
Figura 4.1. Curva Pareto entre las emisiones totales y la ganancia neta anual para la integración de refinerías, biorefinerías y eco-industrias forestales	49
Figura 4.2. Curva Pareto para las emisiones netas, número de empleos y ganancia neta anual	50
Figure 4.3. Distribución de la materia prima en las biorefinerías seleccionadas en el punto B de la Figura 4.2.	55
Figura 4.4. Proporción económica en las biorefinerías seleccionadas en el punto B. a) Por concepto y biorefinería; b) Por concepto en todas las biorefinerías	56
Figura 4.5. Proporción económica en las refinerías seleccionadas en el punto B. a) Por concepto y refinería; b) Por concepto en todas las refinerías	57

NOMENCLATURA

Parámetros

$\alpha_{p1,i}^{\text{product-ref}}$	Parámetro de conversión para obtener la producción en refinerías
$F_{i1}^{\text{oil MAX1}}$	Capacidad máxima de producción para refinerías existentes
$F_{i2}^{\text{oil MAX2}}$	Capacidad máxima de producción para refinerías nuevas
$F_{i2}^{\text{oil MIN}}$	Capacidad mínima de producción para nuevas refinerías
F_{i2}^{CostRef}	Costo fijo para el costo de capital de nuevas refinerías
V_{i2}^{CostRef}	Costo variable para el costo de capital de nuevas refinerías
γ_{i2}^{ref}	Exponente de capacidad para la función de costo de nuevas refinerías
OC_i^{ref}	Costo de operación unitario para refinerías
K_F	Factor de anualización
H_Y	Días operacionales
$UC_{o,i}^{\text{oil}}$	Costo unitario de petróleo
$UC_{p1,i}^{\text{selling-product-ref}}$	Costo de venta unitario de los productos
$\max F_{bm,m}^{\text{Biomass-field}}$	Disponibilidad de biomasa en campo
$\alpha_{p2,bm,b}^{\text{product-Bioref}}$	Parámetro de conversión para biorefinerías
$F_{b1}^{\text{Biomass-MAX1}}$	Capacidad máxima de procesamiento en biorefinerías existentes
$F_{b2}^{\text{Biomass MIN}}$	Capacidad mínima de procesamiento en nuevas biorefinerías
$F_{b2}^{\text{Biomass MAX2}}$	Capacidad máxima de procesamiento en nuevas biorefinerías
$F_{b2}^{\text{CostBioref}}$	Costo fijo para el costo de capital de nuevas biorefinerías
$V_{bm,b2}^{\text{CostBioref}}$	Costo variable para el costo de capital de nuevas biorefinerías
$\gamma_{b2}^{\text{Bioref}}$	Exponente de capacidad para la función de costo de nuevas biorefinerías
$OC_{bm,b}^{\text{Bioref}}$	Costo de operación unitario para biorefinerías
$UC_{bm,b,m}^{\text{Biomass-Growth}}$	Costo unitario de producción de biomasa
$UC_{p2,b}^{\text{revenue-prod-bioref}}$	Costo unitario de bioproductos

$OC_e^{opEcoind}$	costo de operación unitario para eco-industrias forestales
$Dland_e^{Max}$	Límite máximo de tierra disponible para reforestación
$Dland_e^{Min}$	Límite mínimo de tierra disponible para reforestación
$Uland_e$	Área de tierra necesaria para cada árbol
$F_e^{CostEco}$	Costo fijo para el costo de capital de eco-industrias
$V_e^{CostEco}$	Costo variable para el costo de capital de eco-industrias
γ_e^{EcoInd}	Exponente de capacidad para la función de costo de eco-industrias
$CEmis_i^{Ref}$	Costo unitario de emisiones para refinerías
$CEmis_b^{Bioref}$	Costo unitario de emisiones para biorefinerías
$UC_{o,i1}^{pumping-oil-exist}$	Costo de transporte unitario de petróleo
$UC_{p1,i1,j}^{trans-product-ref}$	Costo de transporte unitario de productos
$F_{o,i2}^{cost-pip-oil}$	Costo fijo para el costo de capital para el transporte de petróleo a nuevas refinerías
$V_{o,i2}^{cost-oil}$	Costo variable para el costo de capital para el transporte de petróleo a nuevas refinerías
$\gamma_{i2}^{trans-ref1}$	Exponente de capacidad para la función de costo para el transporte de petróleo a nuevas refinerías
$UC_{o,i2}^{pumping-oil-new}$	Costo unitario de bombeo de petróleo a nuevas refinerías
$f1_{o,i2}^{oil-MAX}$	Límite máximo para el transporte de petróleo a nuevas refinerías
$f1_{o,i2}^{oil-MIN}$	Límite mínimo para el transporte de petróleo a nuevas refinerías
$UC_{p1,i2,j}^{trans-prod-ref-new}$	Costo de transporte unitario a centros de distribución
$F_{p1,i2,j}^{cost-pip-prod-ref}$	Costo fijo del costo de capital para instalación de infraestructura de transporte necesaria
$V_{p1,i2,j}^{cost-prod-ref}$	Costo variable del costo de capital para instalación de infraestructura de transporte necesaria
$\gamma_{i2}^{trans-ref2}$	Exponente de capacidad para la función de costo para instalación de infraestructura de transporte necesaria
$f_{p1,i2,j}^{product-ref-MAX}$	Límite máximo de transporte de productos petrolíferos a centros de

	distribución
$f_{p1,i2,j}^{\text{product-ref-MIN}}$	Límite mínimo de transporte de productos petrolíferos a centros de distribución
$UC_{bm,m,b1}^{\text{Trans-biomass-exist}}$	Costo unitario de transporte de biomasa a biorefinerías
$UC_{p2,b1,j}^{\text{Trans-prod-bior-exis}}$	Costo unitario de transporte de bioproductos a centros de distribución
$F_{bm,m,b2}^{\text{cost-trans-biomass}}$	Costo fijo para el costo de capital por nueva infraestructura de transporte para biomasa a nuevas biorefinerías
$V_{bm,m,b2}^{\text{cost-trans-biomass}}$	Costo variable para el costo de capital por nueva infraestructura de transporte para biomasa a nuevas biorefinerías
$\gamma_{b2}^{\text{trans-bior1}}$	Exponente de capacidad de la función de costo para instalación de infraestructura de transporte necesaria para biomasa a nuevas biorefinerías
$UC_{bm,m,b2}^{\text{Trans-biomass-new}}$	Costo de transporte unitario de biomasa
$f_{bm,m,b2}^{\text{biomass-MAX}}$	Límite máximo de biomasa transportada de los campos
$f_{bm,m,b2}^{\text{biomass-MIN}}$	Límite mínimo de biomasa transportada de los campos
$F_{p2,b2,j}^{\text{cost-trans-prod-bioref}}$	Costo fijo para el costo de capital para infraestructura necesaria para transporte de productos de nuevas biorefinerías
$V_{p2,b2,j}^{\text{cost-trans-prod-bioref}}$	Costo variable para el costo de capital para infraestructura necesaria para transporte de productos de nuevas biorefinerías
$\gamma_{b2}^{\text{trans-bior2}}$	Exponente de capacidad de la función de costo para infraestructura necesaria para transporte de productos de nuevas biorefinerías
$UC_{p2,b2,j}^{\text{Trans-prod-bior-new}}$	Costo unitario de transporte de productos de nuevas biorefinerías
$f_{p2,b2,j}^{\text{product-bioref-MAX}}$	Límite máximo de producto transportado de nuevas biorefinerías
$f_{p2,b2,j}^{\text{product-bioref-MIN}}$	Límite mínimo de producto transportado de nuevas biorefinerías
$\beta_{o,i}^{\text{CO}_2\text{-ext}}$	Emissiones unitarias de CO ₂ equivalente por extracción de petróleo
$\beta_{p1,i}^{\text{CO}_2\text{-product-ref}}$	Emissiones unitarias de CO ₂ equivalente por la refinación
$\beta_{p1,i,j}^{\text{CO}_2\text{-trans-product-ref}}$	Emissiones unitarias de CO ₂ equivalente producidas por el transporte de productos desde las refinerías
$\beta_{p1,i}^{\text{CO}_2\text{-use-product-ref}}$	emisiones unitarias de CO ₂ producidas por la quema de combustibles

$\gamma_{bm,b}^{CO_2\text{-Biomass-Growth}}$

Emissiones unitarias de CO₂ por la producción de biomasa

$\gamma_{bm,m,b}^{CO_2\text{-Biomass-trans}}$

Emissiones unitarias de CO₂ por transporte de biomasa

Variables

F_i^{oil}

Flujo total de petróleo en refinerías

$f_{o,i}^{oil}$

Flujo de petróleo distribuido desde las regiones petroleras hacia las refinerías

$F_{p1,i}^{product-ref}$

Flujo total de producto producido en las refinerías

$f_{p1,i,j}^{product-ref1}$

Flujo de producto distribuido desde las refinerías a los centros de distribución

C_{i2}^{CapRef}

Costo capital asociado a las refinerías nuevas

C_i^{opRef}

Costo operacional asociado a las refinerías

$Cost_i^{oil}$

Costo del petróleo para las refinerías

$Revenue_i^{sold-product-ref}$

Ganancia por la venta de petrolíferos

$C_{i1}^{Trans-oil-exis}$,

Costo de transporte desde los pozos petroleros hacia las refinerías nuevas y existentes

$C_{i2}^{Trans-oil-new}$

$C_{i1}^{Trans-products-ref-exis}$,

Costo de transporte para los productos petrolíferos desde las refinerías nuevas y existentes hacia los centros de distribución

$C_{i2}^{Trans-products-ref-new}$

$Profit^{Refinery}$

Ganancia total de las refinerías

$Emcap_i^{Refinery}$

Emissiones capturadas a las refinerías

$Em_i^{Refinery}$

Emissiones totales de las refinerías

$F_{bm,b}^{Biomass}$

Flujo total de biomasa en las biorefinerías

$f_{bm,m,b}^{Biomass1}$

Flujo de biomasa desde campos de suministro a biorefinerías

$F_{bm,m}^{Biomass-field}$

Flujo total de biomasa distribuido desde los campos a las biorefinerías

$F_{p2,b}^{product-Bioref}$

Flujo de bioproductos en las biorefinerías

$f_{p2,b,j}^{product-Bioref1}$

Flujo de bioproductos enviados a los centros de distribución

$C_{b2}^{CapBioref}$	Costo de capital para las nuevas biorefinerías
$C_b^{opBioref}$	Costo de operación para las biorefinerías
$Cost_b^{Biomass-Growth}$	Costo de crecimiento de biomasa
$Revenue_b^{sold-prod-bioref}$	Ganancia por venta de bioproductos
$C_{b1}^{Trans-biomass-exis}$,	Costo de transporte de biomasa desde lugares de suministro a biorefinerías nuevas y existentes
$C_{b2}^{Trans-biomass-new}$	
$C_{b1}^{Trans-product-bioref-exis}$,	Costo de transporte para bioproductos desde las biorefinerías
$C_{b2}^{Trans-product-bioref-new}$	
$Emcap_b^{Biorefinery}$	Emisiones capturadas a las biorefinerías
Em_b^{Bioref}	Emisiones totales provenientes de las biorefinerías
$C_e^{opEcoind}$	Costo de operación para las eco-industrias forestales
NT_e	Número total de árboles por eco-industria forestal
$C_e^{CapEcoind}$	Costo de capital por la instalación de eco-industrias forestales
$C_e^{TotalEcoind}$	Costo total de las eco-industrias forestales
$Profit^{Ecoind}$	Ganancia total para las eco-industrias forestales
$C_{i2}^{CapTrans-oil}$	Costo de capital para la infraestructura para el transporte de petróleo
$C_{i2}^{opTrans-oil}$	Costo de operación por el transporte de petróleo
$C_{i2}^{CapTrans-products-ref}$	Costo de capital para la infraestructura para el transporte de petrolíferos
$C_{i2}^{optrans-products-ref}$	Costo de operación para el transporte de petrolíferos para las nuevas refinerías
$C_{b2}^{CapTrans-biomass}$	Costo de capital para el transporte de biomasa hacia las nuevas biorefinerías
$C_{b2}^{opTrans-biomass}$	Costo de operación para el transporte de biomasa hacia las nuevas biorefinerías
$C_{b2}^{CapTrans-product-bioref}$	Costo de capital para el transporte de bioproductos proveniente de las nuevas biorefinerías

$C_{b2}^{opTrans-product-bioref}$	Costo de operacional para el transporte de bioproductos proveniente de las nuevas biorefinerías
$E_i^{oil-ext}$	Emisiones por extracción de petróleo
$E_i^{product-ref}$	Emisiones por transporte de petróleo
$E_i^{trans-product-ref}$	Emisiones por transporte de petrolíferos
$E_i^{use-product-ref}$	Emisiones por utilización de productos
$NE_b^{Biomass-Growth}$	Emisiones netas capturadas durante el crecimiento de la biomasa
$E_b^{Biomass-trans}$	Emisiones por transporte de biomasa
$E_b^{Bioref-product}$	Emisiones por procesamiento de la biomasa
$E_b^{trans-prod-bioref}$	Emisiones por transporte de bioproductos provenientes de las biorefinerías
$E_b^{use-prod-bioref}$	Emisiones por el uso de los bioproductos como biocombustibles
Em_e^{Ecoind}	Emisiones capturadas por las eco-industrias forestales
$Jobs^{Refinery}$	Nuevos empleos generados por las refinerías
$Jobs^{Bioref}$	Nuevos puestos de trabajo debido a las biorefinerías
$Jobs^{Ecoind}$	Nuevos empleos debido a las eco-industrias forestales
EOF	Ganancia total del sistema y función objetivo económica
$NetEmission$	Emisiones netas del sistema y función objetivo ambiental
$TOTALJOBS$	Nuevos empleos generados por el sistema y función objetivo social

Variables binarias

y_{i2}^{ref}	Variable binaria para definir la instalación de nuevas refinerías
y_{b2}^{Bioref}	Variable binaria para definir la instalación de nuevas biorefinerías
y_e^{Ecoind}	Variable binaria para definir la instalación de eco-industrias forestales
$y_{o,i2}^{pip-oil-ref}$	Variable binaria para definir el transporte de petróleo a nuevas refinerías
$y_{p1,i2,j}^{pip-product-ref}$	Variable binaria para definir el transporte de petrolíferos a centros de

$y_{bm,m,b2}^{trans-biomass}$

distribución

Variable binaria para definir el transporte de biomasa a nuevas refinerías

$y_{p2,b2,j}^{trans-prod-bioref}$

Variable binaria para definir el transporte de bioproductos a centros de distribución

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi esposo **Ezequiel** a quien amo tanto por el enorme apoyo y comprensión que me brinda siempre, por el gran amor que sé que me tiene y me fortalece. Le agradezco a la vida por la gran dicha de ser mamá de una niña maravillosa, mi pequeña **Edith**, con quien soy tan feliz y con su sonrisa logra que se me olviden preocupaciones y me motiva día a día a ser mejor persona. Agradezco con mucho cariño el apoyo que me ha dado mi **madre** que ha sido un ángel en mi camino y especialmente durante mis estudios de maestría me ha manifestado un apoyo invaluable.

A mi asesor el **Dr. José María** por todas sus enseñanzas y consejos pero especialmente por su comprensión y apoyo que me dio tranquilidad en un momento importante en mi vida.

A mis maestros y sinodales por todos sus consejos para mejorar el trabajo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT** por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría.

A la **Red Temática de Bioenergía** por el apoyo económico otorgado para la realización de estancia de investigación en el Extranjero.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se abordan conceptos generales para la comprensión del tema de la presente tesis como la relación de los gases de efecto invernadero y el cambio climático. Así mismo, se contextualiza el problema de la generación de gases de efecto invernadero debido a la producción de energía. Finalmente se presenta una descripción de los apartados del presente trabajo de investigación.

1.1 Generalidades

1.1.1 Cambio climático y gases de efecto invernadero

En el artículo 1ro de La Convención Marco de las Naciones Unidas se define el cambio climático como: “Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”.

Las causas de la variación de los patrones climatológicos en el planeta que son relacionadas con la actividad humana se conocen como antropogénicas, por ejemplo las emisiones generadas por procesos industriales, el uso y producción de combustibles fósiles, cambios en el uso de suelo, agricultura, entre otras. Por otro lado, dentro de las fuentes naturales se encuentran las erupciones volcánicas y los cambios en la radiación solar, entre otras.

En este sentido, los gases de efecto invernadero son llamados así porque son capaces de absorber y reemitir la radiación solar reflejada en la superficie terrestre de nuevo hacia la misma, causando el efecto invernadero. Este efecto tiene como objetivo calentar la superficie terrestre y la troposfera hasta una temperatura media apta para la vida. Sin embargo, el incremento de estos ha causado un calentamiento mayor afectando el equilibrio de la vida en el planeta.

Dentro de los principales gases de efecto invernadero se encuentran el CH₄ por su alta capacidad de absorber y reemitir la radiación solar. La contribución de CH₄ al efecto invernadero de origen antropogénico es alrededor de 20 % y su concentración en

la atmosfera es aproximadamente 15 % del total de gases de efecto invernadero. Otro gas importante es el vapor de agua ya que representa cerca del 75 % de los gases de efecto invernadero de origen natural. Cabe mencionar que aunque las actividades humanas no añaden más vapor de agua a la atmosfera, el aire caliente puede retener más humedad, por lo que el aumento de temperatura intensifica aún más el cambio climático. Además, el óxido nitroso se considera porque tiene potencial de calentamiento 310 veces mayor que el CO₂ que significa una contribución del 4 al 6 % al efecto invernadero ya que su concentración ha aumentado alrededor de 16 % en los últimos 200 años. Finalmente, se contempla el CO₂; es importante mencionar que su capacidad de absorción de radiación es significativamente menor a otros gases (1 gramo de CH₄ causa el mismo efecto que 23 de CO₂); sin embargo, la concentración de éste gas en la atmosfera representa cerca del 80 % de gases de efecto invernadero lo hace un contribuyente importante al calentamiento global ya que se estima que éste gas es responsable del 60 % del efecto invernadero de origen antropogénico. Esta contribución se debe a que es generado naturalmente y por gran parte de las actividades antropogénicas como la producción y consumo de combustibles, respiración de seres vivos, entre otras. Cabe destacar que una forma para medir la cantidad de gases de efecto invernadero es a través de la cantidad de CO₂ equivalente; es decir, la cantidad de otros gases es transformada a la cantidad que se tendría si fueran dióxido de carbono.

En consecuencia, la mayoría de las acciones para afrontar el cambio climático son dirigidas al control de las emisiones de dióxido de carbono. Una de las más promovidas es la captación de carbono que consta de recoger y almacenar carbono atmosférico en la vegetación, la agro silvicultura o la administración forestal de bajo impacto; las cuales han sido implementadas en Australia, en el proyecto Scolel Te y en la Columbia Británica respectivamente. Es importante mencionar que de acuerdo con Cottle y Crosthwaite-Eyre (2003), una tonelada capturada en algún lugar del mundo y mediante un método dado, tiene el mismo efecto de mitigación del calentamiento global que una tonelada capturada en otro lugar del mundo y por otro método.

En el caso particular de México, el inventario de gases de efecto invernadero para el 2015 identificó que la generación de emisiones tuvieron un incremento del 33.4% con respecto al año base 1990, con una Tasa de Crecimiento Media Anual del 1.5%; estas emisiones en unidades de CO₂ equivalente se estimaron en gigagramos (Gg) que equivalen a mil toneladas. La Figura 1.1 resume la contribución por categoría de emisión del lado izquierdo y por gas del lado derecho.

Es previsible que en países como México, con economías en desarrollo, continuarán incrementándose las emisiones de gases de efecto invernadero asociados al aumento en la generación y el consumo de energía, estos últimos indispensables para impulsar el desarrollo económico y demandados por el rápido crecimiento demográfico característico de estas naciones.

Finalmente, la acción global frente al cambio climático es ineludible e impostergable. De acuerdo con la comunidad científica internacional, es necesario que todos los países reduzcan, de manera conjunta y decidida, las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar que los efectos se agraven; este desafío conlleva problemas sociales, económicos y ambientales que ya afectan a la población, infraestructura, sistemas productivos y ecosistemas.

1.1.2 Sustentabilidad energética

La demanda energética ha aumentado drásticamente en los últimos años, principalmente por el alto crecimiento demográfico y el desarrollo tecnológico; este incremento representa cerca del 300% en los últimos 50 años para el petróleo y el carbón, los cuales son actualmente las principales fuentes energéticas. Además, paulatinamente incrementa la necesidad de conseguir mejores combustibles y más económicos.

Adicionalmente, el desabasto energético es un problema de gran importancia a nivel mundial, ya que se depende principalmente de los combustibles fósiles; en este sentido, se han encontrado nuevos yacimientos de petróleo y especialmente de gas natural por lo que el problema de desabasto energético estaría resuelto a corto y mediano plazo. Sin embargo, el uso de estos combustibles debe de planificarse por el alto riesgo ambiental que representan, ya que emiten gran cantidad de los gases de efecto invernadero que dan pie al cambio climático que es uno de los aspectos ambientales de mayor preocupación científico y social en el corto plazo.

Para disminuir la problemática ambiental correspondiente a la generación y consumo de energía, se han propuesto varias alternativas. Entre ellas se encuentran la energía solar, la cual es considerada como una energía limpia que puede contribuir en gran medida a la disminución del uso de combustibles fósiles, lo cual implica una reducción directa de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el alto costo de las tecnologías para su implementación no ha favorecido su generalización.

Por otra parte, la biomasa es otra opción para disminuir el uso de combustibles fósiles aumentando en gran medida su duración, siendo la energía alternativa con mayor potencial después de la energía solar, aunque el uso de ésta como fuente de energía se ha restringido debido a la competencia con productos que son alimentos para los humanos y las grandes extensiones de tierra que puede llegar a ocupar, así como la gran cantidad de agua que es consumida durante su producción.

Para el caso particular de México, se han llevado a cabo importantes acciones durante los últimos años que han permitido mejorar considerablemente la situación del sector energético mexicano; en este sentido, se ha revertido la declinación natural de la producción y se ha alcanzado un nivel de restitución de reservas probadas superior al 100%; se ha fomentado la diversificación del sector a través de nuevas regulaciones que incentivan la participación de las energías renovables; se han materializado las reconfiguraciones de refinerías a lo largo del país; y se ha comenzado un importante programa de expansión del sistema de transporte de gas natural en el país.

1.2 Justificación

El cambio climático es un problema impostergable, ya que sus efectos afectan la calidad de vida de todos los seres vivos en el planeta. Estos cambios tienen relación directa con la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera debido a la producción y consumo de energía, el cual se ha incrementado en los últimos años. En este sentido, se han propuesto alternativas para reducir el impacto ambiental asociado a la producción de energía como es el uso de energía solar, desarrollo de la energía nuclear así como el aprovechamiento de la biomasa; aunque la mayoría de éstas no cuenta con la capacidad de causar la total independencia de los combustibles fósiles, por lo cual solo atacan una parte del problema global.

Por otro lado, se han implementado programas para la captura y almacenamiento del carbono atmosférico como los bonos de carbono, la reforestación o el uso de éste para producir biocombustibles a través de micro algas. Sin embargo, la mayoría de las propuestas no se han llevado a cabo en la realidad debido a una falta de desarrollo en las tecnologías y su alto costo de implementación.

Además, el desarrollo de las diferentes alternativas se ha llevado de forma aislada sin considerar la interacción y efecto resultante de la integración de varias alternativas. Por esta razón, es necesaria una metodología capaz de considerar la integración de varias formas de atacar el problema del cambio climático sin dejar de lado el problema de la sustentabilidad energética; así como los beneficios económicos, impacto ambiental y afectación social resultantes de su implementación.

Por lo tanto, el presente trabajo propone una metodología para la reducción global de las emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito de la producción de energía, a través de la integración de sistemas de uso y producción de combustibles fósiles, aprovechamiento de la biomasa para biocombustibles y la reducción de emisiones con eco-industrias forestales, considerando la generación de empleos, el balance neto de emisiones de CO₂ y las ganancias económicas de cada uno de los entes involucrados.

1.3 Objetivo general

Desarrollar un modelo de optimización multi-objetivo para la planificación sustentable del proceso de producción y uso de combustibles líquidos en México considerando conceptos de remediación ambiental para la disminución de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂.

1.4 Objetivos particulares

- Desarrollar una superestructura que permita proponer el modelo matemático.
- Desarrollo de un modelo de optimización para la planificación sustentable de producción de combustibles en México partiendo de una superestructura propuesta.
- Evaluar alternativas de comercio de contaminantes como opción para la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero.

1.5 Hipótesis

Mediante la aplicación de un modelo de optimización multi-objetivo, aplicado al proceso de producción de combustibles líquidos en México e involucrando los conceptos de remediación ambiental, para disminución de CO₂ atmosférico, y comercio de contaminantes se obtendrá una planeación energética óptima que permita satisfacer las necesidades energéticas sin comprometer el ambiente para las generaciones futuras.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estrategia de comercio de emisiones

El comercio de contaminantes, también conocido como “*emission trading*” o “*cap and trade*” son políticas de intercambio de emisiones que permiten a las empresas comprar y vender derechos o créditos para emitir una cantidad determinada de contaminantes con el objetivo de lograr reducir contaminación a un menor costo global Raymond y Cason (2011).

El Protocolo de Kioto es el instrumento legal que establece por primera vez objetivos de reducción y limitación de emisiones de gases de efecto invernadero para los principales países desarrollados y con economías en transición. Los Países que al firmar y ratificar el Protocolo han adquirido compromisos de reducción/limitación de sus emisiones de gases de efecto invernadero poseen unos niveles de emisión permitidos que se expresan como porcentajes sobre las emisiones registradas en el año base¹. Así, la Unión Europea, por ejemplo, adquirió el compromiso de reducir sus emisiones, en su conjunto, un 8% con respecto a los niveles del año de referencia durante dicho periodo. Particularmente, España tiene el compromiso de limitar el crecimiento de sus emisiones en un 15% por encima de los valores del año base. Es importante destacar que el Protocolo de Kyoto no estableció en su fase inicial compromisos inmediatos de reducción de emisiones para los países en desarrollo como México.

El Protocolo introduce tres nuevos mecanismos internacionales llamados "mecanismos de flexibilidad" o "mecanismos de Kioto". El objetivo de estos mecanismos es hacer más eficiente, desde el punto de vista de los costes, la aplicación de este instrumento internacional de forma que, aquellos países que no consiguieran cumplir con sus límites máximos de emisión mediante la aplicación exclusiva de medidas internas, podrían hacer uso de dichos mecanismos flexibles para mantener su compromiso. Estos instrumentos son: el Comercio internacional de derechos de emisión

¹ Para CO₂, CH₂ y NO₂, el año de referencia es 1990 para la mayoría de los países. Para el resto de gases las partes pueden elegir entre 1990 y 1995.

de gases de efecto invernadero (con efectos a partir de 2008) y los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) y de Aplicación Conjunta (AC).

Los mecanismos basados en proyectos (los dos últimos de la enumeración anterior) permiten la obtención de “créditos de reducción de emisiones” que se contabilizan a favor del país que los desarrolla, agregándose a su cantidad atribuida (permiten elevar la cuota de emisión comprometida). Por cada tonelada de CO₂ equivalente que se reduce se expide una RCE (reducción certificada de emisiones) en el caso del mecanismo de desarrollo limpio y se obtiene una URE (unidad de reducción de emisiones), en el caso de la aplicación conjunta. Por otro lado, el comercio de derechos de emisión, tal y como se establece en el artículo 17 del Protocolo, permite a los países que poseen un excedente de UCAs (prevén emitir por debajo de su objetivo) vender este excedente a países que superen sus compromisos de reducción/limitación. Dado que el CO₂ es el principal gas de efecto invernadero suele hablarse del “mercado de carbono” cuando se hace referencia a este sistema internacional de comercio de derechos de emisión.

Otro elemento de flexibilidad que se introduce en el Protocolo es la contabilización de las absorciones de CO₂ logradas mediante los sumideros de carbono. Más concretamente, en las actividades de forestación, reforestación, gestión de tierras agrícolas y de pastoreo, gestión forestal y revegetación. En este caso, la absorción de una tonelada de CO₂ implica la expedición de una unidad de absorción, UDA, que se tiene en cuenta a la hora de determinar el cumplimiento de las obligaciones.

Como resultado de la primera fase del primer Programa Europeo de Cambio Climático, la Comisión Europea publicó, en junio de 2001, un informe en el que se identificaban 42 posibles medidas con las que se podría conseguir una reducción de entre 664 y 765 MtCO₂ equivalente. A partir de la publicación de este informe, la Comisión lanzó un paquete con tres amplias medidas para abordar el problema del cambio climático. Estas medidas fueron: el desarrollo de un plan de acción para el programa europeo de cambio climático, la propuesta de ratificación del Protocolo de Kioto y la propuesta de creación de un régimen de comercio de derechos de emisión.

Consecuentemente, el 25 de abril de 2002 se aprobó la Decisión del Consejo relativa a la aprobación, en nombre de la Comunidad Europea, del Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y al cumplimiento conjunto de los compromisos contraídos con arreglo al mismo.

El régimen europeo de comercio de derechos de emisión fue concebido como una herramienta para facilitar el cumplimiento de los compromisos contraídos por la Comunidad Europea tras la aprobación del Protocolo de Kioto y para adquirir experiencia previa a la entrada en vigor de dicho Protocolo en la participación en un régimen comercio de derechos de emisión. Así, el de 13 de octubre de 2003 se aprobó la Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un régimen para el comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero en la Comunidad. Conforme a lo establecido en la Directiva, el 1 de enero de 2005 comenzó a funcionar el régimen europeo de comercio de derechos de emisión.

El comercio de derechos de emisión es un instrumento de mercado, mediante el que se crea un incentivo o desincentivo económico que persigue un beneficio ambiental; el cual sería que un conjunto de plantas industriales reduzcan colectivamente las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Los elementos básicos de un esquema de comercio de emisión definidos por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España, son generalmente los siguientes:

Techo de emisiones, que se refiere al volumen total de derechos de emisión que se ponen en circulación.

Autorización de emisión, es el permiso otorgado a una instalación determinada afectada por el régimen de comercio de derechos de emisión que le autoriza a emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera. No se puede comprar ni vender.

Derecho de emisión, es el derecho a emitir desde una instalación afectada por este régimen, una determinada cantidad de gases a la atmósfera. En el régimen actual de comercio de derechos de emisión, un derecho de emisión se configura como el derecho a emitir 1 tonelada equivalente de CO₂ durante un periodo de tiempo determinado. Es un bien transferible: se puede comprar o vender.

Asignación de derechos, este es el mecanismo por el que se reparten los derechos de emisión entre las instalaciones afectadas. Puede hacerse de forma gratuita, mediante subasta, etc.

Registro de derechos, es un registro electrónico que sirve para llevar la contabilidad de los derechos de emisión en circulación: cuántos hay y a quién pertenecen.

Seguimiento de las emisiones, Las instalaciones sujetas al comercio de derechos de emisión deben llevar un control de sus emisiones, con objeto de que se pueda determinar qué cantidad de derechos de emisión deben entregar.

Cumplimiento, las instalaciones afectadas por el comercio de derechos de emisión deben entregar una cantidad de derechos de emisión equivalente a las emisiones reales producidas. No se establecen límites de emisión individuales, pero sí un límite global y la citada obligación de cubrir las emisiones con derechos. Se crea un régimen sancionador a través del cual se garantiza el cumplimiento de ésta y otras obligaciones.

Gonzalez-Eugino (2011) menciona que los economistas en décadas pasadas han defendido el uso de instrumentos basados en el mercado en políticas climáticas y ambientales, además compara el impacto de diferentes tipos de instrumentos basados en mercado para diferentes niveles de mitigación de CO₂. Por un lado analiza y hace una distinción entre instrumentos cuantitativos como el sistema de permisos de emisión comercializables en varios sectores y por otro lado instrumentos de precio que representan diferentes tipos de impuestos.

2.2 Captura de CO₂ a través de plantaciones forestales

Un sumidero se considera como cualquier sistema o proceso por el cual se extrae de la atmosfera un gas o gases y se almacena. Este término se aplica a los bosques para significar su papel en la absorción de CO₂ de la atmosfera y la consiguiente reducción del efecto invernadero. En referencia al Protocolo de Kioto, la definición se limita a determinadas actividades de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura, creación de nuevos bosques, gestión forestal y gestión de tierras

agrícolas, entre otras, que se traducen en una captura del CO₂ presente en la atmósfera y su almacenamiento en forma de materia vegetal. Esta captura contribuye a reducir la concentración de los gases de efecto invernadero de la atmósfera y así mitigar el cambio climático.

La vida en la tierra depende de la energía solar que es atrapada por las plantas mediante el proceso de la fotosíntesis, que es responsable de la producción de toda la materia orgánica que conocemos. La fotosíntesis es el proceso por el que las plantas son capaces de capturar la energía de la luz del sol y convertirla en energía química y materia orgánica. Es un proceso complejo, que significa la captación de dióxido de carbono de la atmósfera y emisión de oxígeno a la atmósfera.

La permanencia del carbono almacenado es un punto clave en los sumideros, ya que las cantidades de CO₂ absorbidas por un sumidero, por ejemplo, un bosque, pueden volver a la atmósfera si esa formación vegetal desaparece por cualquier circunstancia como incendios forestales, plagas o enfermedades.

Es importante mencionar que en el presente trabajo el término Eco-industria forestal se refiere a empresas, principalmente comunidades o grupos de personas organizadas para dedicarse a la plantación de bosques o reforestación de bosques que tengan la función de absorber CO₂ de la atmósfera y que este grupo o comunidad tenga una retribución económica por la realización de dicha actividad. Tal retribución económica se considera que sea por parte de empresas contaminantes; en este caso, son las refinerías y en cierta medida también las biorefinerías las que emiten un pago a dichas eco-industrias para disminuir parte de sus emisiones por medio de la plantación de árboles; en este sentido se plantea un esquema de comercio de contaminantes que no es semejante al que se lleva a cabo en la Unión Europea, sino más bien es considerado como un tipo de elemento de flexibilidad para las refinerías y biorefinerías. Cabe destacar que en este caso se busca beneficiar a comunidades marginadas en el país para que tengan la oportunidad de obtener beneficios económicos a través de actividades forestales. Una descripción de este enfoque se presenta en la Figura 2.1.

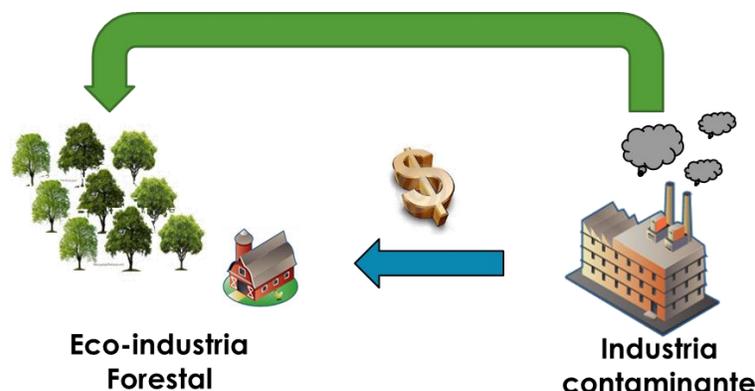


Figura 2.1 Representación esquemática del intercambio de contaminantes propuesto.

2.3 Antecedentes

La demanda energética y las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado drásticamente en los últimos años principalmente por el alto crecimiento demográfico y el desarrollo tecnológico.

Para disminuir la problemática ambiental correspondiente a la generación y consumo de energía, se han propuesto varias alternativas. Por ejemplo, Sánchez-Bautista y col. (2015) proponen el uso de energía solar en para el calentamiento de agua para uso doméstico, ya que la energía solar puede contribuir en gran medida a la disminución del uso de combustibles fósiles, lo cual implica una reducción directa de las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el alto costo de las tecnologías para su implementación no ha favorecido su generalización.

Por otro lado, algunos trabajos proponen la producción de biocombustibles a través de biorefinerías; en este contexto, Aksoy y col. (2008) desarrollaron el concepto de biorefinería integrada, sin embargo, el impacto ambiental no fue considerado en la evaluación técnico-económica de los procesos. Por otra parte, Cherubini y col. (2009) consideraron aspectos ambientales durante la evaluación de diferentes tecnologías de procesamiento; ellos evaluaron la eficiencia energética pero sin considerar el beneficio económico. Sin embargo, para la implementación de producción de biocombustibles a gran escala, es necesario analizar los impactos económico, ambiental y social de la

cadena de suministro total (ver por ejemplo Torjai y col., 2015). En este contexto, Santibañez-Aguilar y col. (2014) proponen la optimización de cadenas de suministro para la producción de biocombustibles considerando objetivos económico, ambiental y social.

Adicionalmente, otra alternativa para solventar el problema ambiental dado por la producción y uso de los combustibles fósiles son las estrategias de remediación ambiental, las cuales principalmente han sido aplicadas para la reducción de gases de efecto invernadero; en este caso, el CO₂ principalmente, con el cuál se propone la absorción y almacenamiento de CO₂ por medio de tecnologías de captura que puedan ser implementadas en empresas generadoras de energía. Autores como Song y col. (2012) proponen la captura y almacenamiento de CO₂ como una alternativa importante para el control de gases de efecto invernadero. También, Tapia y Tan (2014) argumentan que la captura y almacenamiento de carbono, CCS por sus siglas en inglés, es una importante opción de tecnología para reducir las emisiones industriales de gases de efecto invernadero. Además, se ha propuesto el secuestro de CO₂ por medio de la plantación de vegetación como árboles, o a través de sistemas de microalgas que posteriormente se usen para producir aceite y biodiesel. También, Verma y Kumar (2013) indican que el esquema de comercio de emisiones en la producción de energías renovables es útil para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Finalmente, López-Villarreal y col. (2011) afirman que el comercio de contaminantes da flexibilidad a la toma de decisiones para reducir la contaminación e introduce una nueva alternativa a los responsables políticos y las industrias con el objetivo general de cumplir las condiciones ambientales iguales o mejores que las obtenidas a través de la aplicación de tecnologías de tratamiento de contaminantes, pero a un costo más bajo.

Consecuentemente, este fenómeno nos impone la necesidad de planificar a largo plazo, y actuar de inmediato para adaptarnos ante los impactos potencialmente adversos, así como a reducir las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero. En este contexto, es imprescindible el uso de modelos que nos ayuden a tomar decisiones al momento de invertir en proyectos de energía, y específicamente,

las que implican energías renovables. Por tanto, el objetivo de este trabajo es integrar estos dos conceptos por medio de un modelo de optimización multi-objetivo para la integración de biorefinerías, refinerías, y eco-industrias forestales considerando aspectos de remediación ambiental para la disminución de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROBLEMA

3.1 Definición del problema

El problema abordado está basado en la superestructura de la Figura 3.1, la cual toma en cuenta un conjunto de potenciales centros de suministro de materia prima como son los campos M para la biomasa y los pozos petroleros O para el petróleo. En este sentido, los campos de biomasa son capaces de suministrar biomasa a un conjunto de biorefinerías B , mientras los pozos petroleros pueden producir el petróleo necesario para la operación de las refinerías I . Por otra parte, tanto la biomasa como el petróleo pueden ser procesados por diferentes rutas de procesamiento para obtener los productos deseados; es decir, biocombustibles $P2$ y petrolíferos $P1$. Cabe destacar que la superestructura contempla la instalación de nuevas biorefinerías y refinerías en caso de ser necesario. Subsecuentemente, los productos obtenidos pueden ser transportados a centros de distribución para su posterior consumo. Adicionalmente, la superestructura toma en cuenta un conjunto de industrias capaces de capturar parte de las emisiones de gases de efecto invernadero de las industrias contaminantes como las refinerías y las biorefinerías a cambio de una retribución económica. Estas industrias son denominadas eco-industrias forestales E , las cuales tienen diferente capacidad debido a la ubicación y disponibilidad de área de captación de CO_2 .

En este sentido, el objetivo es determinar el conjunto de valores de las variables asociadas a la configuración de la cadena de suministro presentada en la Figura 3.1 como: cantidad y tipos de biomasa, rutas de procesamiento, cantidad de cada uno de los productos, localización y capacidad de las plantas de procesamiento; así como, la cantidad de emisiones a ser capturadas por las eco-industrias forestales con el fin de obtener los mejores beneficios económicos, ambientales y sociales. En este sentido, se tiene la ganancia neta anual como objetivo económico, el número de nuevos puestos de trabajo como objetivo social y la minimización de las emisiones netas como objetivo ambiental. Es importante señalar que la función económica contempla la ganancia de las tres entidades principales: eco-industrias, refinerías y biorefinerías. La generación de empleos se presenta por la instalación y operación de las mismas entidades así como actividades de producción de biomasa y transporte de materias primas y

productos. Finalmente, las emisiones netas son reducidas por la producción de biocombustibles para satisfacer una demanda dada y la captura de emisiones por medio de eco-industrias forestales.

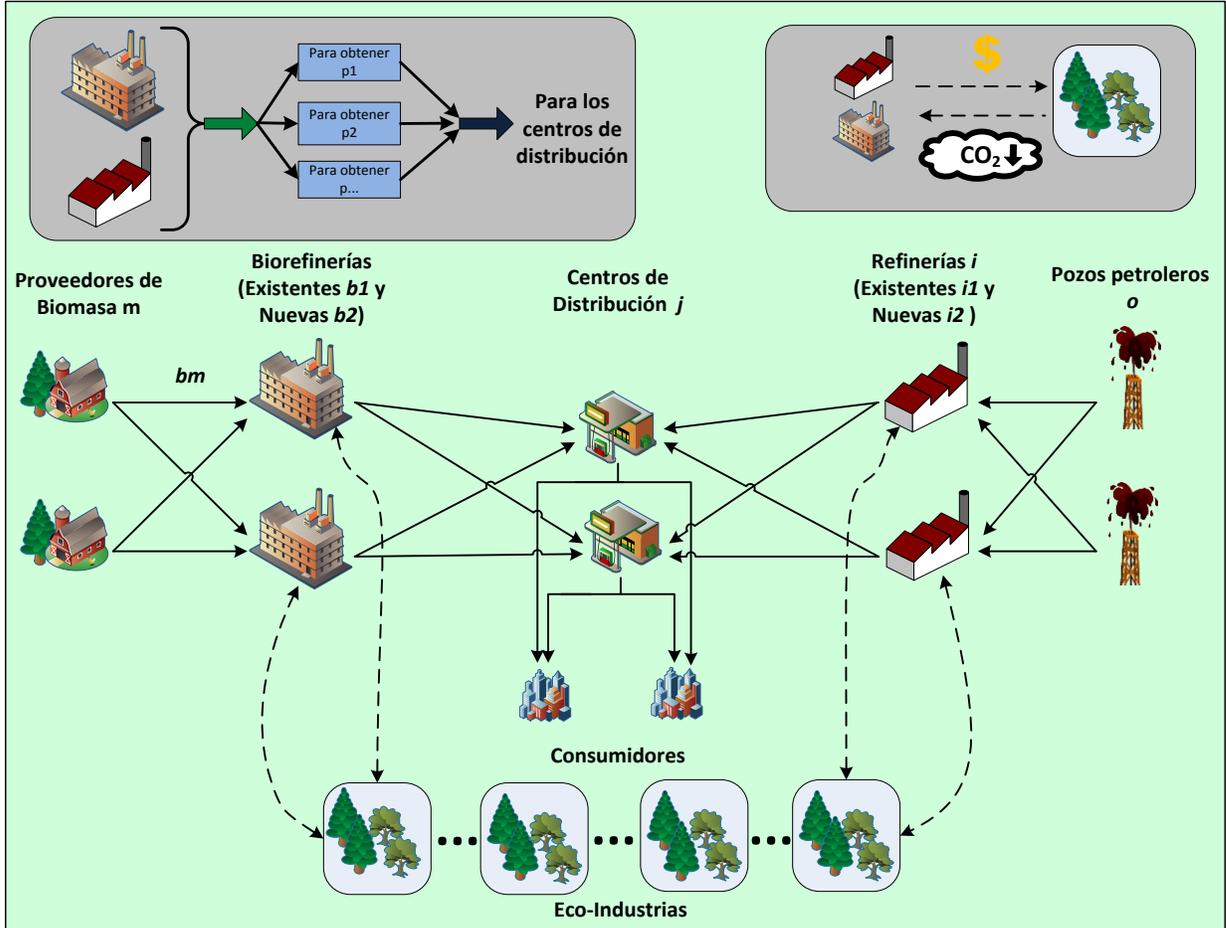


Figura 3.1. Superestructura del problema abordado

3.2 Metodología

3.2.1 Formulación del modelo matemático

El modelo matemático utiliza varios índices para las ecuaciones, por esta razón, primeramente es necesario definir los índices usados en la formulación del modelo. El índice i representa a las refinerías, siendo $i1$ para las refinerías existentes e $i2$ para refinerías nuevas, el índice b es utilizado para representar a las biorefinerías, siendo $b1$ para las biorefinerías existentes y $b2$ para las nuevas. El índice p se utiliza en representación de los productos, en este sentido $p1$ se refiere a los productos obtenidos en refinerías derivados de petróleo que son gasolina y diésel, además $p2$ se refiere los productos obtenidos en biorefinerías derivados de biomasa que son etanol y biodiesel, el índice j denota a los centros de distribución, bm se refiere al tipo de biomasa empleado para la producción en las biorefinerías, el índice o representa los pozos petroleros de donde se extrae la materia prima para las refinerías, el índice m se utiliza para indicar los campos de biomasa o sitios de producción de biomasa. Además, para representar a las eco-industrias forestales se utiliza el índice e . La formulación del modelo se describe como sigue:

3.2.1.1 Ecuaciones para refinerías

3.2.1.1.1 Balance de masa en refinerías.

$$F_i^{oil} = \sum_o f_{o,i}^{oil}, \forall i \quad (3.1)$$

La Ecuación (3.1) representa el flujo total de petróleo en refinerías (F_i^{oil}) dado en ton/día, el cual es igual a la suma del flujo de petróleo que es obtenido de pozos petroleros $\left(\sum_o f_{o,i}^{oil}\right)$.

3.2.1.1.2 Producción en Refinerías

$$F_{p1,i}^{product-ref} = \alpha_{p1,i}^{product-ref} \cdot F_i^{oil}, \forall i, \forall p1 \quad (3.2)$$

La Ecuación (3.2) es para calcular la producción de refinerías; la ecuación representa el flujo total de productos de refinerías ($F_{p1,i}^{product-ref}$) que es igual a un parámetro

de conversión para obtener la producción de refinerías $(\alpha_{p1,i}^{product-ref})$ multiplicado por el flujo total de petróleo en refinerías (F_i^{oil}) .

3.2.1.1.3 Productos provenientes de refinerías

$$F_{p1,i}^{product-ref} = \sum_j f_{p1,i,j}^{product-ref}, \forall i, \forall p1 \quad (3.3)$$

La Ecuación (3.3) es acerca de la distribución de productos desde refinerías, el flujo total de productos de refinerías $(F_{p1,i}^{product-ref})$ es igual a la suma de productos distribuidos desde refinerías a los centros de distribución $(\sum_j f_{p1,i,j}^{product-ref})$.

3.2.1.1.4 Restricciones para refinerías existentes.

3.2.1.1.4.1 Restricción para la máxima capacidad dada

$$F_{i1}^{oil} \leq F_{i1}^{oil MAX1}, \forall i1 \quad (3.4)$$

La Ecuación (3.4) representa una restricción para la máxima capacidad dada por refinerías existentes, donde el flujo total de petróleo en refinerías (F_{i1}^{oil}) es igual a la máxima capacidad de procesamiento para las refinerías existentes $(F_{i1}^{oil MAX1})$.

3.2.1.1.5 Restricciones para refinerías nuevas

$$\vee \left[\begin{array}{l} Y_{i2}^{ref} \\ F_{i2}^{oil MIN} \leq F_{i2}^{oil} \leq F_{i2}^{oil MAX2} \\ C_{i2}^{CapRef} = K_F \cdot \left(F_{i2}^{CostRef} + V_{i2}^{CostRef} (F_{i2}^{oil})^{Y_{i2}^{ref}} \right) \end{array} \right], \forall i2$$

Reformulation:

$$F_{i2}^{oil MIN} \cdot y_{i2}^{ref} \leq F_{i2}^{oil} \leq F_{i2}^{oil MAX2} \cdot y_{i2}^{ref}, \forall i2 \quad (3.5)$$

$$C_{i2}^{CapRef} = K_F \cdot \left(F_{i2}^{CostRef} \cdot y_{i2}^{ref} + V_{i2}^{CostRef} (F_{i2}^{oil})^{Y_{i2}^{ref}} \right), \forall i2 \quad (3.6)$$

Las ecuaciones anteriores son la reformulación de la disyunción para la existencia de nuevas refinerías. La primera establece que el flujo total de petróleo en nuevas refinerías (F_{i2}^{oil}) es mayor o igual a la capacidad mínima de procesamiento de las nuevas refinerías (F_{i2}^{oilMIN}) multiplicado por una variable binaria para la existencia de nuevas refinerías (y_{i2}^{ref}) y es menor o igual que la capacidad máxima de procesamiento de las nuevas refinerías $(F_{i2}^{oilMAX2})$ multiplicado por la misma variable binaria para la existencia de nuevas refinerías (y_{i2}^{ref}) . Adicionalmente, la segunda reformulación representa el costo de capital de refinerías si alguna refinería nueva existe, donde se considera el costo fijo $(F_{i2}^{CostRef})$ y el costo variable $(V_{i2}^{CostRef})$, además de K_F que es el factor usado para anualizar la inversión.

3.2.1.1.6 Costo de operación de refinerías

El costo de operación para refinerías (C_i^{opRef}) es determinado por el costo de operación unitario (OC_i^{ref}) multiplicado por el flujo total de petróleo en refinerías (F_i^{oil}) , donde (H_Y) son los días operacionales igual a 365 días por cada periodo.

$$C_i^{opRef} = H_Y \cdot OC_i^{ref} \cdot F_i^{oil} \quad , \forall i \quad (3.7)$$

3.2.1.1.7 Costo del petróleo para las refinerías

El costo de petróleo para refinerías $(Cost_i^{oil})$ involucra la suma del costo unitario de petróleo $(UC_{o,i}^{oil})$ multiplicado por el flujo de petróleo que es extraído de los pozos petroleros $(f_{o,i}^{oil1})$ y los días operacionales (H_Y) , la ecuación es presentada a continuación:

$$Cost_i^{oil} = \sum_o UC_{o,i}^{oil} \cdot (H_Y \cdot f_{o,i}^{oil1}) \quad , \forall i \quad (3.8)$$

3.2.1.1.8 Ganancia por la venta de producto de las refinerías

Los ingresos de las refinerías $(Revenue_i^{sold-product-ref})$ son considerados por la venta de productos y se determinan mediante la suma del costo de venta unitario de los

productos $(UC_{p1,i}^{\text{selling-product-ref}})$ multiplicada por el flujo total de productos de refinerías $(F_{p1,i}^{\text{product-ref}})$ y los días operacionales (H_Y) , la ecuación se representa como sigue:

$$Revenue_i^{\text{sold-product-ref}} = \sum_{p1} UC_{p1,i}^{\text{selling-product-ref}} \cdot (H_Y \cdot F_{p1,i}^{\text{product-ref}}), \forall i \quad (3.9)$$

3.2.1.1.9 Ganancia total de las refinerías

El beneficio económico total en el caso de las refinerías $(Profit^{Refinery})$ incluye los ingresos por la venta de productos de las refinerías $(Revenue_i^{\text{sold-product-ref}})$ y todos los costos involucrados en las refinerías, el costo del petróleo crudo $(Cost_i^{\text{oil}})$, el costo de operación de las refinerías (C_i^{opRef}) , costo de capital de las nuevas refinerías (C_{i2}^{CapRef}) , el costo de transporte de petróleo desde los pozos petroleros a las refinerías existentes y nuevas $(C_{i1}^{\text{Trans-oil-exis}})$, $(C_{i2}^{\text{Trans-oil-new}})$ y el costo del transporte de productos refinados desde las refinerías existentes y nuevas a los centros de distribución $(C_{i1}^{\text{Trans-products-ref-exis}})$ y $(C_{i2}^{\text{Trans-products-ref-new}})$. También, la ganancia total de las refinerías considera un costo por emisiones, esto quiere decir que las refinerías deben pagar a las Eco-industrias forestales para reducir sus emisiones. El costo por las emisiones se da a través del costo unitario de las emisiones $(CEmis_i^{\text{Ref}})$ multiplicado por la cantidad de emisiones capturadas a las refinerías por las Eco-industrias forestales $(Emcap_i^{\text{Refinery}})$. La ecuación es enunciada a continuación:

$$\begin{aligned} Profit^{Refinery} = & \sum_i Revenue_i^{\text{sold-product-ref}} - \sum_i Cost_i^{\text{oil}} - \sum_i C_i^{\text{opRef}} - \sum_{i2} C_{i2}^{\text{CapRef}} - \sum_{i1} C_{i1}^{\text{Trans-oil-exis}} \\ & - \sum_{i1} C_{i1}^{\text{Trans-products-ref-exis}} - \sum_{i2} C_{i2}^{\text{Trans-oil-new}} - \sum_{i2} C_{i2}^{\text{Trans-products-ref-new}} \\ & - \sum_i CEmis_i^{\text{Ref}} \cdot Emcap_i^{\text{Refinery}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

De esta manera es necesaria una restricción adicional para la cantidad de emisiones de las refinerías capturadas por Eco-industrias debido a que esta cantidad de emisiones no debe ser más grande que las emisiones totales por refinería.

$$Emcap_i^{\text{Refinery}} \leq Em_i^{\text{Refinery}}, \forall i \quad (3.11)$$

3.2.1.2 Ecuaciones para biorefinerías

3.2.1.2.1 Biomasa en biorefinerías

El balance de la cantidad de biomasa en biorefinerías representa el flujo total de biomasa en biorefinerías ($F_{bm,b}^{Biomass}$) dada en ton/día, la cual es igual a la suma de la cantidad de biomasa que llega a las biorefinerías desde los campos de producción de biomasa ($\sum_m f_{bm,m,b}^{Biomass1}$); la ecuación se enuncia a continuación:

$$F_{bm,b}^{Biomass} = \sum_m f_{bm,m,b}^{Biomass1}, \forall b, \forall bm \quad (3.12)$$

3.2.1.2.2 Balance de biomasa en campos de producción

La cantidad total de biomasa distribuida desde los campos a biorefinerías ($F_{bm,m}^{Biomass-field}$) es determinada por la suma de la cantidad de biomasa que se distribuye desde cada campo de cultivo a las biorefinerías ($\sum_b f_{bm,m,b}^{Biomass1}$), lo cual es representado como sigue:

$$F_{bm,m}^{Biomass-field} = \sum_b f_{bm,m,b}^{Biomass1}, \forall bm, \forall m \quad (3.13)$$

3.2.1.2.3 Restricción de disponibilidad para biomasa en campos

La cantidad de biomasa en campos de cultivo está limitada por una cantidad máxima de biomasa disponible en el campo de la siguiente manera:

$$F_{bm,m}^{Biomass-field} \leq \max F_{bm,m}^{Biomass-field}, \forall bm, \forall m \quad (3.14)$$

3.2.1.2.4 Producción en biorefinerías

La producción en biorefinerías implica que el flujo de bioproductos ($F_{p2,b}^{product-Bioref}$) es igual a la suma de un parámetro de conversión ($\alpha_{p2,bm,b}^{product-Bioref}$) multiplicada por el flujo total de biomasa en biorefinerías ($F_{bm,b}^{Biomass}$), la ecuación se muestra a continuación:

$$F_{p2,b}^{product-Bioref} = \sum_{bm} \alpha_{p2,bm,b}^{product-Bioref} \cdot F_{bm,b}^{Biomass}, \forall p2, \forall b \quad (3.15)$$

3.2.1.2.5 Distribución de productos de las biorefinerías

Es importante notar que los productos se distribuyen a los diferentes centros de distribución. De esta manera, la cantidad total de productos de las biorefinerías ($F_{p2,b}^{product-Bioref}$) es igual a la suma de productos distribuidos a los centros de distribución ($f_{p2,b,j}^{product-Bioref1}$).

$$F_{p2,b}^{product-Bioref} = \sum_j f_{p2,b,j}^{product-Bioref1}, \forall p2, \forall b \quad (3.16)$$

3.2.1.2.6 Restricciones para biorefinerías existentes

Además, es importante mencionar que la materia prima debe estar sujeta a limitaciones. En este contexto la materia prima procesada en cualquier biorefinería ($F_{bm,b1}^{Biomass}$) es menor que la capacidad máxima de procesamiento ($F_{b1}^{Biomass-MAX1}$).

$$\sum_{bm} F_{bm,b1}^{Biomass} \leq F_{b1}^{Biomass-MAX1}, \forall b1 \quad (3.17)$$

3.2.1.2.7 Restricciones para nuevas biorefinerías

Por otro lado, son necesarias restricciones adicionales para considerar la instalación de nuevas biorefinerías. Por esta razón, se propone una disyunción que se muestra enseguida:

$$\vee \left[\begin{array}{l} F_{b2}^{Biomass\ MIN} \leq \sum_{bm} Y_{b2}^{Bioref} F_{bm,b2}^{Biomass} \leq F_{b2}^{Biomass\ MAX2} \\ C_{b2}^{CapBioref} = F_{b2}^{CostBioref} + \sum_{bm} \left(V_{bm,b2}^{CostBioref} \cdot (F_{bm,b2}^{Biomass})^{b2} \right) \end{array} \right], \forall b2$$

Es importante señalar que la disyunción anterior debe ser reformulada como ecuaciones algebraicas para incluir en el modelo matemático. En este sentido, la materia prima procesada en una nueva biorefinería $b2$ ($F_{bm,b2}^{Biomass}$) debe ser mayor o igual

que el límite de procesamiento de la biorefinería ($F_{b2}^{Biomass\ MIN}$) multiplicado por una variable binaria para definir si la nueva biorefinería es instalada (y_{b2}^{Bioref}); y además debe ser menor a la capacidad de procesamiento de la biorefinería ($F_{b2}^{Biomass\ MAX2}$) multiplicada por la misma variable binaria (y_{b2}^{Bioref}).

$$F_{b2}^{Biomass\ MIN} \cdot y_{b2}^{Bioref} \leq \sum_{bm} F_{bm,b2}^{Biomass} \leq F_{b2}^{Biomass\ MAX2} \cdot y_{b2}^{Bioref} \quad , \forall b2 \quad (3.18)$$

Además, es necesario definir la ecuación para el costo de capital de las nuevas biorefinerías, que es un costo fijo ($F_{b2}^{CostBioref}$) multiplicado por la variable binaria para definir la existencia de nuevas biorefinerías (y_{b2}^{Bioref}) más un costo variable unitario ($V_{bm,b2}^{CostBioref}$) multiplicado por la cantidad de material prima que es procesada ($F_{bm,b2}^{Biomass}$) elevado a un exponente de capacidad (γ_{b2}^{Bioref}) para considerar las economías de escala. Es importante señalar que los costos de capital deben ser anualizados por un factor (K_F).

$$C_{b2}^{CapBioref} = K_F \cdot \left(F_{b2}^{CostBioref} \cdot y_{b2}^{Bioref} + \sum_{bm} \left(V_{bm,b2}^{CostBioref} \cdot \left(F_{bm,b2}^{Biomass} \right)^{\gamma_{b2}^{Bioref}} \right) \right) \quad , \forall b2 \quad (3.19)$$

3.2.1.2.8 Costo de operación de biorefinerías

El costo de operación para las biorefinerías ($C_b^{opBioref}$) viene dado por la suma del flujo de biomasa procesada ($F_{bm,b}^{Biomass}$) multiplicada por un costo de operación unitario ($OC_{bm,b}^{Bioref}$), considerando también los días operacionales (H_Y).

$$C_b^{opBioref} = H_Y \cdot \sum_{bm} OC_{bm,b}^{Bioref} \cdot F_{bm,b}^{Biomass} \quad , \forall b \quad (3.20)$$

3.2.1.2.9 Costo de producción de biomasa para las biorefinerías

Adicionalmente, el modelo considera el costo de producción de biomasa ($Cost_b^{Biomass-Growth}$). Este costo es agregado a las biorefinerías porque la biomasa es la principal materia prima para este tipo de plantas de procesamiento. De esta manera,

este costo es igual a la suma de un costo unitario de producción de biomasa ($UC_{bm,b,m}^{Biomass-Growth}$) multiplicado por la cantidad total de biomasa ($F_{bm,b}^{Biomass}$).

$$Cost_b^{Biomass-Growth} = \sum_{bm} \sum_m UC_{bm,b,m}^{Biomass-Growth} \cdot (H_Y \cdot F_{bm,b}^{Biomass}), \forall b \quad (3.21)$$

3.2.1.2.10 Ingresos por la venta de productos de biorefinerías

Además, el modelo matemático considera los ingresos económicos por la venta de producto de biorefinerías. Entonces, los ingresos por la venta de bioproductos ($Revenue_b^{sold-prod-bioref}$) es igual a la suma de un costo unitario de bioproductos ($UC_{p2,b}^{revenue-prod-bioref}$) multiplicado por el flujo de producto vendido, que es el flujo total de producto producido en cualquier biorefinería ($F_{p2,b}^{product-bioref}$). Es importante notar que los días de operación se deben tomar en cuenta para obtener una base anual.

$$Revenue_b^{sold-prod-bioref} = \sum_{p2} UC_{p2,b}^{revenue-prod-bioref} \cdot (H_Y \cdot F_{p2,b}^{product-bioref}), \forall b \quad (3.22)$$

3.2.1.2.11 Ganancia total de las biorefinerías

Es necesario contemplar la ganancia neta anual de las biorefinerías ($Profit^{Bioref}$). La ganancia total de las biorefinerías es igual a la suma de los ingresos totales por la venta de bioproductos ($Revenue_b^{sold-prod-bioref}$), menos la suma de los costos de producción de biomasa ($Cost_b^{Biomass-Growth}$), los costos de operación ($C_b^{opBioref}$) y de capital ($C_{b2}^{CapBioref}$) de las plantas de procesamiento, costo de transporte de materias primas de los campos de cultivo a las biorefinerías ($C_{b1}^{Trans-biomass-exis}$) y ($C_{b2}^{Trans-biomass-new}$), y el costo de transporte de productos de las biorefinerías a los centros de distribución ($C_{b1}^{Trans-product-bioref-exis}$) y ($C_{b2}^{Trans-product-bioref-new}$) y los costos por sus emisiones ($CEmis_b^{Bioref} \cdot Emcap_b^{Biorefinery}$), los cuales son definidos de manera similar a los costos por emisiones de refinerías.

$$\begin{aligned}
 Profit^{Bioref} = & \sum_b Revenue_b^{sold-prod-bioref} - \sum_b Cost_b^{Biomass-Growth} - \sum_{b2} C_{b2}^{CapBioref} - \sum_b C_b^{opBioref} - \sum_{b1} C_{b1}^{Trans-biomass-exis} \\
 & - \sum_{b1} C_{b1}^{Trans-product-bioref-exis} - \sum_{b2} C_{b2}^{Trans-biomass-new} - \sum_{b2} C_{b2}^{Trans-product-bioref-new} \\
 & - \sum_b CEmis_b^{Bioref} \cdot Emcap_b^{Biorefinery}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Una ecuación importante es la restricción para limitar la cantidad de emisiones que las Eco-industrias forestales capturan a las biorefinerías ($Emcap_b^{Biorefinery}$), ya que las emisiones capturadas deberán ser menores a las emisiones totales de las biorefinerías (Em_b^{Bioref}).

$$Emcap_b^{Biorefinery} \leq Em_b^{Bioref}, \forall b \tag{3.24}$$

3.2.1.3 Ecuaciones para Eco-industrias forestales

3.2.1.3.1 Costo de operación para Eco-industrias forestales

El costo de operación para eco-industrias forestales ($C_e^{opEcoind}$) es igual al costo de operación unitario ($OC_e^{opEcoind}$) multiplicado por el número total de árboles de cada eco-industria (NT_e).

$$C_e^{opEcoind} = OC_e^{opEcoind} \cdot NT_e, \forall e \tag{3.25}$$

3.2.1.3.2 Límites para Eco-industrias forestales

La capacidad de las eco-industrias está limitada por la disponibilidad de tierra destinada a plantaciones forestales. Por lo tanto, es necesario tener límites para la tierra utilizada en las eco-industrias implementadas, así que la cantidad total de árboles de cada eco-industria (NT_e) multiplicada por el área de tierra necesaria para cada árbol ($Uland_e$) representa el área de tierra necesaria para cada eco-industria, y esta área de tierra necesaria es menor al límite máximo de tierra disponible ($Dland_e^{Max}$) multiplicado por una variable binaria que define la existencia de eco-industrias (y_e^{Ecoind}) y es mayor que el límite mínimo de tierra disponible ($Dland_e^{Min}$) multiplicado por la misma variable

binaria para la existencia de eco-industrias, de esta manera, la ecuación necesaria se muestra a continuación:

$$Dland_e^{Max} \cdot y_e^{Ecoind} \geq NT_e \cdot Uland_e \geq Dland_e^{Min} \cdot y_e^{Ecoind} , \forall e \quad (3.26)$$

3.2.1.3.3 Costo de capital para Eco-industrias

El costo de capital de las eco-industrias se define por un costo fijo $(F_e^{CostEco})$ multiplicado por la variable binaria para la existencia de las eco-industrias, un costo variable $(V_e^{CostEco})$ multiplicado por el número total de árboles por eco-industria y un exponente de capacidad $(NT_e)^{y_e^{Ecoind}}$, además K_F que es el factor utilizado para anualizar la inversión; como sigue:

$$C_e^{CapEcoind} = K_F \cdot \left(F_e^{CostEco} \cdot y_e^{Ecoind} + V_e^{CostEco} (NT_e)^{y_e^{Ecoind}} \right) , \forall e \quad (3.27)$$

3.2.1.3.4 Costo total de las Eco-industrias

La suma de los costos de operación y de capital de eco-industrias representa el costo total de la siguiente manera:

$$C_e^{TotalEcoind} = C_e^{opEcoind} + C_e^{CapEcoind} , \forall e \quad (3.28)$$

3.2.1.3.5 Ganancia de las Eco-industrias

La ganancia de las eco-industrias depende de los ingresos por la captura de las emisiones de refinerías y biorefinerías, así como el costo asociado a la instalación y operación de dichas eco-industrias; por tanto, la ecuación es presentada como sigue en función del costo de emisiones de refinerías $(CEmis_i^{Ref})$ y biorefinerías $(CEmis_b^{Bioref})$ y la cantidad de esas emisiones capturadas por las eco-industrias $(Emcap_i^{Refinery})$ y $(Emcap_b^{Biorefinery})$ menos el costo total de eco-industrias $(C_e^{TotalEcoind})$:

$$Profit^{Ecoind} = \sum_i CEmis_i^{Ref} \cdot Emcap_i^{Refinery} + \sum_b CEmis_b^{Bioref} \cdot Emcap_b^{Biorefinery} - \sum_e C_e^{TotalEcoind} \quad (3.29)$$

3.2.1.4 Ecuaciones para costo de transporte

3.2.1.4.1 Costo de transporte de petróleo desde pozos a refinerías existentes

La actividad de transporte se considera para los distintos materiales y las diferentes entidades de la cadena de suministro. De esta manera, se toma en cuenta el flujo de petróleo desde los pozos petroleros hasta las refinerías existentes. Entonces, el costo de transporte de petróleo en este trayecto ($C_{il}^{Trans-oil-exis}$) es igual al costo de transporte unitario del petróleo ($UC_{o,il}^{pumping-oil-exist}$) multiplicado por la cantidad de petróleo distribuido de pozos a refinerías existentes ($f_{o,il}^{oil1}$). Es importante notar que hay varios tipos de transporte para el petróleo como carros tanque, ductos o buques tanque; y estos tipos son definidos previamente de acuerdo con la localización de las refinerías y los pozos petroleros.

$$C_{il}^{Trans-oil-exis} = \sum_o UC_{o,il}^{pumping-oil-exist} \cdot (H_Y \cdot f_{o,il}^{oil1}) \quad , \forall il \quad (3.30)$$

3.2.1.4.2 Costo de transporte de productos distribuidos desde refinerías existentes a centros de distribución

El costo de transporte de productos desde refinerías ($C_{il}^{Trans-products-ref-exis}$) es igual a la suma del costo de transporte unitario de productos ($UC_{p1,il,j}^{trans-product-ref}$) multiplicado por el flujo total de producto transportado de las refinerías a los centros de distribución ($f_{p1,il,j}^{product-ref1}$) así como los días de operación (H_Y) para obtener la cantidad anual de producto que es transportado.

$$C_{il}^{Trans-products-ref-exis} = \sum_{p1} \sum_j UC_{p1,il,j}^{trans-product-ref} \cdot (H_Y \cdot f_{p1,il,j}^{product-ref1}) \quad , \forall il \quad (3.31)$$

3.2.1.4.3 Costo de transporte de petróleo desde pozos petroleros a nuevas refinerías

Por otro lado, considera la distribución del petróleo de pozos a nuevas refinerías. Es importante notar que hay algunas diferencias entre el transporte a refinerías existentes y a nuevas refinerías, ya que para el transporte a nuevas refinerías se

necesita la instalación de infraestructura. Por lo tanto, el costo de capital para transporte de petróleo de pozos a nuevas refinerías ($C_{i2}^{CapTrans-oil}$) es igual a la suma del costo fijo ($F_{o,i2}^{cost-pip-oil}$) multiplicado por una variable binaria que define la existencia la infraestructura de transporte ($y_{o,i2}^{pip-oil-ref}$), más un costo variable ($V_{o,i2}^{cost-oil}$) multiplicado por el flujo total de petróleo transportado ($f_{o,i2}^{oil1}$) elevado al exponente de capacidad ($\gamma_{i2}^{trans-ref1}$). También, el costo de capital considera un factor de anualización (K_F).

$$C_{i2}^{CapTrans-oil} = \sum_o K_F \cdot \left(F_{o,i2}^{cost-pip-oil} \cdot y_{o,i2}^{pip-oil-ref} + V_{o,i2}^{cost-oil} \cdot (f_{o,i2}^{oil1})^{\gamma_{i2}^{trans-ref1}} \right), \forall i2 \quad (3.32)$$

Adicionalmente, el modelo considera otro costo de transporte para petróleo, el cual depende exclusivamente del flujo de petróleo transportado. Este costo de transporte ($C_{i2}^{opTrans-oil}$) es igual a un costo unitario ($UC_{o,i2}^{pumping-oil-new}$) multiplicado por los días de operación (H_Y) y el flujo de petróleo transportado de pozos a nuevas refinerías ($f_{o,i2}^{oil1}$).

$$C_{i2}^{opTrans-oil} = \sum_o UC_{o,i2}^{pumping-oil-new} \cdot (H_Y \cdot f_{o,i2}^{oil1}), \forall i2 \quad (3.33)$$

Una vez que ambos costos de transporte anteriores son definidos, es posible obtener el costo total de transporte de petróleo a nuevas refinerías ($C_{i2}^{Trans-oil-new}$) que es igual a la suma del costo de capital de la infraestructura de transporte ($C_{i2}^{CapTrans-oil}$) más el costo de transporte por la cantidad de petróleo transportado a nuevas refinerías ($C_{i2}^{opTrans-oil}$).

$$C_{i2}^{Trans-oil-new} = C_{i2}^{CapTrans-oil} + C_{i2}^{opTrans-oil}, \forall i2 \quad (3.34)$$

El flujo de petróleo transportado desde pozos petroleros a nuevas refinerías es limitado entre un límite mínimo y uno máximo, ya que la construcción de nueva infraestructura de transporte de petróleo podría no ser económicamente atractiva si la cantidad de petróleo transportado es menor que un límite mínimo o mayor a un límite

máximo. Por lo tanto, el flujo de petróleo transportado ($f_{o,i2}^{oil1}$) es menor que un límite máximo para el transporte a nuevas refinerías ($f_{o,i2}^{oil-MAX}$) multiplicado por una variable binaria que define si la actividad de transporte se realiza ($y_{o,i2}^{pip-oil-ref}$). Así mismo, el flujo de petróleo transportado ($f_{o,i2}^{oil1}$) es mayor que un límite mínimo para el transporte a nuevas refinerías ($f_{o,i2}^{oil-MIN}$) multiplicado por la misma variable binaria para decidir si el transporte de petróleo se lleva a cabo.

$$f_{o,i2}^{oil-MIN} \cdot y_{o,i2}^{pip-oil-ref} \leq f_{o,i2}^{oil1} \leq f_{o,i2}^{oil-MAX} \cdot y_{o,i2}^{pip-oil-ref} \quad , \quad \forall o, \forall i2 \quad (3.35)$$

3.2.1.4.4 Costo de transporte de productos distribuidos desde nuevas refinerías a centros de distribución

Las nuevas refinerías son capaces de producir varios productos a partir del petróleo y los productos producidos se distribuyen a diferentes centros de distribución por lo cual hay un costo asociado a esta actividad. Este costo de transporte ($C_{i2}^{optrans-products-ref}$) está dado por la suma de un costo de transporte unitario ($UC_{p1,i2,j}^{trans-prod-ref-new}$) multiplicado por los días operacionales (H_Y) y el flujo transportado ($f_{p1,i2,j}^{product-ref1}$).

$$C_{i2}^{optrans-products-ref} = \sum_{p1} \sum_j UC_{p1,i2,j}^{trans-prod-ref-new} \cdot (H_Y \cdot f_{p1,i2,j}^{product-ref1}) \quad , \quad \forall i2 \quad (3.36)$$

Además, debido a que el enfoque matemático toma en cuenta el costo de capital para la instalación de la infraestructura de transporte necesaria ($C_{i2}^{CapTrans-products-ref}$) para el transporte de productos en caso de nuevas refinerías a centros de distribución. Este costo de capital es igual al costo fijo ($F_{p1,i2,j}^{cost-pip-prod-ref}$) multiplicado por la variable binaria para transporte ($y_{p1,i2,j}^{pip-product-ref}$) más un costo variable ($V_{p1,i2,j}^{cost-prod-ref}$) multiplicado por el flujo de productos distribuidos ($f_{p1,i2,j}^{product-ref1}$) elevado a un exponente de capacidad ($\gamma_{i2}^{trans-ref2}$).

$$C_{i2}^{CapTrans-products-ref} = \sum_{p1} \sum_j K_F \cdot \left(F_{p1,i2,j}^{cost-pip-prod-ref} \cdot y_{p1,i2,j}^{pip-product-ref} + V_{p1,i2,j}^{cost-prod-ref} \cdot (f_{p1,i2,j}^{product-ref1})^{\gamma_{i2}^{trans-ref2}} \right) \quad , \quad \forall i2 \quad (3.37)$$

Subsecuentemente, el costo total de transporte de productos desde nuevas refinерías a centros de distribución $C_{i2}^{Trans-products-ref-new}$ es igual al costo de operación del transporte $C_{i2}^{optrans-products-ref}$, el cual, debido a que en su mayoría se lleva a cabo por medio de ductos, considera principalmente el costo de operación del bombeo, más el costo de capital por la nueva infraestructura de transporte $C_{i2}^{CapTrans-products-ref}$.

$$C_{i2}^{Trans-products-ref-new} = C_{i2}^{CapTrans-products-ref} + C_{i2}^{optrans-products-ref}, \forall i2 \quad (3.38)$$

La formulación matemática considera algunos límites para definir si se lleva a cabo el transporte de productos de las nuevas refinерías a los centros de distribución, para lo cual se incluye una variable binaria para decidir si se realiza el transporte. Por lo tanto, el flujo de producto transportado $(f_{p1,i2,j}^{product-ref1})$ es menor que el límite máximo de transporte $(f_{p1,i2,j}^{product-ref-MAX})$ multiplicado por la variable binaria mencionada $(y_{p1,i2,j}^{pip-product-ref})$ y mayor que el límite mínimo de transporte $(f_{p1,i2,j}^{product-ref-MIN})$ multiplicado por la misma variable binaria.

$$f_{p1,i2,j}^{product-ref-MIN} \cdot y_{p1,i2,j}^{pip-product-ref} \leq f_{p1,i2,j}^{product-ref1} \leq f_{p1,i2,j}^{product-ref-MAX} \cdot y_{p1,i2,j}^{pip-product-ref}, \forall p1, \forall i2, \forall j \quad (3.39)$$

3.2.1.4.5 Costo de transporte de biomasa a biorefinerías existentes

La biomasa se transporta desde los campos de producción hasta las biorefinerías. Para el caso de biorefinerías existentes, el costo de transporte $(C_{b1}^{Trans-biomass-exis})$ es obtenido por la suma de un costo de transporte unitario de biomasa $(UC_{bm,m,b1}^{Trans-biomass-exist})$ multiplicado por la cantidad de biomasa transportada diariamente $(f_{bm,m,b1}^{biomass1})$ así como los días operacionales (H_Y) .

$$C_{b1}^{Trans-biomass-exis} = \sum_m \sum_{bm} UC_{bm,m,b1}^{Trans-biomass-exist} \cdot (H_Y \cdot f_{bm,m,b1}^{biomass1}), \forall b1 \quad (3.40)$$

3.2.1.4.6 Costo de transporte de productos de biorefinerías existentes

Los bioproductos son distribuidos desde las biorefinerías hacia los centros de distribución. Entonces, el costo de transporte desde biorefinerías existentes ($C_{b1}^{Trans-product-bioref-exis}$) es igual a la suma de un costo de transporte unitario para bioproductos ($UC_{p2,b1,j}^{Trans-prod-bior-exis}$) multiplicada por la cantidad de bioproductos transportados diariamente ($f_{p2,b1,j}^{product-bioref1}$) y los días operacionales (H_Y).

$$C_{b1}^{Trans-product-bioref-exis} = \sum_{p2} \sum_j UC_{p2,b1,j}^{Trans-prod-bior-exis} \cdot (H_Y \cdot f_{p2,b1,j}^{product-bioref1}) , \forall b1 \quad (3.41)$$

3.2.1.4.7 Costo de transporte de biomasa a nuevas biorefinerías

El costo de transporte de biomasa desde campos de producción hacia nuevas biorefinerías contempla un costo de capital por nueva infraestructura necesaria (nuevas carreteras y caminos) ($C_{b2}^{CapTrans-biomass}$) y un costo de operación por transporte ($C_{b2}^{opTrans-biomass}$). El primero es igual a un costo de transporte fijo ($F_{bm,m,b2}^{cost-trans-biomass}$) multiplicado por una variable binaria para decidir si es necesaria nueva infraestructura ($y_{bm,m,b2}^{trans-biomass}$) más un costo variable ($V_{bm,m,b2}^{cost-trans-biomass}$) multiplicado por la cantidad de biomasa transportada ($f_{bm,m,b2}^{biomass1}$) elevada a un exponente de capacidad ($\gamma_{b2}^{trans-bior1}$). La segunda es igual a la suma de un costo de transporte unitario de biomasa desde campos hasta nuevas biorefinerías ($UC_{bm,m,b2}^{Trans-biomass-new}$) multiplicada por la cantidad anual de biomasa transportada entre esas entidades de la cadena de suministro ($H_Y \cdot f_{bm,m,b2}^{biomass1}$). Consecuentemente, el costo total de transporte de biomasa desde los campos a las nuevas biorefinerías ($C_{b2}^{Trans-biomass-new}$) es igual a la suma del costo de capital ($C_{b2}^{CapTrans-biomass}$) y al costo de operación ($C_{b2}^{opTrans-biomass}$).

$$C_{b2}^{CapTrans-biomass} = \sum_m \sum_{bm} K_F \cdot \left(F_{bm,m,b2}^{cost-trans-biomass} \cdot y_{bm,m,b2}^{trans-biomass} + V_{bm,m,b2}^{cost-trans-biomass} \cdot (f_{bm,m,b2}^{biomass1})^{\gamma_{b2}^{trans-bior1}} \right) , \forall b2 \quad (3.42)$$

$$C_{b2}^{opTrans-biomass} = \sum_m \sum_{bm} UC_{bm,m,b2}^{Trans-biomass-new} \cdot (H_Y \cdot f_{bm,m,b2}^{biomass1}) \quad , \forall b2 \quad (3.43)$$

$$C_{b2}^{Trans-biomass-new} = C_{b2}^{CapTrans-biomass} + C_{b2}^{opTrans-biomass} \quad , \forall b2 \quad (3.44)$$

Cada una de las variables binarias para la actividad de transporte de biomasa desde campos a nuevas biorefinerías ($y_{bm,m,b2}^{trans-biomass}$) es activada cuando la cantidad de biomasa transportada de los campos de suministro a nuevas biorefinerías ($f_{bm,m,b2}^{biomass1}$), la cual se encuentra dentro de un límite máximo ($f1_{bm,m,b2}^{biomass-MAX}$) y un límite mínimo ($f1_{bm,m,b2}^{biomass-MIN}$). En consecuencia, el transporte de biomasa entre campos de suministro y nuevas biorefinerías ($f_{bm,m,b2}^{biomass1}$) es mayor que el límite mínimo multiplicado por la variable binaria asociada al transporte de biomasa y menor que el límite máximo multiplicado por la misma variable binaria.

$$f1_{bm,m,b2}^{biomass-MIN} \cdot y_{bm,m,b2}^{trans-biomass} \leq f_{bm,m,b2}^{biomass1} \leq f1_{bm,m,b2}^{biomass-MAX} \cdot y_{bm,m,b2}^{trans-biomass} \quad , \forall bm, \forall m, \forall b2 \quad (3.45)$$

3.2.1.4.8 Costo de transporte de productos de nuevas biorefinerías

El costo total de transporte de bioproductos desde nuevas biorefinerías a centros de distribución ($C_{b2}^{Trans-product-bioref-new}$) incluye el costo de capital para nueva infraestructura (ductos y carreteras) ($C_{b2}^{CapTrans-product-bioref}$) y el costo de operación por transporte ($C_{b2}^{opTrans-product-bioref}$). En este sentido, el costo de capital está dado por un costo fijo ($F_{p2,b2,j}^{cost-trans-prod-bioref}$) multiplicado por una variable binaria para esta actividad ($y_{p2,b2,j}^{trans-prod-bioref}$), más un costo variable ($v_{p2,b2,j}^{cost-trans-prod-bioref}$) multiplicado por la cantidad de producto transportado ($f_{p2,b2,j}^{product-bioref1}$) elevado a un exponente de capacidad ($\gamma_{b2}^{trans-bior2}$). Es importante destacar que los costos de capital se deben anualizar por un factor (K_F). Adicionalmente, el costo operacional de transporte de productos es igual costo de

operación unitario $(UC_{p2,b2,j}^{Trans-prod-bior-new})$ multiplicado por la cantidad anual de bioproductos transportados $(H_Y \cdot f_{p2,b2,j}^{product-bioref1})$.

$$C_{b2}^{CapTrans-product-bioref} = \sum_{p2} \sum_j K_F \cdot \left(F_{p2,b2,j}^{cost-trans-prod-bioref} \cdot y_{p2,b2,j}^{trans-prod-bioref} + V_{p2,b2,j}^{cost-trans-prod-bioref} \cdot (f_{p2,b2,j}^{product-bioref1})^{y_{b2}^{trans-bior2}} \right), \forall b2 \quad (3.46)$$

$$C_{b2}^{opTrans-product-bioref} = \sum_{p2} \sum_j UC_{p2,b2,j}^{Trans-prod-bior-new} \cdot (H_Y \cdot f_{p2,b2,j}^{product-bioref1}), \forall b2 \quad (3.47)$$

$$C_{b2}^{Trans-product-bioref-new} = C_{b2}^{CapTrans-product-bioref} + C_{b2}^{opTrans-product-bioref}, \forall b2 \quad (3.48)$$

Cabe señalar que la variable binaria para el transporte de bioproductos es activada cuando la cantidad de producto transportado es menor que el límite máximo $(f_{p2,b2,j}^{product-bioref-MAX})$ y mayor que el límite mínimo $(f_{p2,b2,j}^{product-bioref-MIN})$. Esto es modelado en la siguiente restricción:

$$f_{p2,b2,j}^{product-bioref-MIN} \cdot y_{p2,b2,j}^{trans-prod-bioref} \leq f_{p2,b2,j}^{product-bioref1} \leq f_{p2,b2,j}^{product-bioref-MAX} \cdot y_{p2,b2,j}^{trans-prod-bioref}, \forall p2, \forall b2, \forall j \quad (3.49)$$

3.2.1.5 Ecuaciones para emisiones por actividad e instalaciones

3.2.1.5.1 Emisiones por la extracción de petróleo

Las emisiones de CO₂ equivalente por extracción de petróleo $(E_i^{oil-ext})$ son iguales a la suma de las emisiones unitarias de CO₂ equivalente por extracción de petróleo $(\beta_{o,i}^{co_2-ext})$ multiplicadas por el flujo de petróleo obtenido del pozo petrolero $(f_{o,i}^{oil1})$ y los días operacionales (H_Y) :

$$E_i^{oil-ext} = \sum_o \beta_{o,i}^{co_2-ext} \cdot (H_Y \cdot f_{o,i}^{oil1}), \forall i \quad (3.50)$$

3.2.1.5.2 Emisiones por la refinación de petróleo

Las emisiones de CO₂ equivalente por la refinación de petróleo $(E_i^{product-ref})$ son igual a la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente por la refinación $(\beta_{p1,i}^{co_2-product-ref})$

multiplicada por el flujo total de productos obtenidos $(F_{p1,i}^{product-ref})$ y los días operacionales (H_Y) :

$$E_i^{product-ref} = \sum_{p1} \beta_{p1,i}^{co_2-product-ref} \cdot (H_Y \cdot F_{p1,i}^{product-ref}), \forall i \quad (3.51)$$

3.2.1.5.3 Emisiones por el transporte de productos de refinerías a centros de distribución

Las emisiones de CO₂ equivalente por transporte de productos de petróleo $(E_i^{trans-product-ref})$ son iguales a la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente producidas por el transporte de productos desde las refinerías hacia los centros de distribución $(\beta_{p1,i,j}^{co_2-trans-product-ref})$ multiplicada por la cantidad de productos distribuidos, tomando en cuenta los días operacionales para conseguir una base anual $(H_Y \cdot f_{p1,i,j}^{product-ref1})$. La ecuación es enunciada enseguida:

$$E_i^{trans-product-ref} = \sum_j \sum_{p1} \beta_{p1,i,j}^{co_2-trans-product-ref} \cdot (H_Y \cdot f_{p1,i,j}^{product-ref1}), \forall i \quad (3.52)$$

3.2.1.5.4 Emisiones por el uso de productos de petróleo como combustible

Además, las emisiones de CO₂ equivalente producidas por la quema de combustibles fósiles $(E_i^{use-product-ref})$, considerando que la totalidad de combustibles obtenidos son quemados, están en función de la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente producidas por la quema de combustibles $(\beta_{p1,i}^{co_2-use-product-ref})$, el flujo total de productos petrolíferos $(F_{p1,i}^{product-ref})$ y los días operacionales para tener una base anual (H_Y) ; como se muestra a continuación:

$$E_i^{use-product-ref} = \sum_{p1} \beta_{p1,i}^{co_2-use-product-ref} \cdot (H_Y \cdot F_{p1,i}^{product-ref}), \forall i \quad (3.53)$$

3.2.1.5.5 Emisiones de CO₂ secuestrado por el crecimiento de la biomasa

Vale la pena señalar que parte de las emisiones de CO₂ son capturadas cuando los cultivos de biomasa están creciendo en los campos; por lo tanto, las emisiones de

CO₂ capturadas por el crecimiento de biomasa ($NE_b^{Biomass-Growth}$) son iguales a la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente por la producción de biomasa ($\gamma_{bm,b}^{CO_2-Biomass-Growth}$) multiplicada por la cantidad total de biomasa en biorefinerías ($F_{bm,b}^{Biomass}$) y los días operacionales (H_Y).

$$NE_b^{Biomass-Growth} = \sum_{bm} \gamma_{bm,b}^{CO_2-Biomass-Growth} \cdot (H_Y \cdot F_{bm,b}^{Biomass}), \forall b \quad (3.54)$$

3.2.1.5.6 Emisiones por el transporte de biomasa

En el caso de las emisiones de CO₂ por transporte de biomasa ($E_b^{Biomass-trans}$), estas toman en cuenta la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente por transporte de biomasa ($\gamma_{bm,m,b}^{CO_2-Biomass-trans}$) multiplicada por la cantidad de biomasa que es distribuida ($f_{bm,m,b}^{Biomass1}$) y los días operacionales (H_Y).

$$E_b^{Biomass-trans} = \sum_m \sum_{bm} \gamma_{bm,m,b}^{CO_2-Biomass-trans} \cdot (H_Y \cdot f_{bm,m,b}^{Biomass1}), \forall b \quad (3.55)$$

3.2.1.5.7 Emisiones derivadas de la producción en biorefinerías

Las emisiones de CO₂ debidas a la producción en biorefinerías ($E_b^{Bioref-product}$) son iguales a la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente por la producción de bioproductos ($\gamma_{p2,bm,b}^{CO_2-Bioref-prod}$) multiplicada por la cantidad de biomasa total en biorefinerías ($F_{bm,b}^{Biomass}$) y los días operacionales.

$$E_b^{Bioref-product} = \sum_{bm} \sum_{p2} \gamma_{p2,bm,b}^{CO_2-Bioref-prod} \cdot (H_Y \cdot F_{bm,b}^{Biomass}), \forall b \quad (3.56)$$

3.2.1.5.8 Emisiones por el transporte de bioproductos

Otras emisiones de CO₂ consideradas son las emisiones producidas por el transporte de bioproductos desde biorefinerías a centros de distribución ($E_b^{trans-prod-bioref}$), involucra la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente para transporte de

bioproductos $(\gamma_{p2,b,j}^{CO_2\text{-trans-prod-bioref}})$, la cantidad de bioproductos distribuidos a los centros de distribución $(f_{p2,b,j}^{product-Bioref1})$ y los días operacionales. La ecuación se muestra a continuación:

$$E_b^{trans-prod-bioref} = \sum_j \sum_{p2} \gamma_{p2,b,j}^{CO_2\text{-trans-prod-bioref}} \cdot (H_Y \cdot f_{p2,b,j}^{product-Bioref1}), \forall b \quad (3.57)$$

3.2.1.5.9 Emisiones por el uso de bioproductos como biocombustibles

En caso de emisiones de CO₂ derivadas del uso de bioproductos $(E_b^{use-prod-bioref})$ se considera que la totalidad de producto obtenido es utilizado. De tal manera que las emisiones toman en cuenta la suma de emisiones unitarias de CO₂ equivalente por la quema de bioproductos $(\gamma_{p2,b}^{CO_2\text{-use-prod-bioref}})$, el flujo total de bioproductos $(F_{p2,b}^{product-Bioref})$ y los días operacionales, como sigue:

$$E_b^{use-prod-bioref} = \sum_{p2} \gamma_{p2,b}^{CO_2\text{-use-prod-bioref}} \cdot (H_Y \cdot F_{p2,b}^{product-Bioref}), \forall b \quad (3.58)$$

3.2.1.5.10 Emisiones totales de refinerías

Las emisiones totales de CO₂ de refinerías $(Em_i^{Refinery})$ incluyen las emisiones producidas en cada una de las actividades involucradas en las refinerías; las cuales son emisiones de CO₂ por la extracción de petróleo $(E_i^{oil-ext})$, emisiones por la refinación de petróleo $(E_i^{product-ref})$, emisiones por transporte de productos petrolíferos $(E_i^{trans-product-ref})$ y emisiones de CO₂ obtenidas por la quema de combustibles fósiles $(E_i^{use-product-ref})$.

$$Em_i^{Refinery} = E_i^{oil-ext} + E_i^{product-ref} + E_i^{trans-product-ref} + E_i^{use-product-ref}, \forall i \quad (3.59)$$

3.2.1.5.11 Emisiones totales de biorefinerías

Las emisiones totales de CO₂ de biorefinerías (Em_b^{Bioref}) incluyen, de la misma forma que en las refinerías, las emisiones por cada actividad involucrada en biorefinerías, tal como emisiones por transporte de biomasa $(E_b^{Biomass-trans})$, emisiones

debido a producción en biorefinerías ($E_b^{Bioref-product}$), emisiones producidas por el transporte de bioproductos a centros de distribución ($E_b^{trans-prod-bioref}$), emisiones derivadas del uso de bioproductos ($E_b^{use-prod-bioref}$) y las emisiones capturadas por el crecimiento de la biomasa en campos de cultivo ($NE_b^{Biomass-Growth}$). La ecuación se representa en seguida:

$$Em_b^{Bioref} = E_b^{Biomass-trans} + E_b^{Bioref-product} + E_b^{trans-prod-bioref} + E_b^{use-prod-bioref} - NE_b^{Biomass-Growth}, \forall b \quad (3.60)$$

3.2.1.5.12 Emisiones de CO₂ capturadas por las Eco-industrias forestales

Por otro lado, las emisiones de CO₂ capturadas por las eco-industrias forestales (Em_e^{Ecoind}) están dadas por la cantidad unitaria de emisiones de CO₂ por eco-industria que es un factor de captura de CO₂ del árbol ($\gamma_e^{EmissionEcoind}$) multiplicado por el número total de árboles por eco-industria (NT_e).

$$Em_e^{Ecoind} = \gamma_e^{EmissionEcoind} \cdot NT_e, \forall e \quad (3.61)$$

Es importante notar que la suma de emisiones de CO₂ capturadas por eco-industrias son iguales a la suma de emisiones de CO₂ que las eco-industrias capturan para refinerías ($Emcap_i^{Refinery}$) más la suma de las emisiones que capturan para biorefinerías ($Emcap_b^{Biorefinery}$).

$$\sum_e Em_e^{Ecoind} = \sum_i Emcap_i^{Refinery} + \sum_b Emcap_b^{Biorefinery} \quad (3.62)$$

3.2.1.6 Ecuaciones para demanda de productos

3.2.1.6.1 Demanda de diésel

$$H_Y \cdot Demand_j^{Diesel} = \sum_i \sum_{p1} H_Y \cdot f_{p1,i,j}^{product-ref1} + \sum_b \sum_{p2} H_Y \cdot f_{p2,b,j}^{product-bioref1}, \forall j \quad (3.63)$$

3.2.1.6.2 Demanda de gasolina

$$H_Y \cdot Demand_j^{Gasolina} = \sum_i \sum_{p1} H_Y \cdot f_{p1,i,j}^{product-ref1} + \sum_b \sum_{p2} H_Y \cdot f_{p2,b,j}^{product-bioref1}, \forall j \quad (3.64)$$

3.2.1.7 Ecuaciones para cálculo de empleos generados

3.2.1.7.1 Empleos generados en refinerías nuevas

Los empleos en refinerías incluyen los empleos por procesamiento e instalación solo en nuevas refinerías, es importante mencionar que los empleos por transporte ya que están dados en la red de transporte para refinerías existentes.

$$Jobs^{Refinery} = H_Y \cdot \sum_{i2} JobsUnit_{i2}^{ref} \cdot (f_{i2}^{oil}) \quad (3.65)$$

3.2.1.7.2 Empleos generados en biorefinerías nuevas

Además, los empleos en biorefinerías incluyen los empleos generados para plantaciones de biomasa, transporte de biomasa, instalación y procesamiento de nuevas biorefinerías.

$$Jobs^{Bioref} = H_Y \cdot \sum_{bm,m} JobsUnit_{bm,m}^{biomplat} \cdot F_{bm,m}^{Biomass-field} + H_Y \cdot \sum_{bm,m,b} JobsUnit_{bm,m,b}^{biomtrans} \cdot f_{bm,m,b}^{Biomass} + H_Y \cdot \sum_{bm,b} JobsUnit_{bm,b}^{biombioref} \cdot F_{bm,b}^{Biomass} \quad (3.66)$$

3.2.1.7.3 Empleos generados en eco-industrias forestales

Con respecto a las eco-industrias forestales, los empleos considerados corresponden a las personas necesarias para el cuidado de las plantaciones forestales.

$$Jobs^{Ecoind} = \sum_e JobsUnit_e^{Ecoind} \cdot NT_e \quad (3.67)$$

3.2.1.8 Funciones objetivo

3.2.1.8.1 Función objetivo económica

La función objetivo económica considera la maximización de la ganancia total (EOF). La ganancia total involucra la ganancia de refinerías ($Profit^{Refinery}$), biorefinerías ($Profit^{Bioref}$) y eco-industrias ($Profit^{Ecoind}$).

$$Max \{ EOF = Profit^{Refinery} + Profit^{Bioref} + Profit^{Ecoind} \} \quad (3.68)$$

3.2.1.8.2 Función objetivo ambiental

La función objetivo ambiental se refiere a la minimización de las emisiones totales de CO₂ ($NetEmission$), las cuales consideran la suma de las emisiones totales de las refinerías ($Em_i^{Refinery}$) y biorefinerías (Em_b^{Bioref}) menos las emisiones capturadas por las eco-industrias (Em_e^{Ecoind}).

$$Min \left\{ NetEmission = \sum_i Em_i^{Refinery} + \sum_b Em_b^{Bioref} - \sum_e Em_e^{Ecoind} \right\} \quad (3.69)$$

3.2.1.8.3 Función objetivo social

La función objetivo social considera la maximización de empleos totales generados para la implementación del esquema propuesto. Esta función objetivo toma en cuenta la cantidad de empleos generados en refinerías ($Jobs^{Refinery}$), biorefinerías ($Jobs^{Bioref}$) y eco-industrias forestales ($Jobs^{Ecoind}$).

$$Max \left\{ TOTALJOBS = Jobs^{Refinery} + Jobs^{Bioref} + Jobs^{Ecoind} \right\} \quad (3.70)$$

3.2.2 Solución del modelo para un caso de estudio

Para probar la metodología se propone un caso de estudio en el que se consideran diferentes localizaciones para las refinerías, biorefinerías, eco-industrias forestales, centros de distribución y lugares de abastecimiento de materia prima. En este sentido, la Figura 3.2 presenta de manera esquemática las localizaciones de las distintas instalaciones del caso de estudio. Las principales consideraciones en la localización son descritas a continuación:

- **REFINERÍAS:** Se toman en cuenta seis refinerías existentes que son las que actualmente existen en la cadena de producción de PEMEX; así mismo, se toma en cuenta la posibilidad de instalar tres refinerías nuevas. La localización de las refinerías está dada en la Tabla 3.1. Es importante destacar que la localización

de las nuevas refinerías se basó en demandas y en la existencia de infraestructura para el transporte de materia prima y productos. Por ejemplo la refinería de Toluca fue considerada porque existe una gran demanda de combustibles en el centro del país.

Tabla 3.1. Localización de las refinerías para el caso de estudio considerado

Refinerías Existentes	Refinerías Nuevas
Cadereyta	Toluca
Ciudad Madero	Guadalajara
Minatitlán	Mazatlán
Salamanca	
Salina Cruz	
Tula	

- **BIOREFINERÍAS:** Se contempla la posibilidad de instalar seis biorefinerías, las cuales se ubican en: Guadalajara, Celaya, Morelia, Mazatlán, Veracruz y Chiapas. Se toman en cuenta estas ubicaciones por la existencia de infraestructura para transporte de productos y materia prima disponible.
- **CENTROS DE DISTRIBUCIÓN:** Por otro lado, se consideran 45 centros de distribución, que son 45 de las terminales de almacenamiento y reparto más importantes de PEMEX localizadas a lo largo del territorio nacional.
- **CAMPOS DE BIOMASA:** En el caso de los campos de biomasa se consideró uno por cada uno de los estados sin embargo cada estado tiene diferente disponibilidad en cuanto a tipo de biomasa; por tanto existen campos de biomasa con una disponibilidad de cero para uno o más tipos de materia prima dadas.

- **POZOS PETROLEROS:** Para considerar los pozos petroleros se tomaron en cuenta varias zonas productoras de petróleo establecidas por PEMEX y son: Aguas territoriales, Tabasco, Veracruz, Chiapas, Puebla, Tamaulipas, San Luis Potosí.
- **ECO-INDUSTRIAS FORESTALES:** En cuanto a las Eco-industrias se contempló de manera genérica la posibilidad de instalar una por cada estado de la república, cuyo tamaño y existencia depende de la disponibilidad de tierra apta para plantaciones forestales ya que la mayoría de los estados del norte del país; así como, algunos del centro como el Distrito Federal no cuentan con superficie apta ni condiciones climáticas para el desarrollo de Eco-industrias forestales.

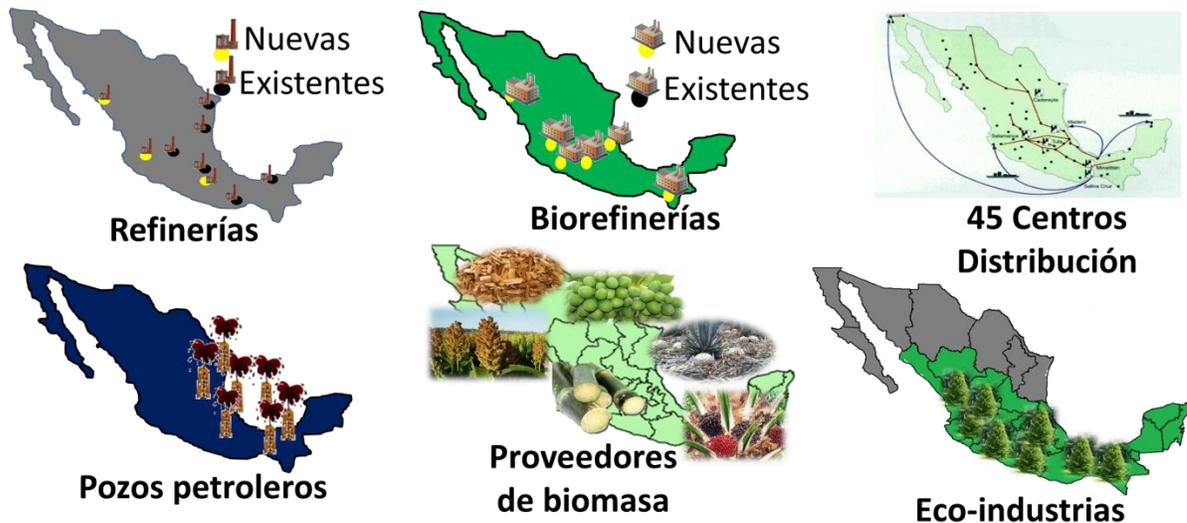


Figura 3.2. Representación esquemática del caso de estudio abordado

Es importante destacar que todos los datos concernientes a la producción de petrolíferos, como la extracción y refinamiento del petróleo fueron obtenidos partir de PEMEX (2013). Adicionalmente, se consideraron diferentes tipos de materia prima (biomasa y petróleo) y productos (bioproductos y petrolíferos), los cuales son descritos en la Tabla 3.2. En el caso de disponibilidad, ésta fue obtenida a través de SAGARPA (2015) y son presentados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.2. Descripción de los productos y materias primas para el caso de estudio

Tipo de biomasa	Bioproductos a obtener	Tipo de petróleo	Petrolífero a obtener
Astillas de madera			Gasolina PEMEX magna
Caña de azúcar	Bioetanol		
Sorgo dulce		Petróleo	Gasolina PEMEX premium
Jatropha	Biodiesel		
Palma africana			
Residuos de agave			PEMEX diesel

Tabla 3.3. Disponibilidad de materia prima por lugar de suministro

Campo de suministro	Astillas de madera (ton/día)	Caña de azúcar (ton/día)	Sorgo dulce (ton/día)	Jatropha (ton/día)	Palma Africana (ton/día)	Residuos de agave (ton/día)
Aguascalientes	22.47	0.00	55.58	0.00	0.00	0.00
Baja California	22.59	0.00	671.38	0.00	0.00	0.00
BC Sur	22.59	0.00	15.09	0.00	0.00	0.00
Campeche	7.56	1538.98	0.00	0.00	65.57	0.00
Coahuila	22.47	0.00	2560.17	0.00	0.00	0.00
Colima	17.65	3253.91	60.43	0.00	0.00	12.33
Chiapas	7.56	6424.89	9.64	0.00	838.45	0.00
Chihuahua	22.47	0.00	1397.03	0.00	0.00	0.00
Distrito Federal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Durango	22.59	0.00	1809.81	0.00	0.00	0.48

Tabla 3.3. Disponibilidad de materia prima por lugar de suministro (Continuación)

Campo de suministro	Astillas de madera (ton/día)	Caña de azúcar (ton/día)	Sorgo dulce (ton/día)	Jatropha (ton/día)	Palma Africana (ton/día)	Residuos de agave (ton/día)
Guanajuato	17.65	0.00	8.99	0.00	0.00	172.07
Guerrero	17.65	0.00	324.99	0.00	0.00	10.26
Hidalgo	4.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jalisco	17.65	16224.66	798.49	0.00	0.00	1565.77
México	5.19	0.00	13.42	0.00	0.00	10.04
Michoacán de Ocampo	17.65	3748.23	518.13	0.00	0.00	110.41
Morelos	5.19	4583.93	28.03	0.00	0.00	9.25
Nayarit	22.59	5036.72	140.75	0.00	0.00	52.15
Nuevo León	22.47	0.00	293.52	0.00	0.00	0.00
Oaxaca	7.56	10356.27	13.03	0.00	0.00	181.30
Puebla	4.15	4640.73	0.00	0.00	0.00	32.60
Querétaro	5.19	0.00	18.48	0.00	0.00	0.87
Quintana Roo	7.56	4152.21	0.00	0.00	0.00	1.24
San Luis Potosí	4.15	10936.62	33.51	0.00	0.00	0.07
Sinaloa	22.59	4031.99	614.30	0.00	0.00	0.20
Sonora	22.59	0.00	705.22	0.00	0.00	0.00
Tabasco	7.56	4106.02	0.00	0.00	204.43	0.00

Tabla 3.3. Disponibilidad de materia prima por lugar de suministro (Continuación)

Campo de suministro	Astillas de madera (ton/día)	Caña de azúcar (ton/día)	Sorgo dulce (ton/día)	Jatropha (ton/día)	Palma Africana (ton/día)	Residuos de agave (ton/día)
Tamaulipas	4.15	8108.21	61.00	0.00	0.00	171.62
Tlaxcala	5.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Veracruz	4.15	46954.33	78.07	0.00	135.51	0.00
Yucatán	7.56	0.00	35.21	3.74	0.00	0.00
Zacatecas	22.47	0.00	225.09	0.00	0.00	0.00

Por otro lado, los datos para la producción de los productos provenientes de la biomasa fueron obtenidos a partir de Santibáñez Aguilar y col. (2014) y Murillo Alvarado y col. (2014). Así mismo, los datos para la producción de petrolíferos fueron obtenidos a partir de PEMEX (2015). En este sentido, los datos correspondientes a las capacidades de las plantas de procesamiento y costos unitarios son presentados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Capacidades y costos unitarios de refinerías y biorefinerías

Datos para biorefinerías (Todas)				
Materia prima	Costo de operación (\$US/ton)	Costo variable de capital (\$US/ton-año)	Costo fijo de capital (Millones \$US)	Capacidad de procesamiento (ton/día)
Astillas de madera	100	0.10	628.60	18554
Caña de azúcar	39.52	0.04	628.60	18554
Sorgo Dulce	20.93	0.02	628.60	18554
Jatropha	113.31	0.11	628.60	18554
Palma africana	71.56	0.07	628.60	18554
Residuos de agave	266.60	0.28	628.60	18554

**Tabla 3.4. Capacidades y costos unitarios de refinerías y biorefinerías
(Continuación)**

Datos para refinerías				
Refinería	Costo de operación (\$US/ton)	Costo variable de capital	Costo fijo de capital (Millones \$US)	Capacidad de procesamiento (ton/día)
Cadereyta	169.73			34341
Ciudad Madero	169.73			23610
Minatitlán	169.73			33250
Salamanca	169.73			35378
Salina Cruz	169.73			51367
Tula	169.73			44710
Toluca	169.73	169.73	1000	37109
Guadalajara	169.73	169.73	1000	37109
Mazatlán	169.73	169.73	1000	37109

Finalmente, los datos para las Eco-industrias forestales son la capacidad de absorción de CO₂ y costos de operación y capital de las mismas son incluidas en la Tabla 3.5. Es importante destacar que los datos de captura de CO₂ por área y árbol fueron obtenidos a partir de Plantinga y Mauldin, 2001, mientras que los datos de los costos unitarios fueron estimados a partir de la cantidad de personas para la operación de las Eco-industrias forestales y datos provistos para el pago de emisiones de CO₂

Tabla 3.5. Datos usados para Eco-industrias forestales

Eco-industrias forestales	
Costo de operación (\$US/árbol)	0.30
Costo variable de capital (\$US/árbol)	0.30
Costo fijo de capital (\$US)	302
Empleados por árbol (personas/árbol)	1.8906x10 ⁻⁴
Superficie utilizada por árbol (ha/árbol)	7.5625x10 ⁻⁴
Costo por captura de emisiones a refinerías (\$US/ton)	10
Costo por captura de emisiones a biorefinerías (\$US/ton)	5

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El modelo descrito fue codificado como un modelo Mixto Entero Lineal en el lenguaje de programación GAMS y consiste de 2,159 variables binarias, 5,818 variables continuas y 5,306 restricciones. El modelo fue resuelto mediante una estrategia de optimización multi-objetivo en una computadora con un procesador i7 con 16 GB de RAM para maximizar la ganancia neta anual, maximizar el número de nuevos puestos de trabajo y minimizar el número total de emisiones netas de gases de efecto invernadero. En este sentido, se implementó el método ϵ -*constraint* y el compromiso entre los objetivos económico y ambiental es mostrado a través de una curva Pareto en la Figura 4.1. El tiempo de cómputo para obtener cada solución de la curva Pareto fue 0.97 segundos.

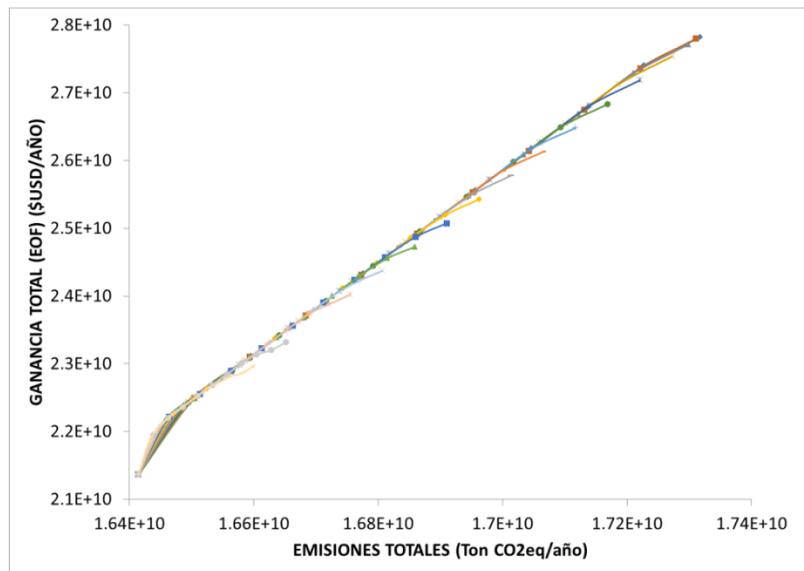


Figura 4.1. Curva Pareto entre las emisiones totales y la ganancia neta anual para la integración de refinerías, biorefinerías y eco-industrias forestales

En la Figura 4.1 se observa el punto de máxima ganancia corresponde al punto de máxima emisiones netas, y el punto con menor ganancia es el punto con menores emisiones netas. Es importante mencionar que la Figura 4.1 es útil para seleccionar soluciones que contemplen un sacrificio de la ganancia a cambio de un beneficio ambiental. Además, la Figura 4.1 presenta varias curvas Pareto obtenidas con un valor mínimo del número de empleos cada uno por lo que no muestra información clara

acerca del comportamiento del número de empleos generados por la implementación del sistema.

Por otro lado, la Figura 4.2 muestra una curva Pareto en tres dimensiones con el fin de mostrar el comportamiento de todos los objetivos considerados. La curva Pareto de la Figura 4.2 está formada por una serie de puntos y cada uno de ellos representa una diferente combinación de las variables de estado del modelo; tales como, la instalación y capacidad de refinerías, biorefinerías, eco-industrias forestales, flujos de materia prima y productos, etc. Esta Figura ilustra que la relación del número de empleos y las emisiones es inversamente proporcional; es decir, si el número de puestos de trabajo aumentan la cantidad de emisiones disminuye. Este comportamiento se debe a que la instalación de eco-industrias forestales y biorefinerías promueve la generación de empleos y la disminución de las emisiones netas.

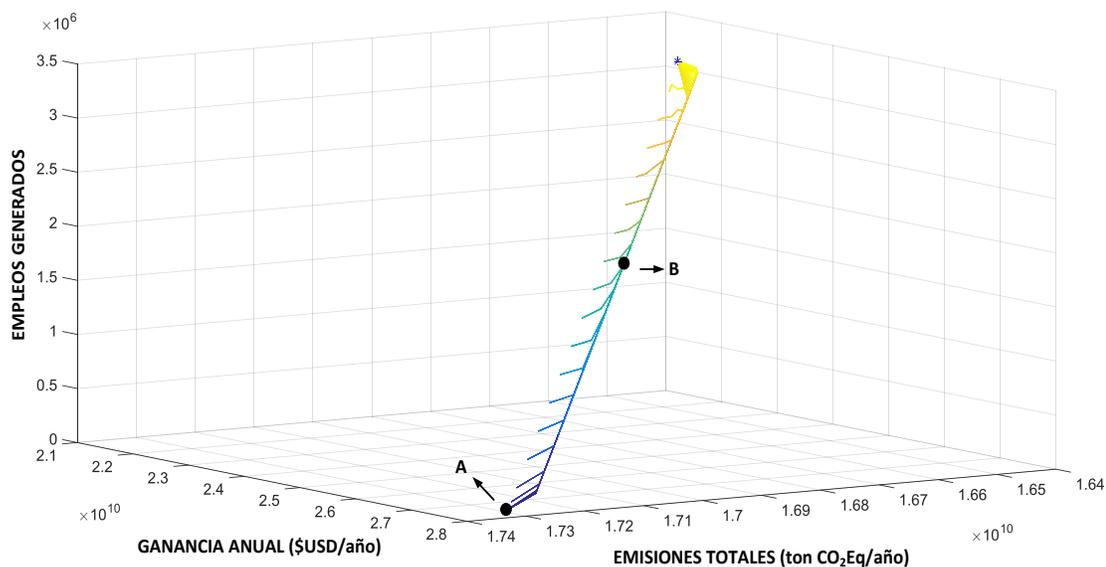


Figura 4.2. Curva Pareto para las emisiones netas, número de empleos y ganancia neta anual

En este aspecto, la curva Pareto proporciona los valores para los tres objetivos los cuales están asociados a una configuración de la cadena de suministro; por tanto dos puntos fueron seleccionados con el fin de comparar el valor de los objetivos para diferentes soluciones. El punto A representa la solución para la máxima ganancia,

donde todas las refinerías posibles son seleccionadas para satisfacer la demanda de combustible y ninguna de las eco-industrias forestales o biorefinerías son elegidas. Además, la solución del punto A indica un valor de empleos alrededor de 38,000. Por otro lado, el punto B muestra una ganancia de \$ 24,534 millones de dólares, un valor de emisiones de 16.8 miles de toneladas de CO₂ y 744,318 puestos de trabajo por año; estos valores son obtenidos a través de la instalación de 8 eco-industrias forestales, 2 biorefinerías y 8 refinerías.

Es importante destacar que los valores en el punto B indican que las biorefinerías producen menos emisiones que las refinerías ya que el sistema tiende a reducir las emisiones netas por la instalación de biorefinerías. Asimismo, las proporciones de disminución no son iguales para las eco-industrias forestales y las biorefinerías; por ejemplo, al comparar el punto A y B, las eco-industrias forestales contribuyen una reducción de 440 millones de toneladas de CO₂ y las biorefinerías con una reducción de 77 millones de toneladas de CO₂ (ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Resultados para emisiones

	Emisiones netas totales (Millones de toneladas/año)	Reducción de emisiones a través de eco-industrias (Millones de toneladas/año)	Reducción de emisiones a través de biorefinerías (Millones de toneladas/año)
Punto A	17,317	0	0
Punto B	16,800	440	77

Adicionalmente la Tabla 4.2 compara la cantidad de puestos de trabajos entre los puntos A y B de la Figura 4.2. En este caso, es posible observar que el número de empleos tiene un incremento significativo principalmente por la instalación y operación de las eco-industrias forestales. También, las refinerías presentan un incremento desde 38,399 empleos hasta 41,175 empleos ya que algunas refinerías aumentan su producción. Igualmente, las biorefinerías incrementan en 1,805 el número de empleos.

Tabla 4.2 Resultados para generación de empleos.

	Point A	Point B
Refinerías	38,399	41,175
Biorefinerías	0	1,805
Eco-industrias	0	1,701,300

A partir de la Tabla 4.3 se observa el incremento de los puestos de trabajo el cual se debe al incremento desde 78 a 98 % de la producción en la refinería de Mazatlán ya que en el punto B existen empleos por la instalación de la nueva refinería y el incremento en la refinación del petróleo, mientras que la producción en la refinería de Salamanca disminuye desde 25 a 0 %, esta contempla sólo la generación por la refinación del petróleo como se muestra en la Tabla 4.3. Otro aspecto a destacar es de acuerdo a la Tabla 4.3 que la disminución en la producción de la refinería de Salamanca no puede ser absorbida en su totalidad por la refinería de Mazatlán para tratar de reducir las emisiones únicamente por medio de las eco-industrias forestales; por tanto la demanda tiene que ser satisfecha a través de bioetanol y biodiesel en las biorefinerías a un menor costo ambiental.

Tabla 4.3. Cantidad de petróleo de petróleo procesado por refinería seleccionada para los puntos A y B de la Figura 4.2

Refinería	Punto B		Punto A	
	Petróleo procesado (ton/día)	%Capacidad de planta	Petróleo procesado (ton/día)	%Capacidad de planta
Cadereyta	34,342	100	34,342	100
Cd. Madero	23,610	100	23,610	100
Minatitlán	33,251	100	33,251	100
Salamanca		0	8,709	25
Salina Cruz	51,367	100	51,367	100
Tula Hidalgo	44,710	100	44,710	100

Tabla 4.3. Cantidad de petróleo de petróleo procesado por refinería seleccionada para los puntos A y B de la Figura 4.2 (Continuación)

Refinería	Punto B	Punto A		
	Petróleo procesado (ton/día)	%Capacidad de planta	Petróleo procesado (ton/día)	%Capacidad de planta
Toluca	37,110	100	37,110	100
Guadalajara	37,110	100	37,110	100
Mazatlán	36,435	98	28,976	78
TOTAL	297,935		299,185	

Por otro lado, la Tabla 4.4 muestra la cantidad de árboles así como las toneladas capturadas de CO₂ para cada una de las eco-industrias forestales. Cabe resaltar que la contribución a la captura de emisiones es diferente para cada una las eco-industrias debido al área disponible para las plantaciones forestales.

Tabla 4.4. Capacidad de captura de las eco-industrias forestales y porcentaje de contribución

Eco-industrias	Número de Árboles	Emisiones Capturadas (ton/año)	%Emisiones Capturadas
7. Chiapas	1,081,181,028	52,837,317	12.01
10. Durango	1,818,662,967	88,878,059	20.21
14. Jalisco	1,159,005,533	56,640,600	12.88
20. Oaxaca	1,382,715,958	67,573,329	15.37
25. Sinaloa	846,011,507.9	41,344,582	9.40
30. Veracruz	1,059,280,442	51,767,035	11.77
31. Yucatán	582,894,776.3	28,486,068	6.48
32. Zacatecas	1,057,322,442	52,243,648	11.88

Adicionalmente, en el punto B la demanda de combustible es cubierta en gran medida por gasolina y diésel producido por las refinerías; la parte restante es satisfecha por medio de bioetanol y biodiesel que son producidos a partir de diversas materias primas. La proporción de demanda satisfecha así como la cantidad de materia utilizada para la producción de los biocombustibles mencionados se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Cantidad y porcentaje de demanda satisfecha por materia prima para los diferentes bioproductos en el punto B de la Figura 4.2

Materia prima		Producto			
Tipo	Cantidad (tons/día)	Tipo	Cantidad (tons/día)	% Demanda total	% Producción relativa
Residuos de agave	970	Bioetanol	351.6	0.38	100
		Biodiesel	0	0	0
Otros	0	Bioetanol	0	0	0
		Biodiesel	0	0	0

Como se puede apreciar en la Tabla 4.5, la única materia prima seleccionada en el punto B de la Figura 4.2 la denominada como residuos de agave. La principal razón por la que se selecciona dicha materia prima es por la disponibilidad y el precio de la misma; así mismo presenta un alto factor de conversión a etanol dado que casi la tercera parte de la misma es obtenida como éste biocombustible. Sin embargo, la demanda satisfecha es de 0.38 % de la demanda nacional de combustible usado como gasolina; es decir, 3.8 % en una mezcla 9 partes de gasolina y una de etanol, por lo que se observa que la cantidad de materia prima no es suficiente para satisfacer la totalidad de la demanda aunque si reduce emisiones como se ilustró en la Tabla 4.1.

La Figura 4.3 representa como se lleva a cabo la distribución de la materia prima a las biorefinerías seleccionadas en el punto B; en este caso las biorefinerías corresponden a las propuestas en las ciudades de Celaya y Guadalajara. Es importante mencionar que las plantas operan a diferente capacidad ya que en Celaya se propone procesar el 60 % de los residuos de agave y el resto en Guadalajara. Así mismo, se observa que la materia proviene principalmente de los estados de la región centro occidente (Jalisco, Nayarit, Michoacán, Guanajuato y Oaxaca) y Tamaulipas. En este sentido el estado con mayor contribución es Jalisco dado que representa el mayor

porcentaje de obtención de materia prima para ambas biorefinerías. Además, se observa que la biorefinería de Celaya usa biomasa proveniente de Michoacán y la de Jalisco usa residuos de agave originarios de Nayarit con el objetivo de disminuir los costos asociados al transporte.

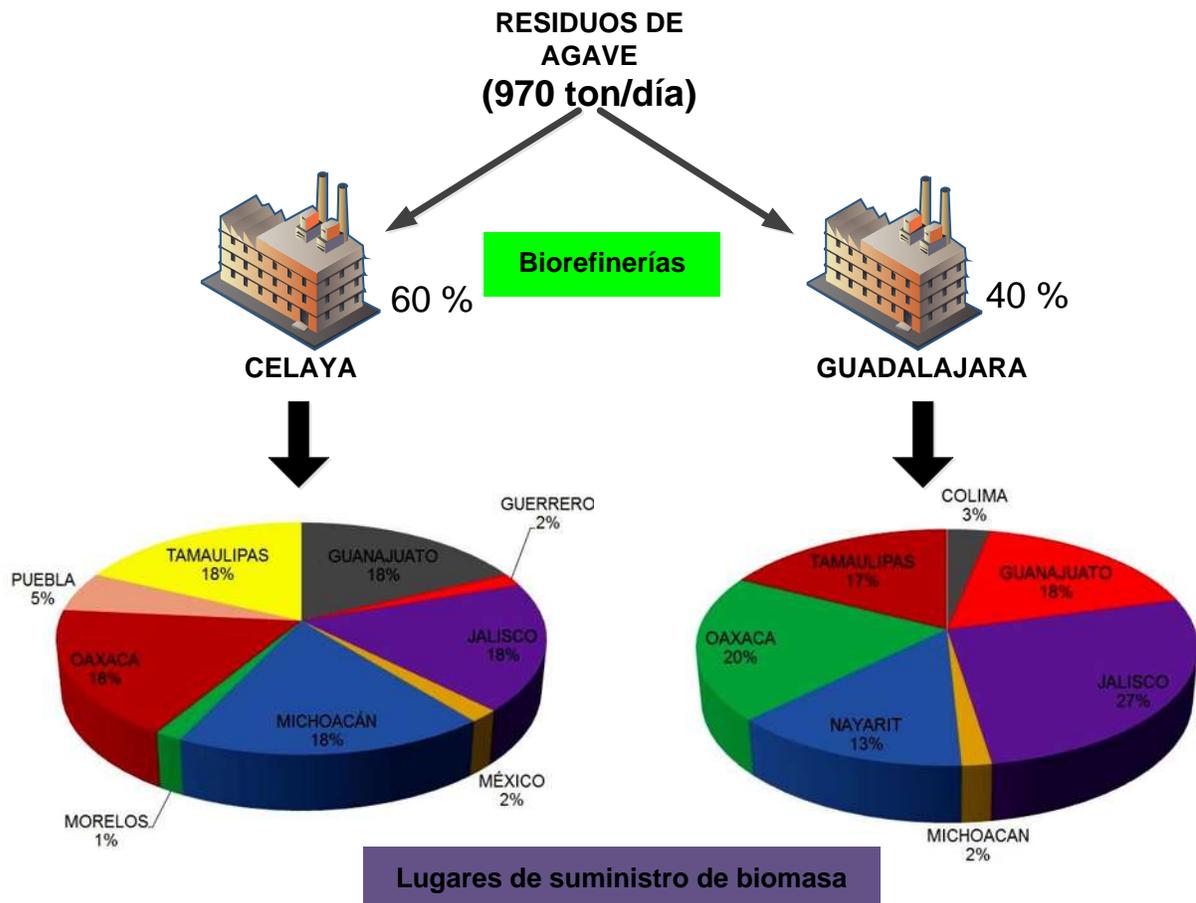


Figura 4.3. Distribución de la materia prima en las biorefinerías seleccionadas en el punto B de la Figura 4.2.

La proporción de los ingresos y egresos económicos correspondientes a las biorefinerías se presentan en la Figura 4.4. Se puede notar que los mayores costos corresponden a los costos de capital, operación y producción de biomasa. Además, los ingresos por la venta de productos son muy bajos debido a los precios considerados del etanol y biodiesel sin ningún tipo de subsidio y que recientemente ha disminuido considerablemente; consecuentemente las ganancias para las biorefinerías seleccionadas en el punto B son negativas a pesar que las ganancias del sistema

global son atractivas. La Figura 4.4b muestra la relación entre los diferentes ingresos y egresos económicos para todas las biorefinerías, lo cual reafirma que los ingresos en este caso son mucho menores que los egresos.

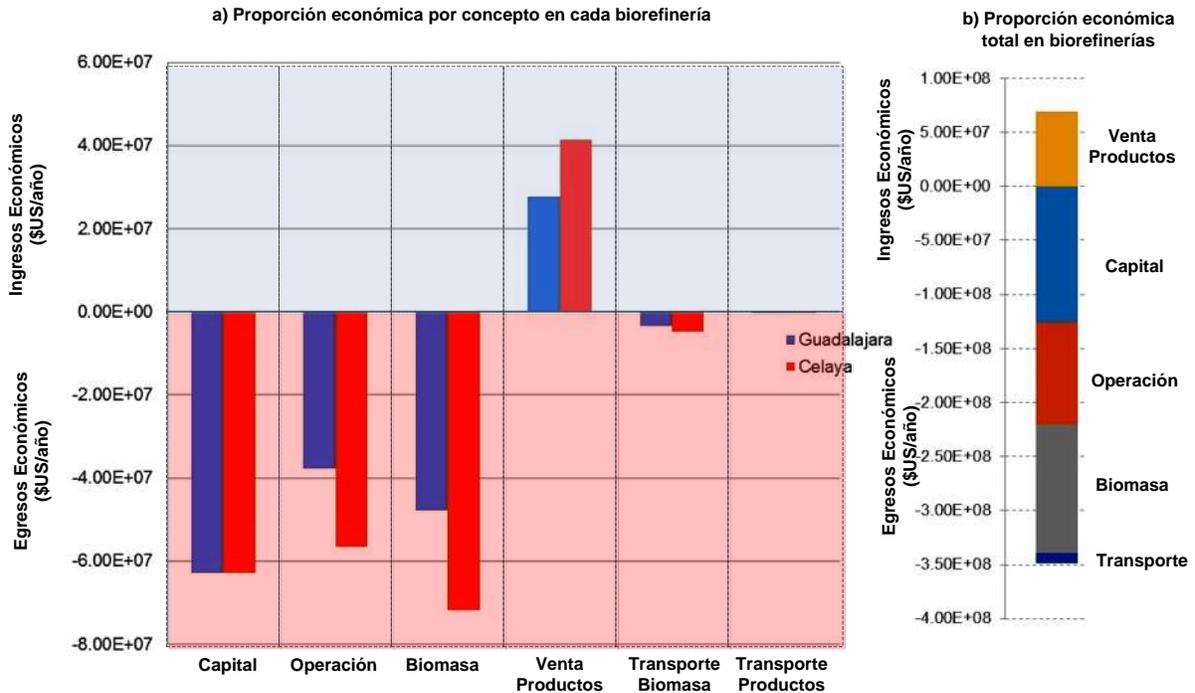


Figura 4.4 Proporción económica en las biorefinerías seleccionadas en el punto B. a) Por concepto y biorefinería; b) Por concepto en todas las biorefinerías

Por otro lado, la proporción de los ingresos y egresos económicos correspondientes a las refinерías se muestran en la Figura 4.5. En este sentido, los mayores costos son los asociados con la materia prima (petróleo) y operación de las refinерías. Además, el ingreso correspondiente a la venta de petrolíferos es amplio y puede soportar todos los costos para obtener una ganancia significativa en las refinерías. También, es posible notar que los ingresos y egresos para cada una de las refinерías son variantes principalmente por el diseño de la red de producción para el punto B debido a la distribución siendo la refinерía de Salina Cruz la que tiene un ingreso económico considerablemente mayor. Por otro lado, la Figura 4.5b muestra la proporción total de los ingresos y egresos económicos con lo cual se reafirma que los costos más significativos son los correspondientes a la extracción del petróleo y de operación de las refinерías. Cabe destacar que el costo que las refinерías pagan por la

disminución de emisiones por medio de eco-industrias forestales es solo una pequeña parte de los egresos totales, por lo que el pago por reducción de emisiones podría ser mayor sin afectar significativamente las ganancias de las mismas. De esta manera, la cantidad de emisiones capturadas está limitada por el tamaño de las eco-industrias para un número de empleos dados y no es impedida por la parte económica de las refinerías ya que sus ingresos son mucho mayores a la totalidad de sus costos.

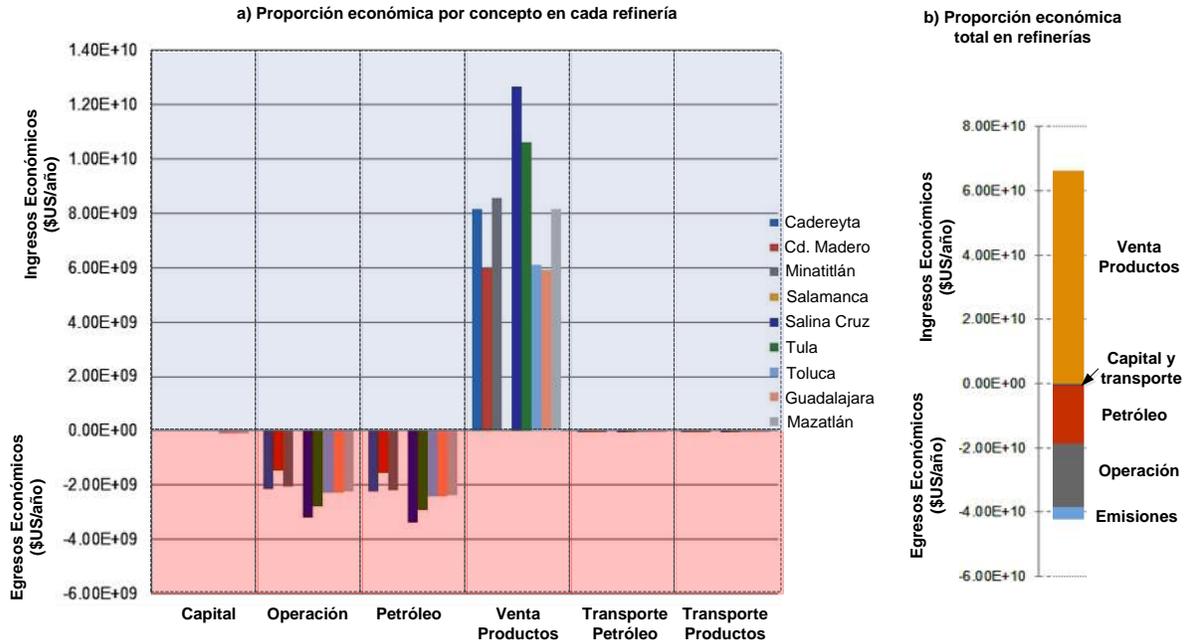


Figura 4.5 Proporción económica en las refinerías seleccionadas en el punto B. a) Por concepto y refinería; b) Por concepto en todas las refinerías

CONCLUSIONES

La metodología propuesta para la resolución del modelo ilustra como una curva Pareto en tres dimensiones es útil para mostrar soluciones que compensen de manera adecuada los objetivos económico, ambiental y social, ya que una curva en dos dimensiones no permite observar el compromiso entre todos los objetivos.

Por otro lado, los resultados muestran que las biorefinerías pueden reducir la emisión de gases de efecto invernadero comparada con la producción de combustible a partir de petróleo. Sin embargo, una estrategia capaz de considerar la interacción de eco-industrias forestales puede disminuir las emisiones netas en una medida hasta 6 veces mayor que las biorefinerías.

Además, basado en los resultados correspondientes al tamaño de las eco-industrias forestales, se puede comprobar que éste depende principalmente del área disponible y no se ve afectado por la localización de las mismas ya que el efecto de disminución global no depende de la localización directamente.

En lo que se refiere a la instalación de nuevas refinerías, es posible observar que en algunos casos puede resultar más atractivo económicamente el cierre de operaciones de una refinería instalada previamente y el inicio de operaciones de otra ya que el ahorro en los gastos de transporte pueden equiparar el costo de capital en un periodo dado de tiempo, cuando los centros para abastecer el producto se encuentran muy alejados. Por lo tanto, una metodología como la abordada en este trabajo es útil para la toma de decisiones dirigidas a hacer un reacomodo de la cadena de suministro; aunque tiene como limitante que no considera la posibilidad de ampliación de las instalaciones previamente funcionando.

Respecto a la satisfacción de demanda se puede concluir que México cuenta con los recursos petrolíferos suficientes para cubrir la demanda de combustible en el corto plazo pero la capacidad de refinación instalada no es suficiente pues los resultados indican que es necesaria la instalación de tres refinerías nuevas para satisfacer la demanda de gasolina y diésel únicamente con petróleo. Asimismo, la producción de bioetanol y biodiesel con las materia primas disponibles solo satisfacen un poco de la demanda; es decir, no se puede ser completamente independiente de los combustibles

fósiles a menos que se tomen en cuenta otras materias primas, se incremente la disponibilidad de materia prima y la capacidad de procesamiento de la misma.

Finalmente, considerando los precios recientes del petróleo, la extracción y exportación directa podría llegar a ser no rentable económicamente ya que el precio del barril de petróleo se acerca al costo por extracción del mismo. Sin embargo, tomando en cuenta el proceso de refinación se pueden absorber dichas pérdidas ya que el costo de materia prima será menor por lo que el margen de ganancia en dicho proceso se incrementará. Es importante mencionar que en caso de que el proceso de extracción sea extremadamente costoso, el modelo podría considerar la posibilidad de importar petróleo, razón por la cual, se puede concluir que México no necesita incrementar la capacidad de producción y exportación de petróleo sino incrementar la capacidad de refinación para la obtención de productos de alto valor agregado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aksoy, B., Cullinan, H. T., Sammons, N. E., Eden, M. R. (2008). Identification of optimal poultry litter biorefinery location in Alabama through minimization of feedstock transportation cost. *Environmental Progress*, 27(4), 515-523.
- Cherubini, F., Bird, N. D., Cowie, A., Jungmeier, G., Schlamadinger, B., Woess-Gallasch, S. (2009). Energy-and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(8), 434-447.
- Kyoto, P. (1997). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas. 25pp.
- González-Eguino, M. (2011). The importance of the design of market-based instruments for CO₂ mitigation: An AGE analysis for Spain. *Ecological Economics*, 70(12), 2292-2302.
- Lopez-Villarreal, F., Rico-Ramirez, V., González-Alatorre, G., Quintana-Hernandez, P. A., Diwekar, U. M. (2011). A mathematical programming approach to pollution trading. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(17), 5922-5931.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España (2009), Guía explicativa del Comercio de Derechos de Emisión.
- Murillo-Alvarado, P. E., Santibañez-Aguilar, J. E., Ponce-Ortega, J. M., Castro-Montoya, A. J., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2014). Optimization of the supply chain associated to the production of bioethanol from residues of agave from the tequila process in Mexico. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(13), 5524-5538.
- PEMEX. (2013). Anuario Estadístico 2013, México.
- Plantinga, A. J., Mauldin, T. (2001). A method for estimating the cost of CO₂ mitigation through afforestation. *Climatic Change*, 49(1-2), 21-40.

- Raymond, L., Cason, T. N. (2011). Can affirmative motivations improve compliance in emissions trading programs? *Policy Studies Journal*, 39(4), 659-678.
- Sánchez-Bautista, A. de F., Santibañez-Aguilar, J. E., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal design of domestic water-heating solar systems. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(3), 637-656.
- SAGARPA. (2015). Avance de siembras y cosechas por estado. <http://www.siap.gob.mx/avance-de-siembras-y-cosechas-por-estado/> (Diciembre, 2015)
- Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of cleaner production*, 65, 270-294.
- SEMARNAT. (2015) Primer informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México.
- Song, C. F., Kitamura, Y., Li, S. H., Jiang, W. Z. (2012). Parametric analysis of a novel cryogenic CO₂ capture system based on Stirling coolers. *Environmental science & technology*, 46(22), 12735-12741.
- Tapia, J. F. D., Tan, R. R. (2014). Fuzzy optimization of multi-period carbon capture and storage systems with parametric uncertainties. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(6), 545-554.
- Torjai, L., Nagy, J., Bai, A. (2015). Decision hierarchy, competitive priorities and indicators in large-scale herbaceous biomass to energy supply chains. *Biomass and Bioenergy*, 80, 321-329.
- Verma, Y. P., Kumar, A. (2013). Potential impacts of emission concerned policies on power system operation with renewable energy sources. *International Journal of electrical power & energy systems*, 44(1), 520-529.

APÉNDICE

Código en lenguaje GAMS del modelo.

```
$TITLE PLANIFICACIÓN DE REFINERIAS BIOREFINERIAS Y ECOINDUSTRIAS
```

```
OPTION OPTCR=0.000050;
OPTION OPTCA = 100;
OPTION ITERLIM=1000000;
OPTION RESLIM= 100000;
OPTION LIMCOL = 0;
OPTION LIMROW = 0;
OPTION MIP = CPLEX;
OPTION MINLP = BARON;
OPTION NLP = CONOPT;
OPTION RMINLP = CONOPT;
```

```
$ONEMPTY
```

```
SETS
```

```
i          REFINERIAS          /1*9/
          i1(i) SUBSET i EXISTING REFINERIES /1*6/
```

```
*1.- CADEREYTA
```

```
*2.- CIUDAD MADERO
```

```
*3.- MINATITLAN
```

```
*4.- SALAMANCA
```

```
*5.- SALINA CRUZ
```

```
*6.- TULA
```

```
          i2(i) SUBSET i NEW REFINERIES          /7*9/
```

```
b          BIOREFINERIES      /1*6/
```

```
          b1(b) SUBSET b EXISTING BIOREFINERIES / /
```

```
          b2(b) SUBSET b NEW BIOREFINERIES      /1*6/
```

```
*SE CONTEMPLA LA POSIBILIDAD DE INSTALAR 6 BIOREFINERIAS
```

```
p          PRODUCTS          /1*5/
```

```
          p1(p) SUBSET p PRODUCTS FROM OIL OR REFINERIAS /1,2,3/
```

```
*1.- GASOLINA PEMEX MAGNA
```

```
*2.- GASOLINA PEMEX PREMIUM
```

```
*3.- PEMEX DIESEL
```

```
          p2(p) SUBSET p PRODUCTS FROM BIOMASS OR BIOREFINERIAS /4,5/
```

```
*4.- BIOETANOL
```

```
*5.- BIODIESEL
```

```
j          DISTRIBUTION CENTERS /1*45/
```

```
*SE CONSIDERA LOS CENTROS DE DISTRIBUCION COMO LAS TERMINALES DE ALMACENAMIENTO Y REPARTO
UBICADAS
```

bm BIOMASA /1*6/
 *1.- ASTILLAS DE MADERA
 *2.- CAÑA DE AZUCAR
 *3.- SORGO DULCE
 *4.- JATROPHA
 *5.- PALMA AFRICANA
 *6.- RESIDUOS DE AGAVE

o WELL OIL (POZOS PETROLEROS) /1*7/
 *1.- AGUAS TERRITORIALES
 *2.- TABASCO
 *3.- VERACRUZ
 *4.- CHIAPAS
 *5.- PUEBLA
 *6.- TAMAULIPAS
 *7.- SAN LUIS POTOSI

m FIELD BIOMASS (CAMPOS DE BIOMASA O PRODUCTORES DE BIOMASA) /1*32/
 *SE CONSIDERAN CAMPOS POR CADA ESTADO PORQUE LA INFORMACION QUE PROPORCIONA SAGARPA NORMALMENTE
 ESTA DADA POR ESTADO DE LA REPUBLICA

e ECO INDUSTRIES /1*32/
 *LA LOCALIZACION DE LAS ECO INDUSTRIAS DEPENDE DEL AREA DISPONIBLE PERO SE CONSIDERA DEFINIR 30
 ECOINDUSTRIAS DISTRIBUIDAS EN EL PAIS
 *:/:/:/PARA ESTO HACE FALTA DEFINIR LAS LOCALIZACIONES Y EN BASE A ELLO INVESTIGAR EL AREA DE
 TIERRA DISPONIBLE
 *:/:/:/PARA REFORESTACION O CULTIVO DE ARBOLES.

POINT PUNTOS DE LA CURVA PARETO /1*11/
 *AHORITA SE CONSIDERAN ONCE PUNTOS DE LA CURVA DESDE CERO HASTA 100
 ;
 PARAMETER PRUEBAS(i)
 ;
 PRUEBAS(i)=0;

TABLE ALFAPRODUCTREF(p1,i) CONVERSION PARAMETER TO OBTAIN THE REFINERY PRODUCTION
 *\$call =xls2gms r=DATO1!b7:k10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=alfaproductref.inc
 \$include alfaproductref.inc
 ;

TABLE UCOIL(o,i) UNITARY COST FOR THE OIL
 *\$call =xls2gms r=DATO2!b8:k15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucoil.inc
 \$include ucoil.inc
 ;

TABLE UCPRODREF(p1,i) UNITARY COST FOR THE PRODUCTS FROM OIL
 *\$call =xls2gms r=DATO3!b6:k9 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucprodref.inc
 \$include ucprodref.inc
 ;

```

TABLE UCSELLINGPRODUCTREF(p1,i)          UNITARY SELLING COST FOR THE PRODUCTS
*$call =xls2gms r=DATO4!b6:k9 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucsellingproductref.inc
$include ucsellingproductref.inc
;
TABLE ALFAPRODBIOREF(p2,bm,b)          CONVERSION PARAMETER TO OBTAIN THE BIOREFINERY PRODUCTION
*$call =xls2gms r=DATO5!b5:j17 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=alfaprodbioref.inc
$include alfaprodbioref.inc
;
TABLE VCOSTBIOREF(bm,b2)              VARIABLE COST FOR THE CAPITAL COST OF THE NEW BIOREFINERIES
*$call =xls2gms r=DATO6!c5:i11 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=vcostbioref.inc
$include vcostbioref.inc
;
TABLE OPCOSTBIOREF(bm,b)              UNITARY OPERATING COST FOR THE BIOREFINERIES
*$call =xls2gms r=DATO7!c5:i11 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=opcostbioref.inc
$include opcostbioref.inc
;
TABLE UCBIOMASSGROWTH(bm,b,m)          UNITARY COST FOR THE BIOMASS PRODUCTION (COSTO UNITARIO DE LA
BIOMASA QUE COMPRAN LAS BIOREFINERIAS)
*$call =xls2gms r=DATO8!c5:ak41 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucbiomassgrowth.inc
$include ucbiomassgrowth.inc
;
TABLE UCBIOREFFPROD(p2,bm,b)          UNITARY COST FOR THE BIOMASS PROCESSING INTO BIOREFINERIES
*$call =xls2gms r=DATO9!b5:j17 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucbiorefprod.inc
$include ucbiorefprod.inc
;
TABLE UCREVENUEPRODBIOREF(p2,b)        UNITARY PRICE OF THE BIOPRODUCTS FROM BIOREFINERIES
*$call =xls2gms r=DATO10!b5:h7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucrevenueprodbioref.inc
$include ucrevenueprodbioref.inc
;
TABLE UCPUMPINGOILEXIST(o,i1)          UNITARY PUMPING COST FOR THE OIL FROM THE EXISTING
REFINERIES (TRANSPORTATION COST)      (32)
*$call =xls2gms r=DATO11!b8:h15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucpumpingoilexist.inc
$include ucpumpingoilexist.inc
;
TABLE UCTRANSPRODUCTREF(p1,i1,j)      UNITARY TRANSPORTATION COST FOR THE PRODUCTS FROM THE
EXISTING REFINERIES                    (33)
*$call =xls2gms r=DATO12!b7:aw25 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=uctransproductref.inc
$include uctransproductref.inc
;
TABLE FCOSTPIPOIL(o,i2)               FIXED COST FOR THE CAPITAL COST FOR THE TRANSPORTATION OF OIL
FROM THE NEW REFINERIES                (34)
*$call =xls2gms r=DATO13!b8:e15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fcostpipoil.inc
$include fcostpipoil.inc
;
TABLE VCOSTOIL(o,i2)                  VARIABLE COST OF THE CAPITAL COST FOR THE TRANSPORTATION OF OIL
FROM WELL OIL TO THE NEW REFINERIES    (35)
*$call =xls2gms r=DATO14!b8:e15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=vcostoil.inc
$include vcostoil.inc

```

```

;
TABLE UCPUMPINGOILNEW(o,i2)          UNITARY PUMPING COST FOR THE OIL FROM THE NEW REFINERIES
      (TRANSPORTATION COST)      (37)
*$call =xls2gms r=DATO15!b8:e15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ucpumpingoilnew.inc
$include ucpumpingoilnew.inc
;
TABLE f1OILMIN(o,i2)                MINIMUM PROCESSED AMOUNT OF OIL IN THE NEW REFINERIES (38)
*$call =xls2gms r=DATO16!b8:e15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=f1oilmin.inc
$include f1oilmin.inc
;
TABLE f1OILMAX(o,i2)                MAXIMUM PROCESSED AMOUNT OF OIL IN THE NEW REFINERIES (39)
*$call =xls2gms r=DATO17!b8:e15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=f1oilmax.inc
$include f1oilmax.inc
;
TABLE UCTRANSPRODREFNEW(p1,i2,j)    UNITARY TRANSPORTATION COST FOR THE PRODUCTS FROM THE
      NEW REFINERIES              (40)
*$call =xls2gms r=DATO18!b7:aw16 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=uctransprodrefnew.inc
$include uctransprodrefnew.inc
;
TABLE FCOSTPIPPRODREF(p1,i2,j)      FIXED COST FOR THE CAPITAL COST IN THE NEW REFINERIES
      (41)
*$call =xls2gms r=DATO19!b8:aw17 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fcostpipprodref.inc
$include fcostpipprodref.inc
;
TABLE VCOSTPRODREF(p1,i2,j)        VARIABLE COST FOR THE CAPITAL COST IN THE NEW REFINERIES
      (42)
*$call =xls2gms r=DATO20!b7:aw16 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=vcostprodref.inc
$include vcostprodref.inc
;
TABLE FPRODUCTREFMIN(p1,i2,j)      MINIMUM AMOUNT OF PRODUCTS THAT CAN BE TRANSPORTED FROM
      THE NEW REFINERIES (44)
*$call =xls2gms r=DATO21!b7:aw16 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fproductrefmin.inc
$include fproductrefmin.inc
;
TABLE FPRODUCTREFMAX(p1,i2,j)      MAXIMUM AMOUNT OF PRODUCTS THAT CAN BE TRANSPORTED FROM
      THE NEW REFINERIES (45)
*$call =xls2gms r=DATO22!b7:aw16 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fproductrefmax.inc
$include fproductrefmax.inc
;
TABLE UCTRANSBIOMASSEXIST(bm,m,b1)  UNITARY TRANSPORTATION COST FOR BIOMASS TO THE EXISTING
      BIOREFINERIES (46)
*$call =xls2gms r=SI SE TIENEN DATOS CAMBIAR EL RANGO, PORQUE AHORITA NO SE TIENEN BIOREFINERIAS
      EXISTENTES i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=uctransbiomassexist.inc
*$include uctransbiomassexist.inc
;
TABLE UCTRANSPRODBIOREXIS(p2,b1,j) UNITARY TRANSPORTATION COST OF PRODUCTS FROM THE
      EXISTING BIOREFINERIES (47)

```

```

*$call =xls2gms r=SI SE TIENEN DATOS CAMBIAR EL RANGO, PORQUE AHORITA NO SE TIENEN BIOREFINERIAS
EXISTENTES i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=uctransprodbiorexis.inc
*$include uctransprodbiorexis.inc
;
TABLE FCOSTTRANSBIOMAS(bm,m,b2)          FIXED COST OF THE CAPITAL COST FOR THE TRANSPORTATION OF
BIOMASS TO THE NEW BIOREFINERIES (48)
*$call =xls2gms r=DATO25!c6:k198 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fcosttransbiomas.inc
$include fcosttransbiomas.inc
;
TABLE VCOSTTRANSBIOMASS(bm,m,b2)        VARIABLE COST OF THE CAPITAL COST FOR THE TRANSPORTATION
OF BIOMASS TO THE NEW BIOREFINERIES (49)
*$call =xls2gms r=DATO26!c7:k199 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=vcosttransbiomass.inc
$include vcosttransbiomass.inc
;
TABLE UCTRANSBIOMASSNEW(bm,m,b2)        UNITARY TRANSPORTATION COST FOR THE BIOMASS TO THE NEW
BIOREFINERIES (51)
*$call =xls2gms r=DATO27!c7:k199 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=uctransbiomassnew.inc
$include uctransbiomassnew.inc
;
TABLE f1BIOMASSMIN(bm,m,b2)             LOWER LIMIT FOR THE TRANSPORTED BIOMASS TO THE NEW
BIOREFINERIES (52)
*$call =xls2gms r=DATO28!c7:k199 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=f1biomassmin.inc
$include f1biomassmin.inc
;
TABLE f1BIOMASSMAX(bm,m,b2)             UPPER LIMIT FOR THE TRANSPORTED BIOMASS TO THE NEW
BIOREFINERIES (53)
*$call =xls2gms r=DATO29!c7:k199 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=f1biomassmax.inc
$include f1biomassmax.inc
;
TABLE FCOSTTRANSPRODBIOREF(p2,b2,j)     FIXED COST FOR THE CAPITAL COST OF THE TRANSPORTATION OF
PRODUCTS TO THE NEW BIOREFINERIES (54)
*$call      =xls2gms          r=DATO30!b6:aw18          i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls
o=fcosttransprodbioref.inc
$include fcosttransprodbioref.inc
;
TABLE VCOSTTRANSPRODBIOREF(p2,b2,j)     VARIABLE COST FOR THE CAPITAL COST OF THE TRANSPORTATION
OF PRODUCTS TO THE NEW BIOREFINERIES (55)
*$call      =xls2gms          r=DATO31!b6:aw18          i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls
o=vcosttransprodbioref.inc
$include vcosttransprodbioref.inc
;
TABLE UCTRANSPRODBIORNEW(p2,b2,j)       UNITARY TRANSPORTATION COST OF PRODUCTS FROM THE NEW
BIOREFINERIES (57)
*$call =xls2gms r=DATO32!b6:aw18 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=uctransprodbiornew.inc
$include uctransprodbiornew.inc
;
TABLE fPRODUCTBIOREFMIN(p2,b2,j)        LOWER LIMIT FOR THE TRANSPORTED PRODUCT TO THE NEW
BIOREFINERIES (58)

```

```

*$call =xls2gms r=DATO33!b6:aw18 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fproductbiorefmin.inc
$include fproductbiorefmin.inc
;
TABLE fPRODUCTBIOREFMAX(p2,b2,j)          UPPER LIMIT FOR THE TRANSPORTED PRODUCT TO THE NEW
      BIOREFINERIES (59)
*$call =xls2gms r=DATO34!b6:aw18 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fproductbiorefmax.inc
$include fproductbiorefmax.inc
;
TABLE BETACO2EXT(o,i)                    UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE OIL
      EXTRACTION (60)
*$call =xls2gms r=DATO35!b8:k15 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=betaco2ext.inc
$include betaco2ext.inc
;
TABLE BETACO2PRODUCTREF(p1,i)           UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE OIL REFINING
      (61)
*$call =xls2gms r=DATO36!b7:k10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=betaco2productref.inc
$include betaco2productref.inc
;
TABLE BETACO2TRANSPRODUCTREF(p1,i,j)    UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE
      TRANSPORTATION PRODUCTS FROM THE REFINERIES (62)
*$call      =xls2gms          r=DATO37!b8:aw35          i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls
      o=betaco2transproductref.inc
$include betaco2transproductref.inc
;
TABLE BETACO2USEPRODUCTREF(p1,i)        UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE BURNING OF
      PRODUCTS FROM THE REFINERIES (63)
*$call      =xls2gms          r=DATO38!b7:k10          i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls
      o=betaco2useproductref.inc
$include betaco2useproductref.inc
;
TABLE GAMACO2BIOMASSGROWTH(bm,b)        UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE BIOMASS
      PRODUCTION (64)
*$call      =xls2gms          r=DATO39!c6:i12          i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls
      o=gamaco2biomassgrowth.inc
$include gamaco2biomassgrowth.inc
;
TABLE GAMACO2BIOMASSTRANS(bm,m,b)       UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE BIOMASS
      TRANSPORTATION (65)
*$call      =xls2gms          r=DATO40!c6:k198         i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls
      o=gamaco2biomasstrans.inc
$include gamaco2biomasstrans.inc
;
TABLE GAMACO2BIOREFPROD(p2,bm,b)       UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE BIOPRODUCTS
      PRODUCTION (66)
*$call =xls2gms r=DATO41!b6:j18 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamaco2biorefprod.inc
$include gamaco2biorefprod.inc
;

```

```

TABLE GAMACO2TRANSPRODBIOREF(p2,b,j)          UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE BIOPRODUCTS
TRANSPORTATION (67)
*$call      =xls2gms          r=DATO42!b7:aw19          i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls
o=gamaco2transprodbioref.inc
$include gamaco2transprodbioref.inc
;
TABLE GAMACO2USEPRODBIOREF(p2,b)              UNITARY EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE BURNING
BIOPRODUCTS (68)
*$call =xls2gms r=DATO43!b5:h7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamaco2useprodbioref.inc
$include gamaco2useprodbioref.inc
;

TABLE MAXFBIOMASSFIELD(bm,m)                  CANTIDAD MAXIMA DE BIOMASA DISPONIBLE EN CAMPOS (70)
***SE AGREGÓ ESTE PARAMETRO POR UNA ECUACION AGREGADA, POR TANTO FALTA AGREGARLA EN LA
NOMENCLATURA DEL ESCRITO EN WORD
*$call =xls2gms r=DATO68!c5:ai11 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=maxfbiomassfield.inc
$include maxfbiomassfield.inc
;

PARAMETERS

CEMISREF(i)                                  COSTO POR TONELADA DE LAS EMISIONES QUE SE CAPTURAN POR LAS
ECOINDUSTRIAS DE LAS REFINERIAS
/
1      10
2      10
3      10
4      10
5      10
6      10
7      10
8      10
9      10
/
CEMISBIOREF(b)                               COSTO POR TONELADA DE LAS EMISIONES QUE SE CAPTURAN POR LAS
ECOINDUSTRIAS DE LAS REFINERIAS
/
1      8
2      8
3      8
4      8
5      8
6      8
/
FOILMAX1(i1)                                  MAXIMUM CAPACITY OF PRODUCTION FOR THE EXISTING REFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO44!b4:c9 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=foilmax1.inc

```

```

$include foilmax1.inc
/
FOILMAX2(i2)          MAXIMUM CAPACITY OF PRODUCTION FOR THE NEW REFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO45!b4:c6 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=foilmax2.inc
$include foilmax2.inc
/
FOILMIN(i2)          MINIMUM CAPACITY OF PRODUCTION FOR THE NEW REFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO46!b5:c7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=foilmin.inc
$include foilmin.inc
/
FCOSTREF(i2)         FIXED COST FOR THE CAPITAL COST OF THE NEW REFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO47!b5:c7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fcostref.inc
$include fcostref.inc
/
VCOSTREF(i2)         VARIABLE COST FOR THE CAPITAL COST OF THE NEW REFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO48!b5:c7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=vcostref.inc
$include vcostref.inc
/
GAMAREF(i2)          CAPACITY EXPONENT FOR THE CAPITAL COST FUNCTION OF THE NEW REFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO49!b5:c7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamaref.inc
$include gamaref.inc
/
OPCOSTREF(i)         UNITARY OPERATING COST FOR THE REFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO50!b4:c12 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=opcostref.inc
$include opcostref.inc
/
KF                   ANNUALIZING FACTOR
HY                   OPERATIONAL HOURS

FBIOMASSMAX1(b1)     MAXIMUM CAPACITY OF PRODUCTION FOR THE EXISTING BIOREFINERIES
/
*$call =xls2gms r=SI SE TIENEN DATOS CAMBIAR EL RANGO, PORQUE AHORITA NO SE TIENEN BIOREFINERIAS
EXISTENTES i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fbiomassmax1.inc
*$include fbiomassmax1.inc
/
FBIOMASSMIN(b2)      MINIMUM CAPACITY OF PRODUCTION FOR THE NEW BIOREFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO52!b5:c10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fbiomassmin.inc
$include fbiomassmin.inc
/
FBIOMASSMAX2(b2)     MAXIMUM CAPACITY OF PRODUCTION FOR THE NEW BIOREFINERIES
/

```

```

*$call =xls2gms r=DATO53!b5:c10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fbiomassmax2.inc
$include fbiomassmax2.inc
/
FCOSTBIOREF(b2)          FIXED COST FOR THE CAPITAL COST OF THE NEW BIOREFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO54!b5:c10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fcostbioref.inc
$include fcostbioref.inc
/
GAMABIOREF(b2)          CAPACITY EXPONENT FOR THE CAPITAL COST FUNCTION OF THE NEW BIOREFINERIES
/
*$call =xls2gms r=DATO55!b5:c10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamabioref.inc
$include gamabioref.inc
/
OCOPECOIND(e)          COSTO UNITARIO DE OPERACION PARA LAS ECOINDUSTRIAS
/
*$call =xls2gms r=DATO56!b5:c36 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=ocopecoind.inc
$include ocopecoind.inc
/
DLANDMAX(e)            LIMITE MAXIMO DE TIERRA DISPONIBLE PARA REFORESTACION
/
*$call =xls2gms r=DATO57!b5:c36 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=dlandmax.inc
$include dlandmax.inc
/
DLANDMIN(e)            LIMITE MINIMO DE TIERRA DISPONIBLE PARA REFORESTACION
/
*$call =xls2gms r=DATO58!b5:c36 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=dlandmin.inc
$include dlandmin.inc
/
ULAND(e)               AREA DE TIERRA NECESARIA PARA CADA ARBOL
/
*$call =xls2gms r=DATO59!b5:c36 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=uland.inc
$include uland.inc
/
FCOSTECO(e)            COSTO FIJO PARA EL COSTO DE CAPITAL DE LAS ECOINDUSTRIAS
/
*$call =xls2gms r=DATO60!b5:c36 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=fcosteco.inc
$include fcosteco.inc
/
VCOSTECO(e)            COSTO VARIABLE PARA EL COSTO DE CAPITAL DE LAS ECOINDUSTRIAS
/
*$call =xls2gms r=DATO61!b5:c36 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=vcosteco.inc
$include vcosteco.inc
/
GAMAECOIND(e)          EXPONENTE DE CAPACIDAD PARA LA FUNCION DE COSTO DE CAPITAL DE LAS
ECOINDUSTRIAS (31)
/
*$call =xls2gms r=DATO62!b5:c36 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamaecoind.inc
$include gamaecoind.inc

```

```

/
GAMATTRANSREF1(i2)          EXPONENTE DE CAPACIDAD PARA LA FUNCION DE COSTO DE CAPITAL PARA EL
                             TRANSPORTE DE PETROLEO CRUDO DEL POZO PETROLERO A LAS NUEVAS REFINERIAS (36)
/
*$call =xls2gms r=DATO63!b5:c7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamatransref1.inc
$include gamatransref1.inc
/
GAMATTRANSREF2(i2)          EXPONENTE DE CAPACIDAD PARA LA FUNCION DE COSTO DE CAPITAL PARA EL
                             TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE LAS NUEVAS REFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCION (43)
/
*$call =xls2gms r=DATO64!b5:c7 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamatransref2.inc
$include gamatransref2.inc
/
GAMATTRANSBIOR1(b2)         EXPONENTE DE CAPACIDAD PARA LA FUNCION DE COSTO DE CAPITAL PARA EL
                             TRANSPORTE DE BIOMASA A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (50)
/
*$call =xls2gms r=DATO65!b5:c10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamatransbior1.inc
$include gamatransbior1.inc
/
GAMATTRANSBIOR2(b2)         EXPONENTE DE CAPACIDAD PARA LA FUNCION DE COSTO DE CAPITAL PARA EL
                             TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (56)
/
*$call =xls2gms r=DATO66!b5:c10 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamatransbior2.inc
$include gamatransbior2.inc
/
GAMAEMISIONECOIND(e)        CANTIDAD UNITARIA DE EMISIONES DE CO2 CAPTURADA POR ECOINDUSTRIA Ó
                             CANTIDAD DE EMISIONES DE CO2 CAPTURADA POR ÁRBOL PARA CADA ECOINDUSTRIA (69)
/
*$call =xls2gms r=DATO67!b4:c35 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=gamaemisionecoind.inc
$include gamaemisionecoind.inc
/
DEMANDDIESEL(j)             DEMANDA DE DIESEL POR CENTRO DE DISTRIBUCION
/
*$call =xls2gms r=DATO69!n5:o49 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=demanddiesel.inc
$include demanddiesel.inc
/
**SE AGREGO ESTE PARAMETRO FALTA PONER EN NOMENCLATURA
DEMANDGASOLINA(j)           DEMANDA DE GASOLINA POR CENTRO DE DISTRIBUCION
/
*$call =xls2gms r=DATO70!n5:o49 i=DATOS_PARA_PROGRAMA_ECOINDUSTRIES.xls o=demandgasolina.inc
$include demandgasolina.inc
/
**SE AGREGO ESTE PARAMETRO FALTA PONER EN NOMENCLATURA
JOBSUNITREF(i2)             EMPLEOS GENERADOS POR TONELADA DE PETROLEO PROCESADO
/
7*9          0.001019466
*LA MISMA DE BIOREFINERIAS MULTIPLICADA POR 1.5
/

```

```

**SE AGREGO ESTE PARAMETRO FALTA PONER EN NOMENCLATURA
JOBSUNITBIOMASSPLANT (bm,m)      EMPLEOS GENERADOS POR TONELADA DE BIOMASA PRODUCIDA
/
1.1*32    0.00029925
2.1*32    0.007665185
3.1*32    1.9e-7
4.1*32    0.00029925
5.1*32    0.00029925
6.1*32    0.003832688

*1.- ASTILLAS DE MADERA
*2.- CAÑA DE AZUCAR
*3.- SORGO DULCE
*4.- JATROPHA
*5.- PALMA AFRICANA
*6.- RESIDUOS DE AGAVE
/
**SE AGREGO ESTE PARAMETRO FALTA PONER EN NOMENCLATURA
JOBSUNITBIOMASSTRANS (bm,m,b)    EMPLEOS GENERADOS POR TONELADA DE BIOMASA TRANSPORTADA
/
1*6.1*32.1*6    5.8708E-4
/
**SE AGREGO ESTE PARAMETRO FALTA PONER EN NOMENCLATURA
JOBSUNITBIOMASSBIOREF (bm,b)      EMPLEOS GENERADOS POR TONELADA DE BIOMASA PROCESADA EN
      BIOREFINERIAS
/
1*6.1*6    0.000679644
/
**SE AGREGO ESTE PARAMETRO FALTA PONER EN NOMENCLATURA
JOBSUNITECOIND (e)                EMPLEOS GENERADOS POR ÁRBOL PLANTADO
/
1*32    0.000189063
/
**SE AGREGO ESTE PARAMETRO FALTA PONER EN NOMENCLATURA
;

KF= 0.1;

HY= 365;
*FOILMAX1 (i1)=1.4*FOILMAX1 (i1);

*FOILMAX2 (i2)=1.4*FOILMAX2 (i2);

POSITIVE VARIABLES
FOILused (i,p1)    REAL FLOW OF OIL USED IN THE REFINERIES TO PRODUCE THE PRODUCT p1
FOIL (i)          TOTAL FLOW OF OIL IN THE REFINERIES (1)
FOIL1 (o,i)      FLOW OF OIL THAT IS OBTAINED FROM THE WELL OIL (2)
FPRODUCTREF (p1,i) TOTAL FLOW OF PRODUCTS FROM REFINERIES (3)

```

fPRODUCTREF1 (p1, i, j)	DISTRIBUTED PRODUCTS FROM REFINERIES TO DISTRIBUTION CENTERS (4)
CCAPREF (i2)	CAPITAL COST FOR THE NWE REFINERIES (5)
COPREF (i)	OPERATING COST FOR THE REFINERIES (6)
COSTOIL (i)	PRODUCTION COST OF OIL (7)
COSTPRODREF (i)	PRODUCTION COST OF PRODUCTS FROM REFINERIES (8)
REVENUESOLDPRODUCTREF (i)	REVENUE FOR SELING OF PRODUCTS OF REFINERIES (9)
CTRANSOILEXIS (i1)	TRANSPORTATION COST FOR OIL (11)
CTRANSPRODUCTSREFEXIS (i1)	TRANSPORTATION COST FOR PRODUCTS FROM EXISTING REFINERIES (12)
CTRANSOILNEW (i2)	TRANSPORTATION COST FOR OIL FOR THE NEW REFINERIES (13)
CTRANSPRODUCTSREFNEW (i2)	TRANSPORTATION COST FOR PRODUCTS FROM NEW REFINERIES (14)
FBIOMASS (bm, b)	TOTAL FLOW OF BIOMASS IN THE BIOREFINERIES (15)
fBIOMASS1 (bm, m, b)	DISTRIBUTED BIOMASS FROM THE FIELD BIOMASS TO BIOREFINERIES (16)
FPRODUCTBIOREF (p2, b)	TOTAL FLOW OF BIOPRODUCTS FROM BIOREFINERIES (17)
fPRODUCTBIOREF1 (p2, b, j)	DISTRIBUTED BIOPRODUCTS FROM BIOREFINERIES TO DISTRIBUTION CENTERS (18)
CCAPBIOREF (b2)	CAPITAL COST FOR THE NWE BIOREFINERIES (19)
COPBIOREF (b)	OPERATING COST FOR BIREFINERIES (NEW AND EXISTING) (20)
COSTBIOMASSGROWTH (b)	GROWTH BIOMASS COST (21)
COSTBIOREFPRODUCT (b)	PRODUCTION COST OF PRODUCTS FROM BIOREFINERIES (22)
REVENUESOLDPRODBIOREF (b)	REVENUE FOR SELING OF PRODUCTS OF BIOREFINERIES (23)
CTRANSBIOMASSEXIS (b1)	TRANSPORTATION COST FOR BIOMASS TO EXISTING BIOREFINERIES (25)
CTRANSPRODUCTBIOREFEXIS (b1)	TRANSPORTATION COST FOR BIOPRODUCTS FROM EXISTING BIOREFINERIES (26)
CTRANSBIOMASSNEW (b2)	TRANSPORTATION COST FOR BIOMASS TO NEW BIOREFINERIES (27)
CTRANSPRODUCTBIOREFNEW (b2)	TRANSPORTATION COST FOR BIOPRODUCTS FROM NEW BIOREFINERIES (28)
COPECOIND (e)	COSTO DE OPERACION PARA LAS ECO INDUSTRIAS (29)
NT (e)	NUMERO TOTAL DE ARBOLES PARA CADA ECO INDUSTRIA (30)
CCAPECOIND (e)	COSTO DE CAPITAL PARA LAS ECO INDUSTRIAS (31)
CTOTALECOIND (e)	COSTO TOTAL DE LAS ECO INDUSTRIAS (32)
CCAPTRANSOIL (i2)	COSTO DE CAPITAL PARA EL TRANSPORTE DE PETROLEO A LAS NUEVAS REFINERIAS (33)
COPTRANSOIL (i2)	COSTO DE OPERACION PARA EL TRANSPORTE DE PETROLEO A LAS NUEVAS REFINERIAS (34)
COPTRANSPRODUCTSREF (i2)	COSTO DE OPERACIÓN PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE PETROLEO DE LAS NUEVAS REFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (35)
FALTA ESCRIBIRLA EN EL IMPRESO DE WORD DONDE VOY CONTABILIZANDO LA NOMENCLATURA	

CCAPTRANSPRODUCTSREF(i2) COSTO DE CAPITAL PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE PETROLEO DE LAS NUEVAS REFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (36)
 FALTA ESCRIBIRLA EN EL IMPRESO DE WORD DONDE VOY CONTABILIZANDO LA NOMENCLATURA

CCAPTRANSBIOMASS(b2) COSTO DE CAPITAL PARA EL TRANPORTE DE BIOMASA DE LOS CAMPOS A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (37)
 FALTA ESCRIBIRLA EN EL IMPRESO DE WORD DONDE VOY CONTABILIZANDO LA NOMENCLATURA

COPTRANSBIOMASS(b2) COSTO DE OPERACION PARA EL TRANPORTE DE BIOMASA DE LOS CAMPOS A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (38)
 FALTA ESCRIBIRLA EN EL IMPRESO DE WORD DONDE VOY CONTABILIZANDO LA NOMENCLATURA

CCAPTRANSPRODUCTBIOREF(b2) COSTO DE CAPITAL PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE BIOMASA DE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (39)
 FALTA ESCRIBIRLA EN EL IMPRESO DE WORD DONDE VOY CONTABILIZANDO LA NOMENCLATURA

COPTRANSPRODUCTBIOREF(b2) COSTO DE OPERACIÓN PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE BIOMASA DE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (40)
 FALTA ESCRIBIRLA EN EL IMPRESO DE WORD DONDE VOY CONTABILIZANDO LA NOMENCLATURA

EOILEXT(i) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR OIL EXTRACTION (41)

EPRODUCTREF(i) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR OIL REFINING (42)

ETRANSPRODUCTREF(i) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR TRANSPORTATION OF PRODUCTS FROM OIL (43)

EUSEPRODUCTREF(i) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR BURNING OF PRODUCTS FROM OIL (44)

NEBIOMASSBROWTH(b) CAPTURED EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR THE BIOMASS GROWTH (45)

EBIOMASSTRANS(b) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR BIOMASS TRANSPORTATION (46)

EBIOREFPRODUCT(b) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR TRANSPORTATION OF PRODUCTS FROM BIOREFINERIES (47)

ETRANSPRODBIOREF(b) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR PRODUCTS TRANSPORTATION FROM BIOREFINERIES (48)

EUSEPRODBIOREF(b) EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FOR BURNING PRODUCTS FROM BIOREFINERIES (49)

EMREFINERY(i) TOTAL EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FROM REFINERIES (50)

EMBIOREF(b) TOTAL EQUIVALENT EMISSIONS OF CO2 FROM BIOREFINERIES (51)

EMECOIND(e) CANTIDAD DE EMISIONES DE CO2 CAPTURADA POR ECO INDUSTRIA(52)

FBIOMASSFIELD(bm,m) CANTIDAD DE BIOMASA DISTRIBUIDA DESDE LOS CAMPOS A LAS BIOREFINERIAS (53)
 ***SE AGREGÓ ESTA VARIABLE POR UNA ECUACION AGREGADA, POR TANTO FALTA AGREGARLA EN LA NOMENCLATURA DEL ESCRITO EN WORD

EMCAPREFINERY(i) EMISIONES CAPTURADAS PARA CADA UNA DE LAS REFINERIAS (PARA PODER COBRARSELAS)

EMCAPBIOREFINERY(b) EMISIONES CAPTURADAS PARA CADA UNA DE LAS BIOREFINERIAS (PARA PODER COBRARSELAS)

fOIL1para(o,i2)

FOILpara(i2)

FPRODUCTREFpara(p1,i2)

```

fPRODUCTREF1para(p1,i2,j)
;
VARIABLES
PROFITREFINERY          TOTAL PROFIT FOR REFINERIES (10)
PROFITBIOREF           TOTAL PROFIT FOR BIOREFINERIES (24)
EOF                    ECONOMIC OBJECTIVE FUNCTION (53)
NETEMISSION           EMISIONES NETAS TOTALES (54)
PROFITECOIND
MAXIMAPRODUCTION
JOBSREFINERY
JOBSBIOREFIN
JOBSECOIND
TOTALJOBS
;
BINARY VARIABLES

YREF(i2)               Binary variable for the existing of new refineries (1)
YBIOREF(b2)           Binary variable for the existing of new biorefineries (2)
YPIPOILREF(o,i2)     Binary variable for the transportation of oil to the new refineries (3)
YPIPPRODUCTREF(p1,i2,j) Binary variable for the transportation of products from the new
                      refineries (4)
YTRANSBIOMASS(bm,m,b2) Binary variable for the transportation of biomass to the new
                      biorefineries (5)
YTRANSPRODBIOREF(p2,b2,j) Binary variable for the transportation of products from the new
                      biorefineries (6)
YECOIND(e)            VARIABLE BINARIA PARA LA EXISTENCIA DE LAS ECOINDUSTRIAS (7)
YREFpara(i2)
;
SCALARS
ECOMINIMAS
BIOREFMINIMAS
REFMINIMAS;
ECOMINIMAS=0;
BIOREFMINIMAS=0;
REFMINIMAS=0;

EQUATIONS

EQ1(i)                BALANCE DE MASA PARA LAS REFINERIAS
EQ2(i,p1)             ECUACION PARA LA PRODUCCION DE LAS REFINERIAS
EQ3(i,p1)             ECUACIÓN PARA LA DISTRIBUCION DE PRODUCTO DE LAS REFINERIAS
EQ4(i1)               RESTRICCIÓN PARA LA MAXIMA CAPACIDAD DADA PARA LAS REFINERIAS EXISTENTES
EQ5A(i2)              RESTRICCIÓN PARA LA EXISTENCIA DE LAS NUEVAS REFINERIAS PRIMERA PARTE
EQ5B(i2)              RESTRICCIÓN PARA LA EXISTENCIA DE LAS NUEVAS REFINERIAS SEGUNDA PARTE
EQ6(i2)               ECUACIÓN PARA EL COSTO DE CAPITAL QUE SE APLICA DESPUES DE LA RESTRICCIÓN PARA
                      LA EXISTENCIA DE LAS NUEVAS REFINERIAS SI EXISTE UNA NUEVA REFINERIA
EQ7(i)                ECUACION PARA EL CALCULO DEL COSTO DE OPERACION DE LAS REFINERIAS PARA TRATAR EL
                      PETROLEO CRUDO

```

EQ8 (i) ECUACION PARA EL COSTO DEL PETROLEO PARA LAS REFIENRIAS
 *EQ9 (i) ECUACION PARA EL COSTO DE PRODUCCION DE LAS REFIENRIAS
 **DUDA*

EQ10 (i) INGRESOS POR LA VENTA DE PRODUCTOS DE REFINERIAS
 EQ11 GANANCIAS TOTALES PARA LAS REFIENRIAS
 *////////////////////
 *-----

EQ11A (i) ECUACION PARA LIMITAR LAS EMISIONES CAPTURADAS DE LAS REFINERIAS
 *-----
 *////////////////////

EQ12 (bm, b) BALANCE DE BIOMASA PARA LAS BIOREFINERIAS
 EQ12A (bm, m) BALANCE DE BIOMASA DISTRIBUIDA DESDE LOS CAMPOS A LAS BIOREFIERIAS
 EQ12B (bm, m) RESTRICCIÓN DE DISPONIBILIDAD DE BIOMASA EN LOS CAMPOS
 EQ13 (p2, b) ECUACION PARA LA PRODUCCION DE LAS BIOREFIENRIAS
 EQ14 (p2, b) DISTRIBUCION DE PRODUCTOS DE LAS BIOREFINERIAS
 EQ15 (b1) RESTRICCIÓN PARA LA MAXIMA CAPACIDAD DADA PARA LAS BIOREFINERIAS EXISTENTES
 EQ16A (b2) RESTRICCIÓN PARA LA EXISTENCIA DE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS PRIMERA PARTE
 EQ16B (b2) RESTRICCIÓN PARA LA EXISTENCIA DE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS SEGUNDA PARTE
 EQ17 (b2) ECUACIÓN PARA EL COSTO DE CAPITAL QUE SE APLICA DESPUES DE LA RESTRICCIÓN PARA
 LA EXISTENCIA DE LAS NUEVAS BIOREFIENRIAS SI EXISTE UNA NUEVA BIOREFINERIA
 EQ18 (b) ECUACION PARA EL COSTO DE OPERACION DE LAS BIOREFINERIAS
 EQ19 (b) ECUACION PARA COSTO POR PRODUCCION DE BIOMASA PARA BIOREFINEIRAS ES DECIR ES EL
 COSTO POR LA COMPRA DE BIOMASA QUE LAS BIOREFINERIAS COMPRAN A LOS CAMPOS DE PRODUCCION DE
 BIOMASA
 *EQ20 (b) COSTO DE PRODUCCION DE LAS BIOREFINERIAS
 DUDA
 EQ21 (b) INGRESOS POR LA VENTA DE PRODUCTOS DE LAS BIOREFIENRIAS
 EQ22 GANANCIAS TOTALES PARA LAS BIOREFINERIAS
 *////////////////////
 *-----

EQ22A (b) ECUACION PARA LIMITAR LAS EMISIONES CAPTURADAS DE LAS BIOREFINERIAS
 *-----
 *////////////////////

EQ23 (e) COSTO DE OPERACIÓN PARA LAS ECO INDUSTRIAS
 EQ24A (e) RESTRICCIÓN DE LIMITES MAXIMOS Y MINIMOS DE TIERRA DISPONIBLE PARA REFORESTACION
 PARA LAS ECOINDUSTRIAS PRIMERA PARTE
 EQ24B (e) RESTRICCIÓN DE LIMITES MAXIMOS Y MINIMOS DE TIERRA DISPONIBLE PARA REFORESTACION
 PARA LAS ECOINDUSTRIAS SEGUNDA PARTE
 EQ25 (e) ECUACION PARA COSTO DE CAPITAL DE LAS ECOINDUSTRIAS
 EQ26 (e) ECUACION DE COSTO TOTAL PARA LAS ECOINDUSTRIAS
 EQ27 (i1) ECUACION PARA COSTO DE TRANSPORTE DEL PETROLEO CRUDO DESDE EL POZO A LAS
 REFINERIAS EXISTENTES
 EQ28 (i1) ECUACIÓN PARA COSTO DE TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE LAS REFINERIAS EXISTENTES A
 LOS CENTROS DE DISTRIBUCION

EQ29 (i2)	ECUACION PARA COSTO DE CAPITAL PARA EL TRANSPORTE DE PETROLEO CRUDO DESDE AL POZO A LAS NUEVAS REFINERIAS (SUPONIENDO QUE SE NECESITARA INSTALAR NUEVAS TUBERIAS)
EQ30 (i2)	ECUACION PARA COSTO DE OPERACION PARA EL TRANSPORTE O BOMBEO DE PETROLEO CRUDO DESDE EL POZO A LAS NUEVAS REFINERIAS
EQ31 (i2)	ECUACION PARA COSTO DE TRANSPORTE DEL PETROLEO DESDE EL POZO A LAS NUEVAS REFINERIAS
EQ32A (o, i2)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DEL PETROLEO SI SE TIENEN NUEVAS REFINERIAS Y SE REQUIEREN NUEVAS TUBERIAS PRIMERA PARTE (DONDE SE LIMITA EL FLUJO DE PETROLEO)
EQ32B (o, i2)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DEL PETROLEO SI SE TIENEN NUEVAS REFINERIAS Y SE REQUIEREN NUEVAS TUBERIAS SEGUNDA PARTE (DONDE SE LIMITA EL FLUJO DE PETROLEO)
EQ33 (i2)	ECUACIÓN PARA COSTO OPERACION PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE LAS NUEVAS REFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCION
EQ34 (i2)	ECUACIÓN PARA COSTO CAPITAL PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE LAS NUEVAS REFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCION
EQ35 (i2)	ECUACIÓN PARA COSTO DE TRANSPORTE DE PRODUCTOS DE LAS REFINERIAS EXISTENTES A LOS CENTROS DE DISTRIBUCION DONDE SE SUMAN EL COTO DE OPERACION Y EL DE CAPITAL
EQ36A (p1, i2, j)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DE PRODUCTOS SI SE REQUIEREN NUEVA INFRAESTRUCTURA DESDE LAS NUEVAS REFINERIAS A CENTROS DE DISTRIBUCION (LIMITE MINIMO)
EQ36B (p1, i2, j)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DE PRODUCTOS SI SE REQUIEREN NUEVA INFRAESTRUCTURA DESDE LAS NUEVAS REFINERIAS A CENTROS DE DISTRIBUCION (LIMITE MAXIMO)
EQ37 (b1)	ECUACIÓN PARA EL COSTO DE TRANSPORTE DE BIOMASA DESDE LOS CAMPOS A LAS BIOREFINERIAS EXISTENTES
EQ38 (b1)	ECUACIÓN PARA EL COSTO DE TRANSPORTE DE PRODUCTOS DESDE LAS BIOREFINERIAS EXISTENTES A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN
EQ39 (b2)	ECUACION PARA COSTO DE CAPITAL PARA EL TRANSPORTE DE BIOMASA DESDE EL CAMPO A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (SUPONIENDO QUE SE NECESITARA INSTALAR NUEVAS CARRETERAS)
EQ40 (b2)	ECUACION PARA COSTO DE OPERACIÓN PARA EL TRANSPORTE DE BIOMASA DESDE EL CAMPO A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (SUPONIENDO QUE SE NECESITARA INSTALAR NUEVAS CARRETERAS)
EQ41 (b2)	ECUACIÓN PARA EL COSTO TOTAL DE TRANSPORTE DE BIOMASA DESDE EL CAMPO A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (CONSIDERA EL DE CAPITAL Y EL DE OPERACIÓN)
EQ42A (bm, m, b2)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DE BIOMASA SI SE REQUIERE NUEVA INFRAESTRUCTURA DESDE LOS CAMPOS A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (LIMITE MINIMO)
EQ42B (bm, m, b2)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DE BIOMASA SI SE REQUIERE NUEVA INFRAESTRUCTURA DESDE LOS CAMPOS A LAS NUEVAS BIOREFINERIAS (LIMITE MAXIMO)
EQ43 (b2)	ECUACIÓN PARA COSTO DE CAPITAL PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DESDE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCION (SUPONIENDO QUE SE NECESITARA INSTALAR NUEVA INFRAESTRUCTURA)
EQ44 (b2)	ECUACIÓN PARA COSTO DE OPERACIÓN PARA EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DESDE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCION (SUPONIENDO QUE SE NECESITARA INSTALAR NUEVA INFRAESTRUCTURA)
EQ45 (b2)	ECUACIÓN PARA EL COSTO TOTAL DE TRANSPORTE DE PRODUCTOS DESDE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (CONSIDERA EL DE CAPITAL Y EL DE OPERACIÓN)
EQ46A (p2, b2, j)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DE PRODUCTOS SI SE REQUIERE NUEVA INFRAESTRUCTURA DESDE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (LIMITE MINIMO)
EQ46B (p2, b2, j)	RESTRICCION PARA TRANSPORTE DE PRODUCTOS SI SE REQUIERE NUEVA INFRAESTRUCTURA DESDE LAS NUEVAS BIOREFINERIAS A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN (LIMITE MAXIMO)
EQ47 (i)	EMISIONES POR LA EXTRACCIÓN DE PETROLEO PARA LAS REFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES)

EQ48 (i) EMISIONES POR LA PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS EN LAS REFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES)

EQ49 (i) EMISIONES POR EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS DESDE LAS REFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES) A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN

EQ50 (i) EMISIONES POR EL USO DE PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO COMO COMBUSTIBLES "TODO EL PRODUCTO PRODUCIDO ES QUEMADO"

EQ51 (b) EMISIONES CAPTURADAS DURANTE EL CRECIMIENTO DE LA BIOMASA EN LOS CAMPOS "TODO LA BIOMASA EN LAS BIOREFINERIAS FUE OBTENIDA A PARTIR DE LOS CAMPOS"

*DUDA NO QUEDARIA MEJOR LA ECUACION 51 EXPRESADA EN FUNCION DEL FLUJO PRODUCIDO EN LOS CAMPOS

EQ52 (b) EMISIONES POR EL TRANSPORTE DE BIOMASA DESDE LOS CAMPOS A LAS BIOREFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES)

EQ53 (b) EMISIONES POR LA PRODUCCIÓN LLEVADA A CABO EN LAS BIOREFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES)

EQ54 (b) EMISIONES POR EL TRANSPORTE DE BIOPRODUCTOS DESDE LAS BIOREFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES) A LOS CENTROS DE DISTRIBUCIÓN

EQ55 (b) EMISIONES POR EL USO DE LOS BIOPRODUCTOS COMO BIOCOMBUSTIBLES "TODO EL PRODUCTO PRODUCIDO ES QUEMADO"

EQ56 (i) EMISIONES TOTALES ASOCIADAS A LAS REFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES) SUMA DE TODAS LAS EMISIONES ASOCIADAS A REFINERIAS

EQ57 (b) EMISIONES TOTALES ASOCIADAS A LAS BIOREFINERIAS (TANTO NUEVAS COMO EXISTENTES) SUMA DE TODAS LAS EMISIONES ASOCIADAS A LAS BIOREFINERIAS

EQ58 (e) EMISIONES TOTALES ASOCIADAS A LAS ECOINDUSTRIAS (SOLO CAPTURAN CO2 PORQUE SE DEDICAN A ESO)

EQ59 FUNCION OBJETIVO ECONOMICA

EQ59A CALCULO DE LA PROFIT DE LAS ECOINDUSTRIAS

EQ60 FUNCION OBJETIVO AMBIENTAL (CONSIDERA TODAS LAS EMISIONES)

EQ61 BALANCE DE EMISIONES CAPTURADAS DE LAS REFINERIAS Y BIOREFINERIAS GRACIAS A LA INSTALACION DE ECOINDUSTRIAS

EQ62 DETERMINA CUANTAS ECOINDUSTRIAS SE QUIEREN AL MENOS

EQ63 DETERMINA CUANTAS BIOREFINERIAS NUEVAS SE QUIEREN AL MENOS

EQ64 DETERMINA CUANTAS REFINERIAS NUEVAS SE QUIEREN AL MENOS

EQ65 (j) ECUACION PARA DEMANDA DE DIESEL POR CENTRO DE DISTRIBUCIÓN

EQ66 (j) ECUACION PARA DEMANDA DE GASOLINA POR CENTRO DE DISTRIBUCIÓN

EQ67

EQ1A (i, p1)

EQ68 ECUACION PARA CALCULAR EMPLEOS EN LAS REFIENRIAS NUEVAS

EQ69 ECUACION PARA CALCULAR EMPLEOS EN LAS BIOREFINERIAS NUEVAS (PORQUE NO HAY EXISTENTES)

EQ70 ECUACION PARA CALCULAR EMPLEOS EN LAS ECO-INDUSTRIAS

EQ71 ECUACION PARA CALCULAR LOS EMPLEOS TOTALES

;

EQ1 (i) .. FOIL (i) = E = SUM ((o), FOIL1 (o, i));

EQ1A (i, p1) .. FOIL (i) = G = FOILused (i, p1);

EQ2 (i, p1) .. FPRODUCTREF (p1, i) = E = ALFAPRODUCTREF (p1, i) * FOILused (i, p1);

EQ3 (i, p1) .. FPRODUCTREF (p1, i) = E = SUM ((j), fPRODUCTREF1 (p1, i, j));

EQ4 (i1) .. FOIL (i1) = L = FOILMAX1 (i1);

EQ5A (i2) .. FOILMIN (i2) * YREF (i2) = L = FOIL (i2);

EQ5B (i2) .. FOIL (i2) = L = FOILMAX2 (i2) * YREF (i2);

```

*EQ6 (i2) ..    CCAPREF (i2)=E=KF* (FCOSTREF (i2)*YREF (i2)+VCOSTREF (i2)* (FOIL (i2))**GAMAREF (i2));
EQ6 (i2) ..    CCAPREF (i2)=E=KF* (FCOSTREF (i2)*YREF (i2)+VCOSTREF (i2)* (FOIL (i2)));
EQ7 (i) ..     COPREF (i)=E=HY*OPCOSTREF (i)*FOIL (i);
EQ8 (i) ..     COSTOIL (i)=E=SUM ( (o),UCOIL (o,i)* (HY*FOIL (o,i)));
*EQ9 (i) ..     COSTPRODREF (i)=E=SUM ( (p1),UCPRODREF (p1,i)* (HY*FPRODUCTREF (p1,i)));
**DUDA*
EQ10 (i) ..
    REVENUESOLDPRODUCTREF (i)=E=SUM ( (p1),UCSELLINGPRODUCTREF (p1,i)* (HY*FPRODUCTREF (p1,i)));
EQ11 ..
    PROFITREFINERY=E=SUM ( (i),REVENUESOLDPRODUCTREF (i))-SUM ( (i),COSTOIL (i))-
    SUM ( (i),COPREF (i))-SUM ( (i1),CTRANSOILEXIS (i1))
        -SUM ( (i1),CTRANSPRODUCTSREFEXIS (i1))-SUM ( (i2),CTRANSOILNEW (i2))-
    SUM ( (i2),CTRANSPRODUCTSREFNEW (i2))-SUM ( (i2),CCAPREF (i2))
        -SUM ( (i),CEMISREF (i)*EMCAPREFINERY (i));
*//////////
*-----
EQ11A (i) ..    EMCAPREFINERY (i)=L=EMREFINERY (i);

*-----
*//////////
EQ12 (bm,b) .. FBIOMASS (bm,b)=E=SUM ( (m),fFBIOMASS1 (bm,m,b));
EQ12A (bm,m) .. FBIOMASSFIELD (bm,m)=E=SUM ( (b),fFBIOMASS1 (bm,m,b));
*SE AGREGO ESTA ECUACION
EQ12B (bm,m) .. FBIOMASSFIELD (bm,m)=L=MAXFBIOMASSFIELD (bm,m);
*SE AGREGO ESTA ECUACION
EQ13 (p2,b) .. FPRODUCTBIOREF (p2,b)=E=SUM ( (bm),ALFAPRODBIOREF (p2,bm,b)*FBIOMASS (bm,b));
EQ14 (p2,b) .. FPRODUCTBIOREF (p2,b)=E=SUM ( (j),fPRODUCTBIOREF1 (p2,b,j));
EQ15 (b1) ..    SUM ( (bm),FBIOMASS (bm,b1))=L=FBIOMASSMAX1 (b1);
EQ16A (b2) ..   FBIOMASSMIN (b2)*YBIOREF (b2)=L=SUM ( (bm),FBIOMASS (bm,b2));
EQ16B (b2) ..   SUM ( (bm),FBIOMASS (bm,b2))=L=FBIOMASSMAX2 (b2)*YBIOREF (b2);
*EQ17 (b2) ..
    CCAPBIOREF (b2)=E=KF* (FCOSTBIOREF (b2)*YBIOREF (b2)+SUM ( (bm),VCOSTBIOREF (bm,b2)* (FBIOMASS (bm,
    b2))**GAMABIOREF (b2)));
EQ17 (b2) ..
    CCAPBIOREF (b2)=E=KF* (FCOSTBIOREF (b2)*YBIOREF (b2)+SUM ( (bm),VCOSTBIOREF (bm,b2)* (FBIOMASS (bm,
    b2))));
EQ18 (b) ..    COPBIOREF (b)=E=HY*SUM ( (bm),OPCOSTBIOREF (bm,b)*FBIOMASS (bm,b));
EQ19 (b) ..    COSTBIOMASSGROWTH (b)=E=SUM ( (bm,m),UCBIOMASSGROWTH (bm,b,m)* (HY*FBIOMASS (bm,b)));
*EQ20 (b) ..    COSTBIOREFPRODUCT (b)=E=SUM ( (bm,p2),UCBIOREFPROD (p2,bm,b)* (HY*FBIOMASS (bm,b)));
**DUDA**
EQ21 (b) ..
    REVENUESOLDPRODBIOREF (b)=E=SUM ( (p2),UCREVENUEPRODBIOREF (p2,b)* (HY*FPRODUCTBIOREF (p2,b)));
EQ22 ..
    PROFITBIOREF=E=SUM ( (b),REVENUESOLDPRODBIOREF (b))-SUM ( (b),COSTBIOMASSGROWTH (b))
        -SUM ( (b),COPBIOREF (b))-SUM ( (b1),CTRANSBIOMASSEXIS (b1))-
    SUM ( (b1),CTRANSPRODUCTBIOREFEXIS (b1))
        -SUM ( (b2),CTRANSBIOMASSNEW (b2))-SUM ( (b2),CTRANSPRODUCTBIOREFNEW (b2))-
    SUM ( (b2),CCAPBIOREF (b2))
        -SUM ( (b),CEMISBIOREF (b)*EMCAPBIOREFINERY (b));
*//////////

```

```

*-----
EQ22A (b) ..   EMCAPBIOREFINERY (b) =L=EMBIOREF (b) ;
*-----
*////////////////////////////////////
EQ23 (e) ..   COPECOIND (e) =E=OCOCPECOIND (e) *NT (e) ;
EQ24A (e) ..   DLANDMAX (e) *YECOIND (e) =G=NT (e) *ULAND (e) ;
EQ24B (e) ..   NT (e) *ULAND (e) =G=DLANDMIN (e) *YECOIND (e) ;
*EQ25 (e) ..   CCAPECOIND (e) =E=KF* (FCOSTECO (e) *YECOIND (e) +VCOSTECO (e) * (NT (e) ) **GAMAECOIND (e) ) ;
EQ25 (e) ..   CCAPECOIND (e) =E=KF* (FCOSTECO (e) *YECOIND (e) +VCOSTECO (e) * (NT (e) ) ) ;
EQ26 (e) ..   CTOTALECOIND (e) =E=COPECOIND (e) +CCAPECOIND (e) ;
EQ27 (i1) ..   CTRANSOILEXIS (i1) =E=SUM ( (o) ,UCPUMPINGOILEXIST (o, i1) * (HY*FOIL1 (o, i1) ) ) ;
EQ28 (i1) ..
      CTRANSPRODUCTSREFEXIS (i1) =E=SUM ( (p1, j) ,UCTRANSPRODUCTREF (p1, i1, j) * (HY*fPRODUCTREF1 (p1, i1, j)
      ) ) ;
*EQ29 (i2) ..
      CCAPTRANSOIL (i2) =E=SUM ( (o) ,KF* (FCOSTPIPOIL (o, i2) *YPIPOILREF (o, i2) +VCOSTOIL (o, i2) * (FOIL1 (o,
      i2) ) **GAMATRANSREF1 (i2) ) ) ;
EQ29 (i2) ..
      CCAPTRANSOIL (i2) =E=SUM ( (o) ,KF* (FCOSTPIPOIL (o, i2) *YPIPOILREF (o, i2) +VCOSTOIL (o, i2) * (FOIL1 (o,
      i2) ) ) ) ;
EQ30 (i2) ..   COPTRANSOIL (i2) =E=SUM ( (o) ,UCPUMPINGOILNEW (o, i2) * (HY*FOIL1 (o, i2) ) ) ;
EQ31 (i2) ..   CTRANSOILNEW (i2) =E=CCAPTRANSOIL (i2) +COPTRANSOIL (i2) ;
EQ32A (o, i2) ..   f1OILMIN (o, i2) *YPIPOILREF (o, i2) =L=fOIL1 (o, i2) ;
EQ32B (o, i2) ..   FOIL1 (o, i2) =L=f1OILMAX (o, i2) *YPIPOILREF (o, i2) ;
EQ33 (i2) ..
      COPTRANSPRODUCTSREF (i2) =E=SUM ( (p1, j) ,UCTRANSPRODREFNEW (p1, i2, j) * (HY*fPRODUCTREF1 (p1, i2, j)
      ) ) ;
*EQ34 (i2) ..
      CCAPTRANSPRODUCTSREF (i2) =E=SUM ( (p1, j) ,KF* (FCOSTPIPPRODREF (p1, i2, j) *YPIPPRODUCTREF (p1, i2, j)
      +VCOSTPRODREF (p1, i2, j) * (fPRODUCTREF1 (p1, i2, j) ) **GAMATRANSREF2 (i2) ) ) ;
EQ34 (i2) ..
      CCAPTRANSPRODUCTSREF (i2) =E=SUM ( (p1, j) ,KF* (FCOSTPIPPRODREF (p1, i2, j) *YPIPPRODUCTREF (p1, i2, j)
      +VCOSTPRODREF (p1, i2, j) * (fPRODUCTREF1 (p1, i2, j) ) ) ) ;
EQ35 (i2) ..   CTRANSPRODUCTSREFNEW (i2) =E=CCAPTRANSPRODUCTSREF (i2) +COPTRANSPRODUCTSREF (i2) ;
EQ36A (p1, i2, j) ..   0.001*fPRODUCTREFMIN (p1, i2, j) *YPIPPRODUCTREF (p1, i2, j) =L=fPRODUCTREF1 (p1, i2, j) ;
****
***
*****
EQ36B (p1, i2, j) ..   fPRODUCTREF1 (p1, i2, j) =L=fPRODUCTREFMAX (p1, i2, j) *YPIPPRODUCTREF (p1, i2, j) ;
EQ37 (b1) ..
      CTRANSBIOMASSEXIS (b1) =E=SUM ( (m, bm) ,UCTRANSBIOMASSEXIST (bm, m, b1) * (HY*fBIOMASS1 (bm, m, b1) ) ) ;
EQ38 (b1) ..
      CTRANSPRODUCTBIOREFEXIS (b1) =E=SUM ( (p2, j) ,UCTRANSPRODBIOREXIS (p2, b1, j) * (HY*fPRODUCTBIOREF1 (
      p2, b1, j) ) ) ;
*EQ39 (b2) ..
      CCAPTRANSBIOMASS (b2) =E=SUM ( (m, bm) ,KF* (FCOSTTRANSBIOMAS (bm, m, b2) *YTRANSBIOMASS (bm, m, b2) +VCO
      STTRANSBIOMASS (bm, m, b2) * (fBIOMASS1 (bm, m, b2) ) **GAMATRANSBIOR1 (b2) ) ) ;

```

EQ39 (b2) ..

$$CCAPTRANSBIOMASS(b2) = E = \sum(m, bm), KF * (FCOSTTRANSBIOMAS(bm, m, b2) * YTRANSBIOMASS(bm, m, b2) + VCOSTTRANSBIOMASS(bm, m, b2) * (fBIOMASS1(bm, m, b2)))$$
;

EQ40 (b2) .. $COPTRANSBIOMASS(b2) = E = \sum(m, bm), UCTTRANSBIOMASSNEW(bm, m, b2) * (HY * fBIOMASS1(bm, m, b2))$;

EQ41 (b2) .. $CTTRANSBIOMASSNEW(b2) = E = CCAPTRANSBIOMASS(b2) + COPTRANSBIOMASS(b2)$;

EQ42A (bm, m, b2) .. $f1BIOMASSMIN(bm, m, b2) * YTRANSBIOMASS(bm, m, b2) = L = fBIOMASS1(bm, m, b2)$;

EQ42B (bm, m, b2) .. $fBIOMASS1(bm, m, b2) = L = f1BIOMASSMAX(bm, m, b2) * YTRANSBIOMASS(bm, m, b2)$;

*EQ43 (b2) ..

$$CCAPTRANSPRODUCTBIOREF(b2) = E = \sum(p2, j), KF * (FCOSTTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j) * YTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j) + VCOSTTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j) * (fPRODUCTBIOREF1(p2, b2, j)) * GAMATRANSBIOREF2(b2))$$
 ;

EQ43 (b2) ..

$$CCAPTRANSPRODUCTBIOREF(b2) = E = \sum(p2, j), KF * (FCOSTTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j) * YTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j) + VCOSTTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j) * (fPRODUCTBIOREF1(p2, b2, j)))$$
 ;

EQ44 (b2) ..

$$COPTRANSPRODUCTBIOREF(b2) = E = \sum(p2, j), UCTTRANSPRODUCTBIOREFNEW(p2, b2, j) * (HY * fPRODUCTBIOREF1(p2, b2, j))$$
 ;

EQ45 (b2) .. $CTTRANSPRODUCTBIOREFNEW(b2) = E = CCAPTRANSPRODUCTBIOREF(b2) + COPTRANSPRODUCTBIOREF(b2)$;

EQ46A (p2, b2, j) ..

$$fPRODUCTBIOREFMIN(p2, b2, j) * YTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j) = L = fPRODUCTBIOREF1(p2, b2, j)$$
 ;

EQ46B (p2, b2, j) ..

$$fPRODUCTBIOREF1(p2, b2, j) = L = fPRODUCTBIOREFMAX(p2, b2, j) * YTRANSPRODUCTBIOREF(p2, b2, j)$$
 ;

EQ47 (i) .. $EOILEXT(i) = E = \sum(o), BETACO2EXT(o, i) * (HY * FOIL1(o, i))$;

EQ48 (i) .. $EPRODUCTREF(i) = E = \sum(p1), BETACO2PRODUCTREF(p1, i) * (HY * FPRODUCTREF(p1, i))$;

EQ49 (i) ..

$$ETRANSPRODUCTREF(i) = E = \sum(j, p1), BETACO2TRANSPRODUCTREF(p1, i, j) * (HY * fPRODUCTREF1(p1, i, j))$$
 ;

EQ50 (i) .. $EUSEPRODUCTREF(i) = E = \sum(p1), BETACO2USEPRODUCTREF(p1, i) * (HY * FPRODUCTREF(p1, i))$;

EQ51 (b) ..

$$NEBIOMASSBROWTH(b) = E = \sum(bm), GAMACO2BIOMASSGROWTH(bm, b) * (HY * \sum(m), fBIOMASS1(bm, m, b))$$
 ;

*DUDA NO QUEDARIA MEJOR LA ECUACION 51 EXPRESADA EN FUNCION DEL FLUJO PRODUCIDO EN LOS CAMPOS
*YA SE CAMBIO LA ECUACION EN EL PROGRAMA FALTARIA MODIFICAR EL ARCHIVO DE WORD

EQ52 (b) .. $EBIOMASSTRANS(b) = E = \sum(m, bm), GAMACO2BIOMASSTRANS(bm, m, b) * (HY * fBIOMASS1(bm, m, b))$;

EQ53 (b) .. $EBIOREFFPRODUCT(b) = E = \sum(bm, p2), GAMACO2BIOREFFPROD(p2, bm, b) * (HY * FBIOMASS(bm, b))$;

EQ54 (b) ..

$$ETRANSPRODUCTBIOREF(b) = E = \sum(j, p2), GAMACO2TRANSPRODUCTBIOREF(p2, b, j) * (HY * fPRODUCTBIOREF1(p2, b, j))$$
 ;

EQ55 (b) .. $EUSEPRODBIOREF(b) = E = \sum(p2), GAMACO2USEPRODBIOREF(p2, b) * (HY * FPRODUCTBIOREF(p2, b))$;

EQ56 (i) .. $EMREFINERY(i) = E = EOILEXT(i) + EPRODUCTREF(i) + ETRANSPRODUCTREF(i) + EUSEPRODUCTREF(i)$;

EQ57 (b) ..

$$EMBIOREF(b) = E = EBIOMASSTRANS(b) + EBIOREFFPRODUCT(b) + ETRANSPRODUCTBIOREF(b) + EUSEPRODBIOREF(b) - NEBIOMASSBROWTH(b)$$
 ;

EQ58 (e) .. $EMECOIND(e) = E = GAMAEMISIONECOIND(e) * NT(e)$;

EQ59 .. $EOF = E = PROFITREFINERY + PROFITBIOREF + PROFITECOIND$;

*EQ59 .. $EOF = E = PROFITECOIND$;

EQ59A ..

$$PROFITECOIND = E = \sum(i), CEMISREF(i) * EMCAPREFINERY(i) + \sum(b), CEMISBIOREF(b) * EMCAPBIOREFINERY(b) - \sum(e), CTOTALECOIND(e)$$
 ;

*EQ59 .. $EOF = E = PROFITREFINERY$;

```

*EQ59..      EOF=E=PROFITBIOREF;
*EQ59..      EOF=E=1;
EQ60..      NETEMISSION=E=SUM( ( i ) , EMREFINERY ( i ) ) +SUM( ( b ) , EMBIOREF ( b ) ) -SUM( ( e ) , EMECOIND ( e ) ) ;
EQ61..      SUM( ( i ) , EMCAPREFINERY ( i ) ) +SUM( ( b ) , EMCAPBIOREFINERY ( b ) ) =E=SUM( ( e ) , EMECOIND ( e ) ) ;
EQ62..      SUM( ( e ) , YECOIND ( e ) ) =G=ECOMINIMAS;
EQ63..      SUM( ( b2 ) , YBIOREF ( b2 ) ) =G=BIOREFMINIMAS;
EQ64..      SUM( ( i2 ) , YREF ( i2 ) ) =G=REFMINIMAS;
EQ65 ( j ) ..
            HY*DEMANDDIESEL ( j ) =e=SUM( ( i ) , HY*fPRODUCTREF1 ( '3' , i , j ) ) +SUM( ( b ) , HY*fPRODUCTBIOREF1 ( '5' , b , j )
            ) ;
*SE AGREGO ESTA ECUACION
EQ66 ( j ) ..
            HY*DEMANDGASOLINA ( j ) =e=SUM( ( i ) , HY*fPRODUCTREF1 ( '1' , i , j ) ) +SUM( ( i ) , HY*fPRODUCTREF1 ( '2' , i , j ) )
            +SUM( ( b ) , HY*fPRODUCTBIOREF1 ( '4' , b , j ) ) ;
*SE AGREGO ESTA ECUACION
EQ67..      MAXIMAPRODUCTION=E=SUM( ( p1 , i , j ) , HY*fPRODUCTREF1 ( p1 , i , j ) ) ;
*EQ67..      MAXIMAPRODUCTION=E=SUM( ( p1 , i , j ) , HY*fPRODUCTREF1 ( p1 , i , j ) ) ;
*SE AGREGO ESTA ECUACION
EQ68..      JOBSREFINERY=E=HY*SUM( ( i2 ) , JOBSUNITREF ( i2 ) *FOIL ( i2 ) ) ;
EQ69..
            JOBSBIOREFIN=E=HY*SUM( ( bm , m ) , JOBSUNITBIOMASSPLANT ( bm , m ) *FBIOMASSFIELD ( bm , m ) ) +HY*SUM( ( bm , m ,
            b ) , JOBSUNITBIOMASSTRANS ( bm , m , b ) *FBIOMASS1 ( bm , m , b ) ) +HY*SUM( ( bm , b ) , JOBSUNITBIOMASSBIOREF ( bm
            , b ) *FBIOMASS ( bm , b ) ) ;
EQ70..      JOBSECOIND=E=SUM( ( e ) , JOBSUNITECOIND ( e ) *NT ( e ) ) ;
EQ71..      TOTALJOBS=E=JOBSREFINERY+JOBSBIOREFIN+JOBSECOIND;
MODEL PRUEBA /
EQ1, EQ1A, EQ2, EQ3, EQ4, EQ5A, EQ5B, EQ6, EQ7, EQ8, *EQ9, EQ10, EQ11
*//////////
*-----
EQ11A
*-----
*//////////
EQ12, EQ12A, EQ12B, EQ13, EQ14, EQ15, EQ16A, EQ16B, EQ17, EQ18, EQ19, *EQ20, EQ21, EQ22
*//////////
*-----
EQ22A
*-----
*//////////
EQ23, EQ24A, EQ24B, EQ25, EQ26, EQ27, EQ28, EQ29, EQ30, EQ31, EQ32A, EQ32B, EQ33, EQ34, EQ35, EQ36A, EQ36B,
EQ37, EQ38, EQ39, EQ40, EQ41, EQ42A, EQ42B, EQ43, EQ44, EQ45, EQ46A, EQ46B, EQ47, EQ48, EQ49, EQ50, EQ51, EQ52, EQ5
3, EQ54, EQ55, EQ56, EQ57, EQ58, EQ59, EQ59A, EQ60, EQ61, EQ62, EQ63, EQ64, EQ65, EQ66, EQ67, EQ68, EQ69,
EQ70, EQ71
/ ;
MODEL FACTIBLE /EQ12, EQ12A, EQ12B, EQ13, EQ14, EQ15, EQ16A, EQ16B, EQ59, EQ65, EQ66/;
*fPRODUCTBIOREF.LO ( p2 , b ) =0.1;
*fPRODUCTREF.LO ( p1 , i ) =0.1;
*REVENUESOLDPRODUCTREF.LO ( i ) =0.1;
PARAMETERS

```

```

$ontext
A1
A2
A3
A4 (e)
A5 (e)
A6
A7
A8 (i)

VEOF (POINT)
VEMISS (POINT)
VPROFITREF (POINT)
VPROFITBIO (POINT)
VPROFITECO (POINT)
VEMIREF (POINT)
VEMIBIO (POINT)
VEMIECO (POINT)
VYECOIND (POINT,e)
VEMIREFIN (POINT,i)
VNT (POINT,e)
VEMIBIOIN (POINT,b)
VEMIECOIN (POINT,e)
$offtext
VER
DEMANDDIESELVER (j)
DEMANDGASOLINEVER (j)
;
$onecho > CONOPT.opt
rtmaxv = 1.00e+30
$offecho
$onecho > CONOPT3.opt
rtmaxv = 1.00e+30
$offecho
PRUEBA.OptFile = 1;
PRUEBA.WORKSPACE=1000;
ECOMINIMAS=0;
REFMINIMAS=0;
PRUEBAS (i)=0;
PRUEBAS ('1')=1;
PRUEBAS ('2')=1;

MAXIMAPRODUCTION.LO=0;
MAXIMAPRODUCTION.UP=6.9e10;
$ONTEXT
FPRODUCTREF.LO (p1, i) $(ORD (i) <=6)=1;

FOIL.LO ('7')=30000;

```

```

FOIL.LO('8')=30000;
YPIPOILREF.FX(o,i2)=0;
YPIPOILREF.FX(o,'7')=1;
YPIPOILREF.FX(o,'8')=1;
YPIPOILREF.FX(o,'9')=0;
$OFFTEXT

*SOLVE PRUEBA USING RMINLP MAXIMIZING PROFITECOIND;
SOLVE PRUEBA USING MIP MINIZING NETEMISSION;
*SOLVE PRUEBA USING MIP MAXIMIZING TOTALJOBS;
VER=SUM((p1,i,j),HY*fPRODUCTREF1.L(p1,i,j));
DEMANDDIESELVER(j)=(SUM((i),HY*fPRODUCTREF1.L('3',i,j))+SUM((b),HY*fPRODUCTBIOREF1.L('5',b,j)))/(
    HY*DEMANDDIESEL(j));
DEMANDGASOLINEVER(j)=(SUM((i),HY*fPRODUCTREF1.L('1',i,j))+SUM((i),HY*fPRODUCTREF1.L('2',i,j))+SUM
    ((b),HY*fPRODUCTBIOREF1.L('4',b,j)))/(HY*DEMANDGASOLINA(j));

PARAMETERS
MAXEOF
MAXNETEMISSION
NUMBERJOBS1
MINEOF
MINNETEMISSION
NUMBERJOBS2
VALJOBS (POINT)
VALEMIS (POINT)
VALEOF (POINT)
VALMODEL (POINT)
VALSOLVER (POINT)
VPROFITREF (POINT)
VPROFITBIO (POINT)
VPROFITECO (POINT)
VEMIREF (POINT)
VEMIBIO (POINT)
VEMIECO (POINT)
VYECOIND (POINT,e)
VEMIREFIN (POINT,i)
VNT (POINT,e)
VEMIBIOIN (POINT,b)
VEMIECOIN (POINT,e)
MAXJOBS
MINJOBS
;

SOLVE PRUEBA USING MIP MAXIMIZING TOTALJOBS;
MAXJOBS=TOTALJOBS.L;

SOLVE PRUEBA USING MIP MINIMIZING TOTALJOBS;
MINJOBS=TOTALJOBS.L;

```

```

TOTALJOBS.LO=1000000;
SOLVE PRUEBA USING MIP MAXIMIZING EOF;
MAXEOF=EOF.L;
MAXNETEMISSION=NETEMISSION.L;
NUMBERJOBS1=TOTALJOBS.L;
SOLVE PRUEBA USING MIP MINIMIZING NETEMISSION;
MINEOF=EOF.L;
MINNETEMISSION=NETEMISSION.L;
NUMBERJOBS2=TOTALJOBS.L;

LOOP (POINT,
NETEMISSION.UP=MAXNETEMISSION- (MAXNETEMISSION-MINNETEMISSION) * (ORD (POINT) -1) / (CARD (POINT) -1) ;
SOLVE PRUEBA USING MIP MAXIMIZING EOF;
VALJOBS (POINT) =TOTALJOBS.L;
VALEMIS (POINT) =NETEMISSION.L;
VALEOF (POINT) =EOF.L;
VALMODEL (POINT) =PRUEBA.MODELSTAT;
VALSOLVER (POINT) =PRUEBA.SOLVESTAT;
VPROFITREF (POINT) =PROFITREFINERY.L;
VPROFITBIO (POINT) =PROFITBIOREF.L;
VPROFITECO (POINT) =PROFITECOIND.L;
VEMIREF (POINT) =SUM ( (i) , EMREFINERY.L (i) );
VEMIBIO (POINT) =SUM ( (b) , EMBIOREF.L (b) );
VEMIECO (POINT) =SUM ( (e) , EMECOIND.L (e) );
VYECOIND (POINT, e) =YECOIND.L (e) +0.0001;
VEMIREFIN (POINT, i) =EMREFINERY.L (i) ;
VNT (POINT, e) =NT.L (e) ;
VEMIBIOIN (POINT, b) =EMBIOREF.L (b) ;
VEMIECOIN (POINT, e) =EMECOIND.L (e) ;
);

EXECUTE_UNLOAD
    'RESULTPARETO_1000000.GDX', VALJOBS, VALEMIS, VALEOF, VALMODEL, VALSOLVER, VPROFITREF, VPROFITBIO
    , VPROFITECO, VEMIREF, VEMIBIO, VEMIECO, VYECOIND, VEMIREFIN, VNT, VEMIBIOIN, VEMIECOIN;
execute 'gdx2xls RESULTPARETO_1000000.gdx';

```