



**UNIVERSIDAD
MICHOCANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIO DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE BIORREFINERIAS
PARA EL USO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN
BENEFICIO DE REGIONES CON BAJO ÍNDICE DE
DESARROLLO HUMANO**

TESIS presentada por:

JUAN CARLOS PULIDO OCEGUEDA

A la division de Estudios de Posgrado de la Facultada de
Ingenieria Quimica como requisito parcial para obtener el
grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

Director de Tesis: José María Ponce Ortega

Co-Director de Tesis: José Ezequiel Santibáñez Aguilar

**Morelia,
Mich.**

Agosto del 2022

Carta de Aceptación



Asunto: Impresión de Tesis.

Lic. Ulises Gutiérrez Vázquez
Jefe del Departamento de Titulación de la
U.M.S.N.H.

Por este medio nos dirigimos a usted de la manera más atenta para notificarle, que después de haberle dado seguimiento al desarrollo de la tesis: "PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE BIORREFINERIAS PARA EL USO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN BENEFICIO DE REGIONES DE BAJO ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO", después de haber revisado el manuscrito que presentó el alumno Juan Carlos Pulido Ocegueda con matrícula 2027805H concluimos que cumple con los requisitos académicos y con lo establecido en el Reglamento General de Estudios de Posgrado para el desarrollo de su Tesis.

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


Director: Dr. José María Ponce Ortega 03002829 

Codirector: Dr. José Ezequiel Santibañez Aguilar 917888 

Vocales:

Dr. Fabricio Nápoles Rivera 12002518 Dr. Luis Fernando Lira Barragán 08004447



Dr. Agustín Jaime Castro Montoya 01000179 

Atentamente.
Morelia, Michoacán a 08 de agosto de 2022.



Dr. Luis Fernando Lira Barragán
Coordinador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.



FLB/mcpa.

DEPARTAMENTO DE POSGRADO

Facultad de Ingeniería Química / Universidad Benito Juárez de Hidalgo
Plaza de la Maestría S/N | Cpl. Ferriz del Rio | C.P. 50200 | Morelia, Michoacán | Tel. y Fax: 443 337 3384
<http://posgrado.fiq.umich.mx/>

RESUMEN

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE BIORREFINERÍAS PARA EL USO DE LA BIOMASA RESIDUAL EN BENEFICIO DE REGIONES CON BAJO ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO.

Por

Juan Carlos Pulido Ocegueda

Agosto del 2022

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega

Co-Dirigido por: Dr. José Ezequiel Santibáñez Aguilar

La escasez de combustibles y de los recursos de los cuales se obtienen, es un tema que ha tomado fuerza en los últimos años, aunado al impacto ambiental y cambio climático que los combustibles de origen fósil traen consigo. Para lidiar con esta situación se ha incorporado la biomasa como un recurso renovable para la generación de productos de alto valor agregado; entre los que se pueden incluir combustibles y electricidad. En este contexto, la planificación de un esquema distribuido de biorrefinerías involucra la selección de materias primas, sitios de cultivo y recolección, rutas de procesamiento, sitios de procesamiento y la distribución de los distintos productos hacia los mercados. Los problemas de planificación de cadenas de suministro se han estudiado ampliamente desde el punto de vista económico y ambiental; sin embargo, un impacto que no se ha estudiado a fondo es la medida del impacto social en estos sistemas. Por lo tanto, este trabajo incorpora una nueva métrica a la optimización de cadenas de suministro enfocada a la inclusión del impacto social en diferentes sitios de la cadena productiva a través de un modelo de planificación mixto-entero lineal implementado en el software GAMS. El modelo se implementó en un caso de estudio hipotético en México para la planificación estratégica de cadenas de suministro involucrando una función objetivo para maximizar el beneficio social simultáneamente con la maximización de la ganancia económica.

Palabras clave: Impacto Social; Cadenas de Suministro; Biorrefinerías; Planificación Estratégica; Optimización.

ABSTRACT

STRATEGIC PLANNING OF BIOREFINERIES FOR THE USE OF RESIDUAL BIOMASS IN BENEFIT OF REGIONS WITH LOW HUMAN DEVELOPMENT INDEX.

For

Juan Carlos Pulido Ocegueda

August 2022

Master of Science in Chemical Engineering

Directed by: Dr. José María Ponce Ortega

Co-Directed by: Dr. José Ezequiel Santibáñez Aguilar

Fossil fuels are an issue that has gained strength in recent years, added to the environmental impact and climate change they generate. To deal with this situation, biomass has been incorporated as a source for the generation of high value-added products; including fuel and electricity. In this context, the planning of a distributed biorefinery scheme involves the selection of raw materials, cultivation and harvest sites, processing routes, processing sites and the distribution of the different products to markets. Supply chain planning problems have been widely studied from an economic and environmental point of view; however, one impact that has not been thoroughly studied is the extent of the social impact on these systems. Therefore, this work incorporates a new metric to the optimization of supply chains focused on the inclusion of social impact in different places of the productive chain through a mixed integer linear planning model implemented in the GAMS software. The model was implemented in a hypothetical case study in Mexico for strategic supply chain planning involving an objective function to maximize social benefit simultaneously with maximizing economic profit.

Keywords: Social Impact; Supply chains; Biorefineries; Strategic planning, Optimization.

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Fuentes de origen de la biomasa con destino energético	14
Tabla 2.2 Límites de dimensiones	21
Tabla A.1 Relación másica entre la materia prima (biomasa) y el producto generado	68
Tabla A.2 Disponibilidad de biomasa en los sitios de cultivo	70
Tabla A.3 Costo de biomasa (materia prima)	71
Tabla A.4 Costos de producción	72
Tabla A.5 Costos de transporte de productos	72
Tabla A.6 Costos de transporte de materia prima	73
Tabla A.7 Demanda en los mercados para cada producto	74
Tabla A.8 Costo de venta de productos	76
Tabla A.9 Índice de pobreza humana nacional	77
Tabla A.10 Índice de desarrollo humano estatal	78
Tabla A.11 Parámetros, índices y variables asignadas al modelo matemático	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Proceso optimización	8
Figura 3.1a Diagrama de flujo lógico de investigación	26
Figura 3.1b Diagrama de flujo lógico de investigación	27
Figura 3.1c Diagrama de flujo lógico de investigación	28
Figura 3.1d Diagrama de flujo lógico de investigación	29
Figura 4.1a Superestructura propuesta para sitios de cultivos y plantas de procesamiento (biorrefinerías).	39
Figura 4.1b Superestructura propuesta cadena de suministro	40
Figura 4.2 Curva Pareto del uso de biomasa para mejoramiento del IDH en las regiones analizadas (enfoque social)	43
Figura 4.3 Curva Pareto del uso de biomasa para mejoramiento del IDH en las regiones analizadas (enfoque ambiental)	44
Figura 4.4 Biomasa usada para producción en las biorrefinerías	46
Figura 4.5 Toneladas de producto generado por año en biorrefinerías	48
Figura 4.6 Productos vendidos por año en los mercados	50
Figura 4.7 Beneficio económico por ventas de productos en los mercados	52
Figura 4.8 Análisis económico para cada escenario	52
Figura 4.9 Incremento del PIB por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro	53
Figura 4.10 Incremento del IDH por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro	53
Figura 4.11 Biomasa usada para producción en las biorrefinerías	55
Figura 4.12 Toneladas de producto generado por año en biorrefinerías	57
Figura 4.13 Productos vendidos por año en los mercados	59
Figura 4.14 Beneficio económico por ventas de productos en los mercados	60
Figura 4.15 Análisis económico para cada escenario	60
Figura 4.16 Comparación del impacto ambiental en cada escenario	61
Figura 4.17 Incremento del PIB por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro (escenarios E al G)	62

Figura 4.18 Incremento del IDH por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro (escenarios E al G)	62
Figura B.1 Materias primas generadas en los sitios de cultivo	86
Figura B.2 Materias primas generadas en los sitios de cultivo (escenarios E, F y G)	87

NOMENCLATURA

Conjuntos	Significado
C	Indica un conjunto de Mercados
F	Indica un conjunto de biorrefinerías
H	Indica un conjunto de sitios de cultivo
M	Indica un conjunto de materias primas
P	Indica un conjunto de productos
R	Indica un conjunto de bioprocesos (rutas de procesamiento)
T	Indica un conjunto de periodos de tiempo
Índices	Significado
<i>c</i>	Indica un mercado perteneciente al conjunto de mercados
<i>f</i>	Indica una biorrefinería perteneciente al conjunto de biorrefinerías
<i>h</i>	Indica un sitio de cultivo perteneciente al conjunto de sitios de cultivos
<i>m</i>	Indica una materia prima perteneciente al conjunto de materias primas
<i>p</i>	Indica un producto perteneciente al conjunto de productos
<i>r</i>	Indica un bioproceso (ruta de procesamiento) perteneciente al conjunto de bioprocesos
<i>t</i>	Indica un periodo perteneciente al conjunto de periodos
Parámetros	Significado
$\alpha_{p,m,r}^{factor}$	Factor de conversión de los productos <i>p</i> desde <i>m</i> mediante <i>r</i>
$A_{m,h}$	Materia prima almacenada en los sitios de cultivo
$C_{m,f}^{fixed\ alm}$	Costo fijo de almacenamiento de material prima <i>m</i> in en las biorrefinerías F (\$US)
$C_{m,h}^{fixed\ alm}$	Costo fijo de almacenamiento de material prima <i>m</i> en los sitios de cultivo H (\$US)
$C_{p,c}^{fixed\ alm}$	Costo fijo de almacenamiento de productos <i>p</i> en los mercados C (\$US)
$C_{p,f}^{fixed\ alm}$	Costo fijo de almacenamiento de productos <i>p</i> en las biorrefinerías F (\$US)
$C_{m,p,r,f,t}^{process}$	Costo de procesamiento de material prima <i>m</i> hacia productos <i>p</i> mediante la ruta <i>r</i> en las biorrefinerías F (\$US por ton)

Parámetros	Significado
$C_{m,h,t}^{produced}$	Costo de materia prima m producida en los sitios de cultivo H al final del periodo T (\$US por ton)
$C_{p,c,t}^{product}$	Costo de productos p en el mercado c al final de periodo T (\$US por ton)
$C_{m,h,f,t}^{transp}$	Costo de transporte de materia prima m desde los sitios de cultivo H hacia las biorrefinerías F (\$US por ton)
$C_{p,f,c,t}^{transp}$	Costo de transporte de producto p desde las biorrefinerías F hacia los mercados C (\$US por ton)
$C_{m,f,t}^{variable alm}$	Costo variable por almacenamiento de materia prima en las biorrefinerías (\$US por ton)
$C_{m,h,t}^{variable alm}$	Costo variable de almacenamiento de materia prima en los sitios de cultivo (\$US por ton)
$C_{p,c,t}^{variable alm}$	Costo variable de almacenamiento de productos en los mercados (\$US por ton)
$C_{p,f,t}^{variable alm}$	Costo variable de almacenamiento de productos en las biorrefinerías (\$US por ton)
$DM_{h,f}$	Distancia en km de la materia prima distribuida entre un sitio de cultivo h y una biorrefinería f
$DP_{f,c}$	Distancia en km del producto distribuido entre una biorrefinería f y un mercado c
$EM_{m,h,f,t}$	Emisiones generadas por la generación de materias primas
$EP_{p,f,c,t}$	Emisiones generadas por la producción de productos
IA	Índice de alfabetización
IA_{max}	Máximo índice de alfabetización
IA_{min}	Mínimo índice de alfabetización
IDH	Índice de desarrollo humano
IDH_h	Índice de desarrollo humano corregido
IE	Índice de educación
IEV	Índice de esperanza de vida
IM	Índice de matriculación

Parámetros	Significado
IM_{max}	Máximo índice de matriculación
IM_{min}	Mínimo índice de matriculación
IPIB	Índice de producto interno bruto
$M_{m,h,t}^{max}$	Máxima materia prima producida en el sitio de cultivo h al final del periodo t
$M_{m,f}^{Max\ alm}$	Máximo almacenamiento de materia prima m en una biorrefinería f (ton por año)
$M_{m,h}^{Max\ alm}$	Máximo almacenamiento de materia prima m en un sitio de cultivo h (ton por año)
$M_{m,p,r,f}^{max\ used}$	Máximo procesamiento de materia prima m para producir producto p mediante la ruta r en una biorrefinería f (ton por año)
$M_{m,f}^{Min\ alm}$	Mínimo almacenamiento de materia prima m en una biorrefinería f (ton por año)
$M_{m,h}^{Min\ alm}$	Mínimo almacenamiento de materia prima m en un sitio de cultivo h (ton por año)
$M_{m,p,r,f}^{min\ used}$	Mínimo procesamiento de materia prima m para producir producto p mediante la ruta r en una biorrefinería f (ton por año)
$P_{p,c}^{Max\ alm}$	Máximo almacenamiento de producto p en un mercado c (ton por año)
$P_{p,f}^{Max\ alm}$	Máximo almacenamiento de producto p en una biorrefinería f (ton por año)
$P_{p,c,t}^{Max\ demand}$	Máxima demanda de producto p en un mercado c al final del periodo t (ton por año)
$P_{p,c}^{Min\ alm}$	Mínimo almacenamiento de producto p en un mercado c (ton por año)
$P_{p,f}^{Min\ alm}$	Mínimo almacenamiento de producto p en una biorrefinería f (ton por año)
PIB_{max}	Máximo índice de producto interno bruto
PIB_{min}	Mínimo índice de producto interno bruto
$U_{m,h,f}^{max\ transp}$	Máximo transporte de materia prima m desde un sitio de cultivo h hacia una biorrefinería f (ton por año)

Parámetros	Significado
$U_{p,f,c}^{\max transp}$	Máximo transporte de producto p desde una biorrefinería f hacia un mercado c (ton por año)
$U_{m,h,f}^{\min transp}$	Mínimo transporte de materia prima m desde un sitio de cultivo h hacia una biorrefinería f (ton por año)
$U_{p,f,c}^{\min transp}$	Mínimo transporte de producto p desde una biorrefinería f hacia un mercado c (ton por año)
$V_{m,f,t}^{price}$	Determina el precio de venta de materia prima m hacia una biorrefinería f
VARIABLES	Significado
positivas	
$C_{m,f}^{total alm}$	Costo total de almacenamiento de materia prima m en una biorrefinería f
$C_{m,h}^{total alm}$	Costo total de almacenamiento de materia prima m en un sitio de cultivo h
$C_{p,c}^{total alm}$	Costo total de almacenamiento de producto p en un mercado c
$C_{p,f}^{total alm}$	Costo total de almacenamiento de producto p en una biorrefinería f
$M_{m,f,t}^{alm}$	Materia prima almacenada m en una biorrefinería f al final del periodo t
$M_{m,h,t}^{alm}$	Materia prima almacenada m en un sitio de cultivo h al final del periodo t
$M_{m,f}^{inicial alm}$	Materia prima m almacenada inicialmente en una biorrefinería f
$M_{m,h}^{inicial alm}$	Materia prima m almacenada inicialmente en un sitio de cultivo h
$M_{m,h,f,t}^{in distr}$	Materia prima m distribuida desde un sitio de cultivo h hacia una biorrefinería f (entrada)
$M_{m,h,t}^{produced}$	Materia prima m producida en un sitio de cultivo h al final del periodo t
$M_{m,h,f,t}^{out distr}$	Materia prima m distribuida desde un sitio de cultivo h hacia una biorrefinería f (salida)
$M_{m,p,r,f,t}^{out process}$	Materia prima m en una biorrefinería f procesada mediante una ruta de proceso r (salida)
$P_{p,c,t}^{alm}$	Producto p almacenado en un mercado c al final del periodo t
$P_{p,f,t}^{alm}$	Producto p almacenado en una biorrefinería f al final del periodo t
$P_{p,f,c,t}^{in distr}$	Producto p distribuido desde una biorrefinería f hacia un mercado c (entrada)

VARIABLES**POSITIVAS****Significado**

$p_{m,p,r,f,t}^{in\ produced}$	Producto p producido mediante una ruta de proceso r en una biorrefinería f (entrada)
$p_{p,c}^{inicial\ alm}$	Producto p almacenado inicialmente en un mercado c
$p_{p,f}^{inicial\ alm}$	Producto p almacenado inicialmente en una biorrefinería f
$p_{p,f,c,t}^{out\ distr}$	Producto p distribuido desde una biorrefinería f hacia un mercado c (salida)
$p_{p,c,t}^{out\ sale}$	Producto p vendido en un mercado c (salida)

VARIABLES**binarias****Significado**

$y_{m,h}^{existence}$	Define la existencia de un sitio de cultivo h
$y_{m,f}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima m en una biorrefinería f
$y_{m,h}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima m en un sitio de cultivo h
$y_{p,c}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de producto p en un mercado c
$y_{p,f}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de producto p en una biorrefinería f
$y_{m,f,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima m en una biorrefinería f al tiempo cero
$y_{m,h,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima m en un sitio de cultivo h al tiempo cero
$y_{p,c,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de producto p en un mercado c al tiempo cero
$y_{p,f,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de producto p en una biorrefinería f al tiempo cero
$y_{m,f,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima m en una biorrefinería f en un periodo t
$y_{m,h,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima m en un sitio de cultivo h en un periodo t

Variab binarias	Significado
$y_{p,c,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de producto p en un mercado c en un periodo t
$y_{p,f,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de producto p en una biorrefinería f en un periodo t
$y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans}$	Define si es necesario el transporte de materia prima m desde un sitio de cultivo h hacia una biorrefinería f
$y_{p,f,c,t}^{Necessary\ trans}$	Define si es necesario el transporte de producto p desde una biorrefinería f hacia un mercado c
$y_{m,p,r,f,t}^{Necessary\ process}$	Define si es necesario el procesamiento en una biorrefinería f

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme cumplir con los objetivos de este proyecto, en esta etapa de mi vida y formación. Por brindarme salud y fuerza para culminar cada actividad a pesar de los imprevistos y circunstancias vividas. Por permitirme coincidir con personas increíbles en estos dos años de investigación y por todas las habilidades y conocimientos académicos y personales obtenidos.

Al Dr. José María Ponce Ortega por aceptar ser mi director de tesis y por todos los conocimientos que me transmitió con gran amabilidad y disposición.

Al Dr. José Ezequiel Santibañez Aguilar por aceptar ser mi co-director de tesis y brindarme las herramientas y conocimiento necesarios para culminar este proyecto con gran disposición.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por brindarme la oportunidad de formar parte de comunidad nicolaita, así como del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de este proyecto.

A mi madre Juana y hermanos Sonia, Ana Carolina y Abraham Francisco por ser un pilar fundamental en mi vida y apoyarme en cada situación de mi vida con comprensión, apoyo, cariño y tiempo.

A mis amigos por sus consejos, apoyo y alientos. A Emanuel Ayar Nuñez por su apoyo y aliento incondicional y siempre estar ahí para mí, por más difíciles que fueran los tiempos. A Bibiana Anahí Cervantes Alcalá por sus valiosos consejos, por motivarme y por ayudarme en tiempos difíciles.

ÍNDICE

RESUMEN.....	iii
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
NOMENCLATURA.....	viii
AGRADECIMIENTOS	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	5
1.3. Planteamiento del problema.....	5
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivos	7
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Optimización.....	8
2.2. Tipos de optimización	9
2.2.1. Optimización Mono-objetivo.....	9
2.2.2. Optimización Multi-objetivo	10
2.3. Herramientas de optimización	10
2.3.1. GAMS.....	10
2.4. Biorrefinerías.....	11
2.4.1. Tipos de Biorrefinerías	12
2.5. Biomasa	13
2.5.1. Tipos de biomasa	13
2.5.2. Biomasa en el país	14
2.5.3. Biomasa como fuente de energía.....	15
2.6. Transformación de biomasa.....	16
2.6.1. Combustión.....	16
2.6.2. Pirolisis	17
2.6.3. Gasificación.....	17
2.6.4. Fermentación ABE.....	18
2.6.5. Digestión anaerobia.....	19
2.7. Índice de desarrollo humano e índice de pobreza humana	20

2.7.1.	Índice de desarrollo humano	20
2.7.2.	Metodología para calcular el índice de desarrollo humano.....	20
2.7.3.	El índice de pobreza humana para países en desarrollo.....	22
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....		25
3.1.	Formulación del modelo matemático	30
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES		39
4.1.	Superestructura para el caso de estudio.....	39
4.2.	Caso de estudio	41
4.3.	Resultados generales	41
4.4.	Resultados curva Pareto Económico V.S. Social	44
4.5.	Resultados curva Pareto Económico V.S Ambiental	54
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
Conclusiones		64
Recomendaciones		66
APÉNDICES.....		67
Apéndice A		67
Tablas de parámetros		67
Índices del modelo matemático		80
Apéndice B		85
Gráficos de apoyo para análisis de resultados.....		85
BIBLIOGRAFÍA.....		88

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

A pesar de que existe gran variedad de trabajos relacionados con temas como el impacto ambiental, la pérdida de áreas verdes, la generación de residuos y desechos, el uso de tecnologías verdes, producción de biocombustibles y energía a partir de biomasa y sus residuos, el mejoramiento de las cadenas de suministro de energéticos; la mayoría de ellos son a macro-escala; es decir, no contemplan a las pequeñas partes involucradas dentro de la cadena de suministro general ni a sus participantes.

Respecto al aprovechamiento de la biomasa y sus residuos, Ximenes y col., (2020) mencionaron que la biomasa residual se puede utilizar como materia prima para producir calor y energía, así como para producir combustibles para el transporte y productos bioquímicos. Cao y col., (2019) expusieron que algunas de las principales ventajas del uso de la biomasa como fuente de energía son: su alto potencial para producir biocombustibles y gas de biosíntesis, además estipulan que la producción de biomasa y su uso pueden brindar oportunidades para las aldeas y el empleo rural, siendo esto parte de la solución a los problemas ambientales asociados con el uso de carbón y otros combustibles fósiles, reduciendo las preocupaciones de seguridad energética en los países desarrollados. Este uso de residuos lo corrobora el trabajo de Azelee y col., (2020) sobre la importancia del aprovechamiento de residuos agroindustriales como materia prima para elaborar productos de alto valor y evitar posibles problemas ambientales por su inadecuada disposición final. Siguiendo con este contexto, acorde a Liu y Wu, (2016) así como Rodrigues y col., (2022), los residuos sólidos urbanos pueden transformarse en productos de alto valor agregado mediante técnicas de procesamiento adecuadas, como la conversión biológica y térmica. También, Athanasoulia y col., (2012) y Osorio y Torres (2009) consideran a los lodos residuales biológicos de las plantas tratadoras de aguas como materia prima prometedora para obtención de biogás.

En conclusión, la biomasa, los residuos agroindustriales, los residuos sólidos urbanos y los lodos residuales pueden convertirse en varios productos de alto valor agregado. Por esa razón, se debe estudiar el modelado de la cadena de suministro, las estrategias para evaluar el desempeño de la cadena de suministro de biomasa y las técnicas de toma de decisiones para este tipo de sistemas. En este contexto, existen varios trabajos enfocados en analizar, abordar y resolver diferentes problemas y desafíos relacionados con las cadenas de suministro de biomasa. Por ejemplo, Saghaei

y col., (2020) propusieron un modelo de programación mixta entera no lineal (MINLP) combinado con una restricción aleatoria para minimizar el costo total de la producción de electricidad a partir de biomasa leñosa en una cadena de suministro de bioenergía integrada de cuatro niveles. Además, Roni y col., (2019) desarrollaron un modelo de programación mixta entera lineal para optimizar simultáneamente las decisiones de abastecimiento de materias primas y las ubicaciones y el tamaño óptimos de las unidades de pre-procesamiento, utilizando recursos de biomasa de desechos agrícolas y desechos sólidos municipales para cumplir con las especificaciones de carbohidratos y la demanda de materia prima para un proceso de conversión bioquímico. Ulonska y col., (2018) formularon un modelo lineal para analizar el impacto de un radio de suministro y transporte de biomasa en el costo de producción. Espinoza-Vázquez y col., (2021) presentaron un modelo matemático que representa la cadena de suministro para la conversión de biomasa lignocelulósica en México a biocombustibles y productos de alto valor agregado, obteniendo el mayor beneficio si la biomasa se utiliza para producir ácido levulínico y furfural, satisfaciendo toda la demanda. Como se puede observar, aunque los trabajos previos utilizan diferentes tipos de biomasa lignocelulósica, residuos de biomasa y residuos agrícolas, ninguno utiliza lodos biológicos residuales, los cuales son una materia prima prometedora para la obtención de productos de alto valor agregado.

Considerando la planificación estratégica del uso de biomasa, Budzianowski y Postawa (2016) analizaron sistemáticamente la integración de biorrefinerías a la cadena completa de forma sistemática caracterizando los límites del sistema, los principios y las metodologías de integración, además, Palmeros-Parada y col., (2017) enfocaron su análisis en la incorporación de la sostenibilidad en el diseño de biorrefinerías, cubriendo marcos de evaluación, optimización y diseño y finalmente identificación de desafíos y oportunidades para futuros desarrollos en el campo. Bowling y col., (2011) presentaron la planificación óptima de la producción y la ubicación de las instalaciones de una biorrefinería incluyendo en su modelo fuentes de materia prima de biomasa, centros de pre-procesamiento distribuidos e instalaciones de procesamiento centralizadas para producir los productos y subproductos deseados, además de determinar la cadena de suministro óptima, el tamaño, las estrategias operativas y la ubicación de la biorrefinería y las instalaciones del centro de pre-procesamiento. En su modelo consideran aspectos como las ventas totales y los costos de las materias primas, los costos de transporte, los costos de capital de las instalaciones y los costos operativos de las instalaciones esto aplicado a dos casos de estudio específicos.

Respecto a la generación de energía, Cambero y col., (2016) desarrollaron un modelo de optimización bi-objetivo para el diseño de la cadena de suministro de biorrefinerías en el que la bioenergía producida puede utilizarse como insumo en tecnologías de biocombustibles. Bamufleh y col., (2013) buscaron una estrategia eficaz para aprovechar los aspectos positivos de la combinación de calor y energía en la industria a partir de un marco de optimización para el diseño de sistemas de cogeneración. En el mismo sentido, Fuentes-Cortés y col., (2015) aplicaron enfoque de cogeneración a complejos de viviendas dónde plantearon un problema de optimización para el diseño de sistemas de cogeneración domésticos considerando las condiciones climáticas y comportamiento de la demanda de forma simultánea considerando objetivos económicos y ambientales para dos casos de estudio en México.

Por otro lado, respecto a la evaluación de la cadena de suministro, los aspectos económicos y ambientales han sido debidamente estudiados; sin embargo, existe un déficit en el estudio de la dimensión social en las cadenas de suministro. En este sentido, diferentes trabajos han tomado como base la generación de empleos como medida del impacto social. Por ejemplo, Santibáñez-Aguilar y col., (2014) presentaron un modelo multiobjetivo mixto entero lineal para la planificación óptima de una cadena de suministro de biomasa considerando múltiples materias primas, donde el objetivo social fue el número de empleos generados. Yue y col., (2014) propusieron un modelo de optimización multiobjetivo para el diseño y operación sostenible de redes de cadena de suministro de bioelectricidad, que simultáneamente tiene en cuenta los impactos económicos, ambientales y sociales asociados a través de la generación de empleos. Miret y col., (2016) abordaron el diseño óptimo de la cadena de suministro de biomasa, considerando las dimensiones del desarrollo sostenible, evaluando el aspecto social a través de la competencia entre energía y alimentos, y el número total de empleos locales acumulados directa e indirectamente. Martinkus y col., (2019) propusieron un esquema para optimización de la cadena de suministro de biorrefinerías a base de madera tomando en cuenta el aspecto social en dos puntos, la cantidad de empleos regionales generados a través de la instalación de una cadena de suministro de biocombustibles y los activos sociales a nivel de condado que pueden influir el éxito del proyecto de biorrefinería. Recientemente, Contreras-Zarazúa y col., (2021) propusieron una cadena de suministro multi-periodo para producir furfural a partir de residuos agrícolas en México, considerando el aspecto social de la generación de empleos.

Adicionalmente, el impacto social también puede estar relacionado con la seguridad de los procesos. En este contexto, El-Halwagi y col., (2013) introdujeron un nuevo enfoque para la incorporación de criterios de seguridad en la selección, ubicación y dimensionamiento de una biorrefinería. López-Molina y col., (2020) presentaron un enfoque integrado para el diseño de instalaciones de biorrefinación considerando las opciones centralizadas y descentralizadas y los objetivos económicos, ambientales y de seguridad aplicando el análisis del ciclo de vida. Álvarez Del Castillo-Romo y col., (2018) llevaron a cabo un modelo de optimización multiobjetivo de una superestructura de proceso para la conversión de biomasa lignocelulósica en biocombustibles y productos de alto valor, incluyendo criterios sociales como el potencial de toxicidad en humanos y criterios socioeconómicos a través de la demanda del producto en la formulación de su modelo

Si bien la dimensión social puede considerarse a través de los empleos generados y la seguridad de los procesos, podría no ser la forma más adecuada de evaluar el impacto social en una cadena de suministro o en un sistema productivo. Una métrica de dimensión social debe ser multifactorial y, por lo tanto, algunos investigadores han desarrollado índices compuestos para medir de manera más completa las múltiples dimensiones del bienestar social (Yee-Ting y Nai-Peng, 2019).

Una alternativa para medir el impacto social es el Índice de Desarrollo Humano (IDH), introducido en 1990, que combina tres subíndices igualmente ponderados: esperanza de vida, nivel educativo e ingreso per cápita. Este índice es actualizado anualmente por las Naciones Unidas y fue creado para enfatizar que las personas, sus capacidades y el crecimiento económico, deben ser los criterios fundamentales para evaluar el desarrollo de un país.

El IDH, propuesto por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, es una medida sinóptica del desarrollo humano. Mide el logro promedio de un país en tres dimensiones básicas del desarrollo humano (López-Calva y col., 2004): a) Esperanza de vida al nacer, b) Tasa de alfabetización de adultos y la tasa bruta combinada de matrícula en primaria, secundaria y escuelas secundarias y, c) Un nivel de vida digno per cápita medido en términos de paridad de poder adquisitivo (PPA) en dólares estadounidenses. Si bien, las Naciones Unidas publican el Informe sobre Desarrollo Humano Mundial una vez al año, alrededor de 150 países elaboran su propio Informe Nacional sobre Desarrollo Humano para tener un análisis regional (Yee-Ting y Nai-Peng, 2019).

Por lo tanto, con base en las ventajas y características de las materias primas, este trabajo considera simultáneamente la biomasa residual, los residuos agroindustriales, los residuos sólidos urbanos y los lodos residuales como materias primas potenciales en una formulación matemática de planificación óptima enfatizando la falta de solidez de las métricas de impacto social. La formulación presentada considera una función objetivo social multifactorial basada en el índice de desarrollo humano para promover la selección de ubicaciones con bajos niveles de desarrollo en la cadena de suministro.

1.2. Justificación

En la actualidad, en México existen zonas rurales e incluso urbanas que presentan altos niveles de pobreza y por lo tanto un bajo índice de desarrollo humano, lo que lleva a presentar dos tipos de vulnerabilidad: a) Vulnerabilidad por carencias sociales (rezago educativo, acceso a los servicios de salud, acceso a la alimentación, acceso a servicios básicos en la vivienda principalmente electricidad), y b) Vulnerabilidad por ingresos económicos. Como consecuencia de diversos estudios y análisis, se sabe que México es un excelente productor agrícola, además de contar con actividades productivas del tipo industrial y urbano, por lo que el potencial energético de la biomasa residual generada por estas actividades podría aprovecharse mediante la instalación estratégica de biorrefinerías en estas zonas vulnerables.

1.3. Planteamiento del problema

El problema por abordar en el presente trabajo es determinar la configuración óptima de la cadena de suministro que incorpore los biorrecursos, tecnologías, sitios de cultivo y demandas, buscando la maximización del beneficio económico a través de las ganancias netas generadas por las biorrefinerías, así como la maximización del beneficio social a través de una función objetivo basada en el índice de desarrollo humano (IDH). El problema abordado puede definirse formalmente de la siguiente manera:

Dado:

- Un conjunto de biomasa residual disponible en el país con posibilidad de convertirse en productos de alto valor agregado.
- Un conjunto de estados con un bajo índice de desarrollo humano estimado donde se puedan establecer biorrefinerías y abastecer la materia prima.

- Un conjunto de tecnologías capaces de utilizar biomasa residual para generar productos de valor agregado, incluidos combustibles y electricidad.
- Un conjunto de demandas del mercado de combustibles y electricidad que deben ser satisfechas.

Sujeto a:

- Límites máximos y mínimos de transporte, procesamiento y restricciones de procesamiento de materias primas.

Es posible obtener la planificación óptima de la cadena de suministro, considerando:

- La distribución óptima de biomasa residual.
- La selección de tecnologías de procesamiento y los productos obtenidos.
- La selección de los nodos dentro de la cadena de suministro.
- La maximización de la ganancia neta anual.
- La minimización de las emisiones de CO₂ equivalente.
- La maximización del beneficio social basado en el índice de desarrollo humano.

1.4. Hipótesis

La implementación de un modelo matemático enfocado a la planificación estratégica de un sistema distribuido de biorrefinerías a partir de biomasa residual podrá evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental con el fin de mejorar las condiciones actuales de los participantes de la cadena de suministro con bajo índice de desarrollo humano por medio del aumento de sus ingresos económicos y disminuyendo sus niveles de pobreza.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Desarrollar una estrategia de optimización a través métodos deterministas que considere aspectos económicos, sociales y ambientales, para la planificación, síntesis y diseño de un sistema de biorrefinerías multi-producto y su aplicación en un caso de estudio en México.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una superestructura que represente el problema a solucionar.
- Proponer un modelo matemático de optimización en la cadena de suministro que considere las tres dimensiones del desarrollo sostenible en la síntesis de un sistema de biorrefinerías distribuidas.
- Aplicar el modelo propuestos a diversos casos de estudio en México.
- Determinar los tipos de biomasa residual del país para el uso adecuado en biorrefinerías.
- Establecer la ubicación adecuada de las instalaciones de cada biorrefinería en el país.
- Analizar los beneficios económicos y sociales que tendrán las regiones de bajos recursos.
- Determinar el impacto ambiental que generado en la cadena de suministro.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Optimización

Se puede definir como optimización al proceso de seleccionar, a partir de un conjunto de alternativas posibles, aquella que mejor satisfaga el o los objetivos propuestos. Para resolver un problema de optimización se requieren varias etapas, pero las dos principales son la formulación del modelo y la resolución y validación del mismo (ver Figura 2.1):

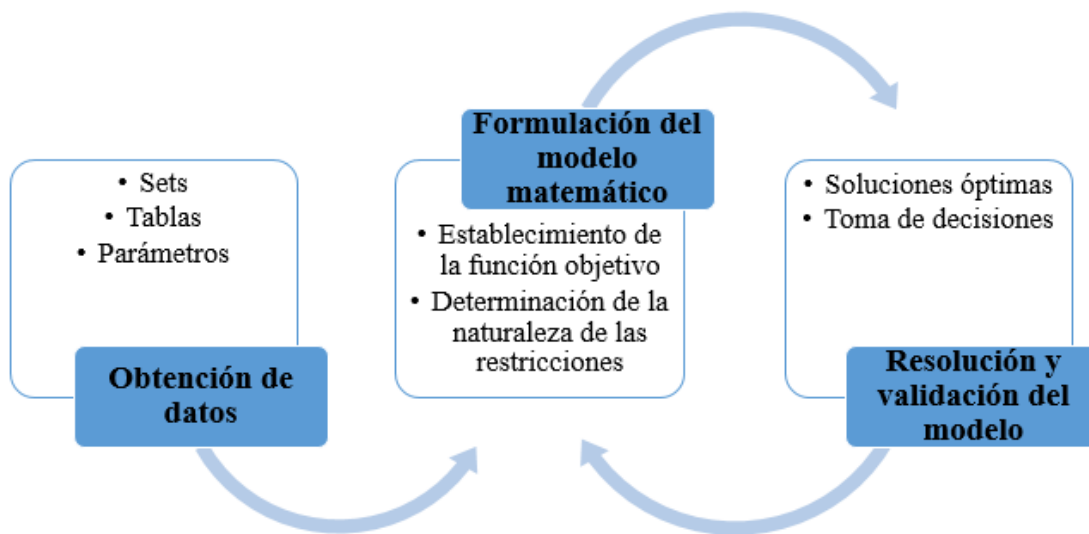


Figura 2.1 Propuesta de proceso de optimización.

La formulación del modelo de optimización consiste en 1.- identificar ecuaciones que rigen un fenómeno, 2.- establecer funciones objetivo, 3.- determinar naturaleza de ecuaciones para su reformulación en caso necesario, 4.- establecer variables y parámetros, etc. Una vez generado el modelo, la etapa siguiente es resolver y validar dicho modelo. Esta etapa puede considerarse suficientemente formalizada puesto que los modelos de problemas de optimización han sido muy estudiados y se han desarrollado innumerables métodos y estrategias para resolverlos (Ferrero y Chiotti, 2015).

En palabras sencillas, la optimización es la selección de la mejor alternativa, en algún sentido, dentro del conjunto de soluciones posibles para un sistema dado. Es un concepto inherente a toda la investigación operativa, y se compone generalmente de las siguientes tres partes (Ramos y col., 2010):

✓ *Función objetivo*

Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar (maximizar o minimizar). Como ejemplo de funciones objetivo se pueden mencionar: la minimización de los costos de operación de un sistema eléctrico, la maximización de los beneficios netos de venta de ciertos productos, la minimización del cuadrado de las desviaciones con respecto a unos valores observados, la minimización del material utilizado en la fabricación de un producto, etc.

✓ *Variables*

Representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Desde un punto de vista funcional, se pueden clasificar en variables *independientes* o *principales* o *de control* y variables *dependientes* o *auxiliares* o *de estado*, aunque matemáticamente todas son iguales. En el caso de un sistema eléctrico serán los valores de producción de los grupos de generación o los flujos por las líneas. En el caso de la venta, la cantidad de cada producto fabricado y vendido. En el caso de la fabricación de un producto, sus dimensiones físicas.

✓ *Restricciones*

Representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, las potencias máxima y mínima de operación de un grupo de generación, la capacidad de producción de la fábrica para los diferentes productos, las dimensiones del material bruto del producto, etc.

2.2. Tipos de optimización

En un problema de optimización primeramente debe definirse cuales son los criterios (funciones objetivo) a optimizar. Si se quiere optimizar un sólo criterio, se denomina optimización mono-objetivo y cuando se optimiza más de un objetivo a la vez se denomina optimización multi-objetivo.

2.2.1. Optimización Mono-objetivo

En este tipo de optimización se busca encontrar los valores máximos (maximización) o mínimos (minimización) de una función entre todas las soluciones factibles del problema. En problemas con un sólo objetivo, existe una única función a optimizar. En este sentido, aquella

solución que corresponda al valor máximo o mínimo del problema, será la solución al problema analizado (López, 2013).

2.2.2. Optimización Multi-objetivo

La optimización multi-objetivo busca las soluciones óptimas para más de un objetivo en simultáneo, los cuales generalmente están contrapuestos, por lo que la optimización se realiza de forma simultánea para varias funciones objetivo en paralelo.

A diferencia de la optimización mono-objetivo, donde sólo se genera una solución óptima, dentro de optimización multi-objetivo se generan un conjunto de posibles soluciones, donde el desafío principal es ofrecer al tomador de decisiones, las mejores soluciones de optimización para que él seleccione una de ellas (López, 2013).

2.3. Herramientas de optimización

Existen múltiples alternativas de optimización entre los que se pueden mencionar: GAMS, AMPL, MLP, AIMMS y XPRESS-MP, las cuales son potentes por su capacidad de indexación de las variables y ecuaciones y permiten cambiar sin dificultad las dimensiones del modelo, de forma natural separan datos de resultados, además de la detección de errores de consistencia en la definición y verificación del modelo.

2.3.1. GAMS

GAMS son las siglas de General Algebraic Modeling System. GAMS, es un lenguaje de programación que permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización. Es una herramienta muy versátil capaz de resolver problemas de programación matemática. Entre sus principales características cabe destacar las siguientes (Delgado, 2010):

- El problema por solucionar puede ser fácilmente dimensionado sin modificar el código matemático de forma radical. Esto debido a la estructura propia del software que permite el uso de conjuntos indizados para las restricciones usadas.
- El modelo y la resolución del problema se encuentran separados, esto permite que el usuario se enfoque principalmente en la correcta formulación del modelo del fenómeno analizado, teniendo la certeza de que el algoritmo interno del software será el adecuado para resolverlo.

- El lenguaje de modelado de GAMS presenta una similitud entre la formulación del modelo matemático del problema de optimización y su representación codificada en GAMS. Esto proporciona una gran flexibilidad, al permitir cambiar los solucionadores utilizados sin cambiar la formulación del modelo.

La estructura general que se observa en un modelo de optimización escrito en GAMS se describe a continuación (Delgado, 2010):

Al comienzo del modelo se declaran índices y parámetros que son la base de la cual tomará los datos el solucionador, estos pueden indicarse en forma de Sets, Tablas, Escalares y Parámetros. Los sets definen los índices, su descripción y los rangos de valores entre los que pueden variar, las tablas permiten adicionar matrices de datos, los escalares como su nombre lo dice permiten declarar y asigna escalares, los parámetros nos permiten adicionar, declarar y asignar al lenguaje vectores de datos, es importante indicar que los parámetro y tablas están en función del conjunto de sets que se definieron, primeramente.

Después, se comienza con la declaración de variables y ecuaciones, en esta etapa las variables tienen un carácter específico, es decir, pueden ser positivas, libres, binarias o enteras y se inicializan para comenzar un proceso iterativo de búsqueda, una vez declaradas las variables se comienza con las ecuaciones donde se declaran todas las restricciones del modelo y la o las funciones objetivo según sea el caso de la optimización, indicando su nombre y su definición.

Posteriormente, se agrega el modelo (Model), donde se especifica el título o nombre que tomará el software para llevar a cabo la optimización, en esta se puede agregar la palabra “all” entre barras inclinadas para indicar que está formado por todas las restricciones previamente definidas, una vez indicado el modelo se agrega la solución (Solve), la cual indicará a GAMS que utilice un optimizador determinado para resolver el modelo.

Finalmente, GAMS presenta los resultados a partir de la solución del problema de optimización en forma de Display, en el cual se muestran los resultados de interés y relevancia para el tomador de decisiones.

2.4. Biorrefinerías

Las biorrefinerías combinan las tecnologías esenciales para transformar materias primas biológicas en diversos productos intermedios y finales. Se han dado múltiples definiciones del

término biorrefinería entre las que cabe destacar la del Laboratorio de Energías Renovables Nacional Americano (NREL): «Una biorrefinería es una instalación que integra procesos y equipos de conversión de biomasa para producir combustibles, energía y productos químicos a partir de biomasa. El concepto de biorrefinería es análogo al de las actuales refinerías de petróleo, que producen múltiples combustibles y productos a partir del petróleo. Las biorrefinerías industriales se han identificado como la ruta más prometedora para la creación de una nueva industria doméstica de base biológica» (González, 2018).

Existen tres niveles de desarrollo de las biorrefinerías: El nivel más bajo representado por las biorrefinerías-fase I, que parten de una materia prima de biomasa que se transforma a través de un único proceso para producir un único producto. Un ejemplo de este tipo de biorrefinería son las plantas de producción de bioetanol a través del proceso de molienda en seco. El siguiente nivel está representado por las biorrefinerías-fase II, que procesan una materia prima para, a través de varios procesos, obtener varios productos principales. Una planta de producción de bioetanol por el proceso de molienda en húmedo sería un ejemplo de este tipo de biorrefinería. Finalmente, el nivel más avanzado con la mayor flexibilidad de operación lo constituyen las biorrefinerías-fase III, que parten de varias materias primas de biomasa que se transforman a través de varias tecnologías para producir varios productos (González, 2018).

2.4.1. Tipos de Biorrefinerías

Las biorrefinerías tienen distintos tipos en cuanto a su desarrollo, los cuales son (Gomez-Millan, 2015):

- Primera generación. Se trata del uso de la biomasa de cultivos, por ejemplo: maíz, soya, palma y caña de azúcar.
- Segunda generación. Son aquellas que incluyen una variedad de materia prima, desde la lignocelulósica hasta desechos municipales sólidos; por ejemplo, tallos de maíz.
- Tercera generación. Incluye la biomasa proveniente de algas. Con esto no sólo se mejora la producción de combustible, sino que se mejora el proceso desde la selección de la materia prima.
- Cuarta generación. Estas plantas se relacionan con tecnología que combina materia prima genéticamente modificada —que captura grandes cantidades de carbono— con

microorganismos sintetizados genómicamente, para producir combustibles en forma eficiente.

2.5. Biomasa

Se denomina biomasa a la materia orgánica no fosilizada, ya sea originada en un proceso biológico espontáneo o provocado. En términos generales, esta materia tiene múltiples usos y utilidades para los hombres, pues constituye la base de nuestra alimentación y es materia prima para gran número de industrias, tal como la farmacéutica, cosmética, textil, maderera, papelera o ciertos elementos de la construcción. Asimismo, la biomasa puede suponer una fuente de energía, pues se puede transformar en sustancias combustibles denominadas biocombustibles (Borja, 2018).

En un enfoque más industrial el término biomasa designa cualquier materia orgánica disponible de forma renovable o recurrente (excluyendo los bosques primarios), incluidos los árboles y cultivos energéticos destinados a un fin determinado, los residuos agrícolas de alimentos y cultivos, las plantas acuáticas, la madera y los residuos de madera, los residuos animales y otros materiales residuales útiles para propósitos industriales (energía, combustibles, productos químicos y materiales) e incluye también los residuos del procesado de piensos y alimentos (González, 2018).

2.5.1. Tipos de biomasa

Es indudable la existencia de numerosas fuentes de biomasa y tipos, derivados de la diversidad de sistemas de producción agrícola, sistemas forestales y sistemas marinos. Podemos diferenciar dos grandes grupos: por un lado, la biomasa procedente de plantaciones energéticas, por otro la biomasa procedente de residuos o restos de actividades humanas. La Tabla 2.1 muestra una propuesta de clasificación de las fuentes más relevantes para obtener biomasa para uso energético (Borja, 2018):

Tabla 2.1 Fuentes de origen de la biomasa con destino energético (Borja, 2018).

Cultivos energéticos	Herbáceos	Cardo, sorgo, miscanto, girasol, soja, maíz, trigo, cebada remolacha, especies C4 agrícolas.
	Leñosos	Chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias, y especies C4 forestales.
Restos y Residuos	Restos de cultivos agrícolas	Herbáceos Paja, restos de cereales, restos de cultivos hortícolas.
		Leñosos: Poda o eliminación de plantaciones de frutales de hueso y pepita, olivo, vid, cítricos, etc.
	Restos de operaciones silvícolas	Cortas finales, podas, claras, clareos, apertura de vías y pistas forestales, limpieza de monte para prevención de incendios, catástrofes forestales (incendios)
	Restos de las industrias agroalimentarias	Piel de frutos (cítricos), cáscaras (almendra, cacahuete...), huesos (aceituna), pulpa en industrias de zumo, etc.
	Restos de industrias forestales	Serrines y virutas, polvo de lijado, corteza, tacos y recortes
	Restos de las explotaciones Ganaderas	Purines, cama animal, animales fallecidos
	Productos o restos marinos Actividades humanas	Algas, conchas, etc. Residuos alimenticios, papel, otros residuos industriales

2.5.2. Biomasa en el país

En México cada año se genera una gran cantidad de desechos orgánicos urbanos, industriales, agrícolas, ganaderos y forestales que podrían ser aprovechados para ayudar a solventar las necesidades energéticas, tanto de combustibles como de electricidad, del país (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019). Se considera como fuentes productoras de biomasa:

1. Subproductos agrícolas: que son los residuos de la cosecha como: rastrojos de maíz, trigo, sorgo, cebada, así como pencas de agave, hojas y punta de corte en verde y cáscara y fibra de coco.
2. Subproductos agroindustriales: hace referencia a residuos como: cascarilla de café cereza, bagazo de maguey, orujo de uva y cáscaras de maíz y trigo.

3. Subproductos forestales: a) residuos del bosque como son madera en forma de ramas, puntas de árboles, trozas y árboles desperdiciados que quedan al hacer el marcaje, el derribo y la extracción forestal; b) residuos de la industria forestal como aserrín, recortes y costeras que se desechan en los aserraderos.

2.5.3. Biomasa como fuente de energía

Entre las energías renovables destaca, por su potencial, la biomasa, debido fundamentalmente a su papel en la lucha contra el cambio climático, a su menor impacto medioambiental y a su contribución en la mejora de la competitividad, el empleo y el desarrollo regional (Torreiro y col., 2018).

La transformación de la biomasa en energía, también llamada bioenergía, comprende un amplio y diverso grupo de fuentes biomásicas, procesos de transformación y requerimientos de infraestructura de acuerdo con el uso final que se desee dar a la energía. Sea cual sea la fuente, la biomasa exige ser cosechada o recolectada, almacenada y posteriormente transportada a la instalación donde se pretende hacer uso de ella antes de ser transformada en bioenergía a partir del uso de una tecnología adecuada.

La biomasa constituye una de las fuentes renovables de energía de mayores perspectivas a nivel mundial, por sus potencialidades y su menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles, esto con un adecuado procesamiento, así como planificación de su cadena de suministro. Mediante diferentes procesos y tecnologías de conversión energética es posible obtener combustibles en forma sólida, líquida y gaseosa a partir de cualquier tipo de biomasa (Obando y Wellington, 2018).

La biomasa puede ser transformada en formas útiles de energía usando diferentes procesos. Los principales factores que influyen la decisión a la hora de escoger el tipo de proceso son el tipo y cantidad de recursos biomásicos disponibles, el uso final que se desea obtener de la energía, las limitaciones ambientales que puedan ser impuestas a este tipo de proyectos, las condiciones económicas y los requerimientos específicos de estos proyectos.

La biomasa puede ser transformada básicamente en 3 subproductos (Arenas, 2009):

- Productos para la generación de potencia y calor.

- Productos para ser usados como combustibles en el transporte.
- Productos químicos cuyo uso final no tiene que ver con la generación de energía.

La selección del proceso de valorización energético idóneo de la biomasa depende fundamentalmente de las características del recurso disponible y del uso final. La combustión de biomasa en calderas es, hoy en día, la opción de valorización más ampliamente utilizada para aplicaciones térmicas (Torreiro y col., 2018).

En este sentido energético, la preocupación del Gobierno ha sido generar soluciones energéticas, que permitan la mejor provisión posible del servicio en términos de insumos, duración y tarifas, pero que además sean viables financieramente y sostenibles a largo plazo, donde el uso de biomasa sería por tanto una excelente alternativa (Martínez-Amariz y Garrido-Silva, 2019).

2.6. Transformación de biomasa

La transformación de biomasa mediante los procesos termoquímicos son principalmente tres: combustión, pirólisis y gasificación, el proceso de licuefacción es rara vez usado en el aprovechamiento energético de la biomasa. Mientras que los procesos bioquímicos de transformación son aquellos en los cuales agentes biológicos intervienen en el proceso químico de conversión de la biomasa en un energético de uso directo. Los principales procesos de transformación bioquímicos de la biomasa son gasificación por digestión anaerobia y fermentación (Arenas, 2009).

2.6.1. Combustión

En el caso de la biomasa el proceso consta de varios pasos fundamentales: En primer lugar, la biomasa debe ser secada, gran parte de los recursos biomásicos tienen un alto contenido de agua, entre mayor sea el contenido de agua más difícil resulta su aprovechamiento para la producción de energía (Arenas, 2009).

La combustión de la biomasa es usada en un amplio margen de equipos para transformar la energía química almacenada en la biomasa en calor, energía mecánica o electricidad, tal como estufas, turbinas de vapor, turbo-generadores, etc. La combustión de la biomasa produce gases calientes a temperaturas entre los 800 – 1000°C. Es posible quemar cualquier tipo de biomasa, sin embargo, en la práctica la combustión es únicamente viable en biomasa con un contenido de

humedad inferior al 50% a no ser que esta se someta a un proceso de secado antes de su combustión. Para biomasa con contenidos de humedad superiores, es mucho mejor usar procesos de transformación bioquímicos (Arenas, 2009).

Los gases resultantes de la combustión de la biomasa pueden ser usados para una amplia variedad de aplicaciones tales como:

- Pequeños sistemas de producción de calor para calefacción directa de hogares, cocción de alimentos y calentamiento de agua.
- Producción de calor a mayor escala para calefacción de comunidades y pequeños procesos industriales.
- Alcance de altísimas temperaturas para la producción de vapor con propósitos industriales y generación de energía eléctrica a gran escala usando turbinas o motores de vapor.

2.6.2. Pirolisis

La pirolisis es la transformación de la biomasa en fracciones líquidas, sólidas y gaseosas a partir del calentamiento de la biomasa en ausencia de aire a temperaturas cercanas a los 500°C. La pirolisis puede ser usada para producir biocombustibles principalmente usando la técnica de “bio-flash” posibilitando de esa forma la producción de biocombustible a partir de biomasa con una eficiencia superior al 80%. El biocombustible puede ser usado en motores e igualmente como materia prima para refinerías. Sin embargo, estos crudos presentan problemas en su producción tales como la poca estabilidad térmica y su poder corrosivo. Existen algunos procesos tales como reducción de la cantidad de oxígeno en la mezcla y la remoción de todos los compuestos alquénicos por medio de hidrogenación y rompimiento catalítico de las moléculas (Arenas, 2009).

2.6.3. Gasificación

El procesamiento termoquímico de la biomasa genera productos gaseosos, líquidos y sólidos e igualmente ofrece la posibilidad de producir combustibles gaseosos y líquidos. La gasificación es un proceso de degradación total consistente en una serie de procesos térmicos y termoquímicos que convierten todo el carbono (C) en la biomasa en un gas, dejando adicionalmente un residuo inerte.

Algunas consideraciones importantes sobre la gasificación de la biomasa son:

- El gas debe ser, generalmente, purificado ya que contiene impurezas, tóxicos y otros gases que pueden entorpecer el proceso de combustión posterior.
- El gas biomásico puede ser usado para generar energía a través de calentadores de agua, motores y turbinas de gas, generando emisiones netas casi nulas (Respecto al ciclo de la biomasa).

La gasificación de la biomasa recoge productos sólidos, líquidos y gaseosos para transformarlos en gases útiles en la generación de energía. La Gasificación es la degradación total del sustrato de carbono (en este caso particular, la biomasa) hasta llevarlo a forma gaseosa. Cuando se usa el oxígeno como agente oxidante, los productos de la gasificación son principalmente metano (CH_4), monóxido y dióxido de carbono (CO y CO_2 , respectivamente). Adicionalmente, durante el proceso se producen otros gases como hidrógeno (H_2) y nitrógeno (N_2), y queda un residuo de materia inerte (Arenas, 2009). La composición del gas de síntesis derivado de la gasificación de biomasa depende principalmente del combustible de biomasa, el tipo de gasificador y el agente de gasificación (Patra y col., 2016). Se utilizan varios tipos de gasificadores para gasificación y la selección del tipo de gasificador depende de la capacidad de la unidad. Además de los diferentes tipos de gasificadores, también se pueden emplear diferentes agentes de Gasificación, incluidos aire, oxígeno, aire enriquecido con oxígeno y vapor para el proceso de gasificación, cada uno de los cuales produce una composición diferente del gas de síntesis producido (Shaya y col., 2018).

2.6.4. Fermentación ABE

El proceso de producción de butanol, acetona y etanol a partir de biomasa se conoce popularmente como fermentación acetona-butanol-etanol (ABE), que tiene una historia que data de hace más de un siglo. Este proceso fue inventado durante la Primera Guerra Mundial por Chaim Weizmann, que trabajaba en la Universidad de Manchester. La industria de la fermentación ABE creció significativamente en la primera mitad del siglo XX. Al final de la Segunda Guerra Mundial, 66% de butanol y una décima parte de la acetona en EE. UU. Se producía a través de la ruta de fermentación (Mayank y col., 2012).

La fermentación bioquímica típica de ABE involucra microorganismos de la familia de los clostridios. Los principales clostridios solventogénicos que se utilizan en la fermentación ABE son *C. acetobutylicum*, *C. beijerinckii*, *C. saccharobutylicum* y *C. saccharoperbutylacetonicum*. Tenga en cuenta que los tres últimos microorganismos se denominaron inicialmente *C. acetobutylicum* (Lee y col., 2008). Los microorganismos clostridiales juegan un papel esencial en la fermentación ABE al proporcionar energía para el crecimiento y la producción de sustancias químicas. Los diferentes tipos de bacterias tienen un efecto diferente en las condiciones óptimas de fermentación. *C. acetobutylicum* es uno de los organismos que se utiliza principalmente para convertir los carbohidratos de la materia prima en monosacáridos. Los sacáridos son las fuentes de energía de varios productos químicos. A diferencia de la levadura, los microorganismos unicelulares clasificados como hongos solo pueden convertir el azúcar en alcohol y dióxido de carbono. Los clostridios son bacterias que pueden digerir no sólo el azúcar sino también el suero, el almidón, la celulosa y la lignina. Por lo tanto, el uso de *Clostridium* puede utilizarse no sólo para biocombustibles de primera generación sino también para biocombustibles de segunda generación a partir de biomasa lignocelulósica (Veza y col., 2020).

2.6.5. Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica (DA) es un método mediante el cual los residuos orgánicos biodegradables, como residuos de plantas agrícolas, residuos de alimentos, lodos de depuradora, residuos de ganado, residuos de cultivos secundarios y otros, se convierten en una valiosa fuente de energía, al tiempo que disminuyen sus volúmenes. En particular, el proceso de DA produce dos tipos distintos de salida: biogás y aditivo para el suelo. El biogás es una mezcla gaseosa combustible, que se clasifica como una valiosa fuente de energía debido a su alto poder calorífico. Por tanto, se puede quemar y convertir en electricidad mediante un equipo electromecánico adecuado (Achinas y Euverink, 2016). El biogás se puede comparar con el gas natural porque tiene un 60% de metano y un 29% de CO₂. El gas natural es una mezcla con 93-97% de metano y 3-5% de CO₂ (y en algunos casos gases con contenidos más bajos como etano o incluso nitrógeno). Se estima que de 1 tonelada de materiales biodegradables se puede producir alrededor de 100-200 m³ de biogás, (Naseem y col., 2018; Long y col., 2018). Según Yang y col., (2015), la fracción sólida extraída contiene aproximadamente un 25-35% de materia seca. En otras palabras, contiene 60-

80% del total de materia seca y fósforo, 20-25% de nitrógeno y 10-15% del potasio contenido en la materia prima orgánica.

2.7. Índice de desarrollo humano e índice de pobreza humana

En el año 2020, el porcentaje de población vulnerable por carencias sociales en México fue de 28.1%, es decir, 4,968,400 personas, aproximadamente, presentaron al menos una carencia. Al mismo tiempo, 8.7% de la población era vulnerable por ingresos, lo que significa que alrededor de 1,541,400 personas no tenían los ingresos suficientes para satisfacer sus necesidades básicas. (CONEVAL, 2020). Por esto, es necesario evaluar las condiciones en las que se encuentra el país y los parámetros que nos permite esta evaluación son el índice de desarrollo humano y el índice de pobreza humana.

2.7.1. Índice de desarrollo humano

El IDH propuesto por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) es una medida sinóptica del desarrollo humano. Mide el promedio de los logros de un país en tres dimensiones básicas del desarrollo humano (López-Calva y col., 2004):

- Una vida larga y saludable, medida por la expectativa de vida al nacer.
- El conocimiento, medido por la tasa de alfabetización de adultos (con una ponderación de dos tercios) y la tasa bruta combinada de matriculación en escuelas primarias, secundarias y terciarias (con una ponderación de un tercio).
- Un nivel de vida digno, medido por el PIB per cápita en términos de paridad del poder adquisitivo (PPA) en dólares estadounidenses.

2.7.2. Metodología para calcular el índice de desarrollo humano

El IDH propuesto por el PNUD se basa en la medición de los logros alcanzados por un país o región en términos de tres dimensiones: salud, educación e ingreso (CEPAL, 2006). La Tabla 2.2 muestra los límites a considerar para medir el IDH para cada dimensión.

Tabla 2.2 Límites de dimensiones

Indicador	Valor máximo	Valor mínimo
Esperanza de vida al nacer (en años)	85	25
Tasa de alfabetización de adultos (%)	100	0
Tasa bruta combinada de matriculación	100	0
PIB per cápita (en dólares ajustados a poder de paridad de compra, PPC)	40,000	100

Nota: Para obtener el índice en la dimensión de educación se agregan los dos componentes mencionados con una ponderación de 2/3 para el índice de alfabetización y 1/3 para el índice de matriculación.

La fórmula para calcular el *IDH* consiste en un promedio simple de las tres fuentes mostrado en la Ecuación 2.1:

$$IDH = \frac{1}{3}(IEV) + \frac{1}{3}(IE) + \frac{1}{3}(IPIB) \quad (2.1)$$

Para el caso de la esperanza de vida la Ecuación 2.2 es específica y se muestra a continuación:

$$IEV = \sum \left\{ \frac{IEV_e - IEV_{min}}{IEV_{max} - IEV_{min}} \right\} \quad (2.2)$$

Donde el subíndice *e* indica el estado de la republica de referencia, el subíndice *min* se refiere al país del mundo que tiene el menor valor de la variable *IEV* y el subíndice *max* al país con el mayor valor de la variable en cuestión.

Para el caso del índice *IE*, éste se compone de dos indicadores. En primer lugar, el índice de alfabetización de adultos (*IA*) mostrado en la Ecuación 2.3:

$$IA = \sum \left\{ \frac{IA_e - IA_{min}}{IA_{max} - IA_{min}} \right\} \quad (2.3)$$

Y en segundo, el índice bruto de matriculación (*IM*) mostrado en la Ecuación 2.4:

$$IM = \sum \left\{ \frac{IM_e - IM_{min}}{IM_{max} - IM_{min}} \right\} \quad (2.4)$$

Finalmente se aplican las siguientes ponderaciones mostradas en la Ecuación 2.5:

$$IE = \frac{2}{3}(IA) + \frac{1}{3}(IM) \quad (2.5)$$

Por su parte, el índice del Producto Interno Bruto (PIB) por habitante, se calcula ajustando el PIB nacional por paridad y poder de compra (PPC) (con respecto al dólar de los Estados Unidos de América), por lo que la formula a aplicar se muestra en la Ecuación 2.6 y es la siguiente:

$$IPIB = \sum \left\{ \frac{\log(PIB_e) - \log(PIB_{min})}{\log(PIB_{max}) - \log(PIB_{min})} \right\} \quad (2.6)$$

Con estas fórmulas, el desempeño en cada dimensión se expresa con un valor entre 0 y 1.

2.7.3. El índice de pobreza humana para países en desarrollo

Mientras que el IDH mide el promedio de logro, el IPH-1 mide las privaciones en las tres dimensiones básicas del desarrollo humano reflejadas en el IDH (López-Calva y col., 2003):

- Una vida larga y saludable: vulnerabilidad a morir a una edad relativamente temprana, medida por la probabilidad al nacer de no sobrevivir a los 40 años.
- Conocimiento: exclusión del mundo de la lectura y las comunicaciones, medida por la tasa de analfabetismo en adultos.
- Un nivel de vida digno: falta de acceso a las provisiones económicas generales, medida por el promedio no ponderado de dos indicadores, el porcentaje de la población sin acceso sostenible a una fuente de agua mejorada y el porcentaje de niños con un peso inferior al normal.

Calcular el IPH-1 es más sencillo que calcular el IDH. Los indicadores utilizados para medir las privaciones ya están normalizados entre 0 y 100 (porque se expresan en porcentajes).

2.7.3.1. Cálculo del IPH-1

Medición de la privación de un nivel de vida digno, para medirla se utiliza el promedio no ponderado de dos indicadores como se muestra en la Ecuación 2.7.

$$\begin{aligned} \text{Promedio no ponderado} = & \\ & \frac{1}{2} (\text{poblacion sin aceso sotenible a una fuete de agua mejorada}) + \\ & \frac{1}{2} (\text{ninios con un peso inferior al normal}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

La fórmula para calcular el IPH-1 se muestra en la Ecuación 2.8 y es la siguiente:

$$IPH_{-1} = \left[\frac{1}{3} (P_1^\alpha + P_2^\alpha + P_3^\alpha) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.8)$$

Donde

$P_1 =$ Probabilidad al nacer de no sobrevivir a las 40 años(%)

$P_2 =$ Tasa de analfabetismo en adultos

$P_3 =$ Promedio no ponderado de la población

$$\alpha = 3$$

2.7.3.2. El índice de pobreza humana para países miembros de la OCDE seleccionados (IPH-2)

El IPH-2 mide las privaciones en las mismas dimensiones que el IPH-1 y, además, recoge la exclusión social. De esta forma refleja las privaciones en cuatro dimensiones:

- Una vida larga y saludable: vulnerabilidad a morir a una edad relativamente temprana, medida por la probabilidad al nacer de no sobrevivir a los 60 años.
- Una vida larga y saludable exclusión del mundo de la lectura y las comunicaciones, medida por el porcentaje de adultos (comprendidos entre 16 y 65 años) carentes de habilidades de alfabetización funcionales.
- Un nivel de vida digno: medido por el porcentaje de personas que viven con ingresos por debajo de la línea de pobreza (50% de la mediana de los ingresos familiares ajustados disponibles).
- Exclusión social: medida por la tasa de desempleo a largo plazo (12 meses o más).

2.7.3.3. Cálculo del IPH-2

La fórmula para calcular el IPH-2 se muestra en la Ecuación 2.9 y es la siguiente:

$$IPH_{-2} = \left[\frac{1}{4} (P_1^\alpha + P_2^\alpha + P_3^\alpha + P_4^\alpha) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.9)$$

Donde:

$P_1 =$ Probabilidad al nacer de no sobrevivir a las 60 años(%)

$P_2 =$ adultos que carecen de habilidades de alfabetización funcionales

$P_3 =$ población que vive por debajo de la línea de pobreza (50% de la mediana de los ingresos familiares ajustados disponibles)

$P_4 =$ Tasa de desempleo (que dure como mínimo 12 meses)

$$\alpha = 3$$

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En este apartado se describen los pasos para cumplir con el objetivo general para la planificación estratégica de biorrefinerías para el uso de biomasa residual en el caso de estudio, además de cumplirse cada uno de los objetivos específicos. Además, en la Figuras 3.1a, 3.1b, 3.1c y 3.1d se muestra el diagrama de flujo lógico de la investigación de una forma más sencilla.

1. Realizar revisión bibliográfica exhaustiva, sobre optimización de cadenas de suministro y procesos, además, de la planeación y optimización de biorrefinerías, así como su posible ubicación dentro de la cadena de suministro, fuentes de biomasa residual y el estado actual de los estados de México respecto a su índice de desarrollo humano, para considerar aspectos generales y específicos del problema que se pretende solucionar.
2. Recopilar y obtener datos y parámetros referentes a las cadenas de suministro de biorrefinerías en México con base al problema por solucionar.
3. Desarrollar la superestructura para el problema a solucionar (considerando las materias primas, productos generados en las biorrefinerías, transportes de materias y productos y las áreas de venta).
4. Desarrollar y formular el modelo matemático de optimización para el problema a solucionar y los casos de estudio que consideraran.
5. Codificar el modelo de optimización en el software GAMS y depurar el código para una adecuada implementación de casos de estudio
6. Implementar los casos de estudio con diferentes escenarios.
7. Evaluar, técnica, económica, ambiental y socialmente los resultados de cada escenario y comenzar con la selección de la mejor opción de optimización que satisfaga los objetivos establecidos para este proyecto.
8. Finalmente, reportar los resultados obtenidos, concluir la escritura y defensa de la tesis y realizar el artículo científico.

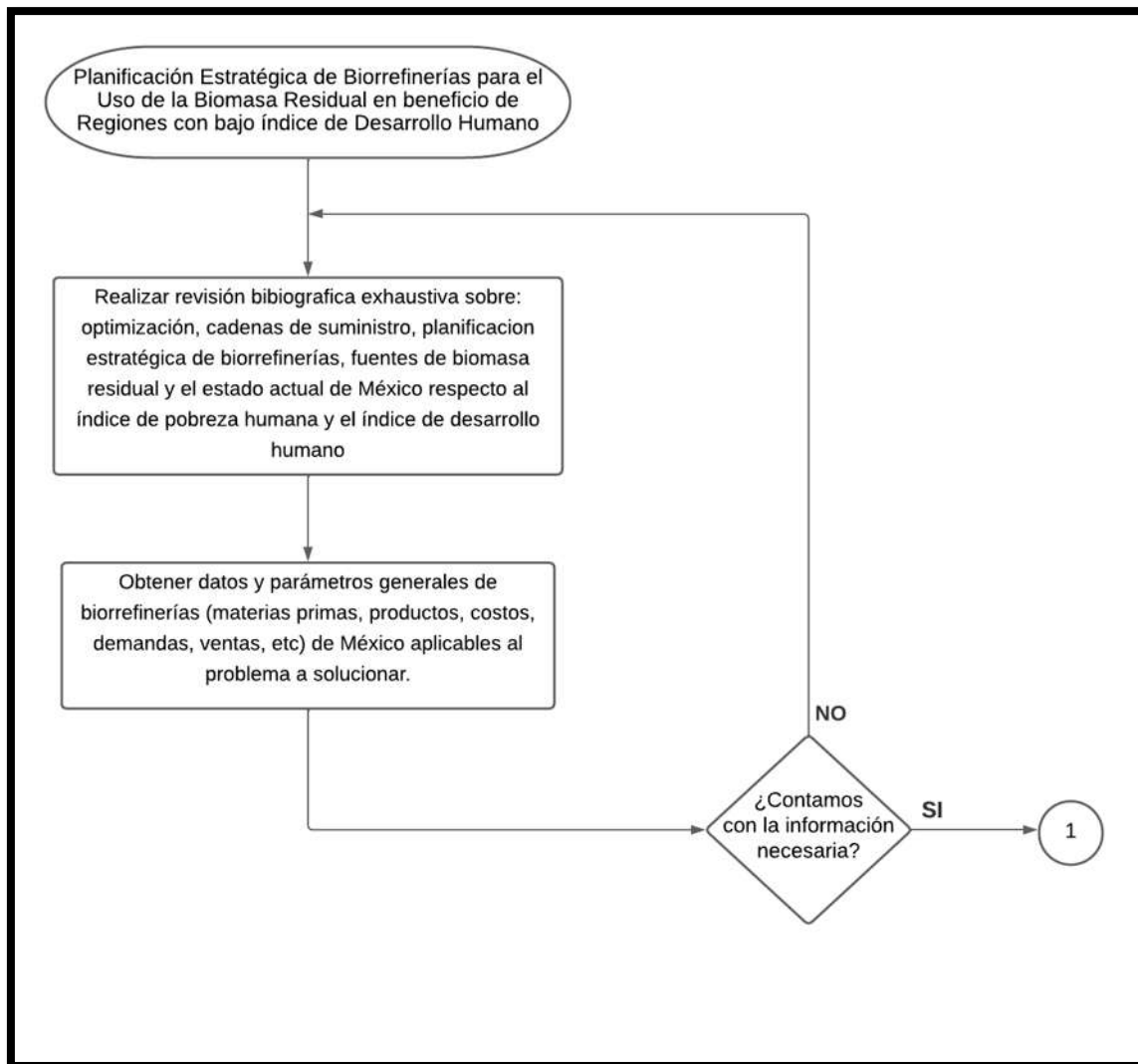


Figura 3.1a Diagrama de flujo lógico de investigación

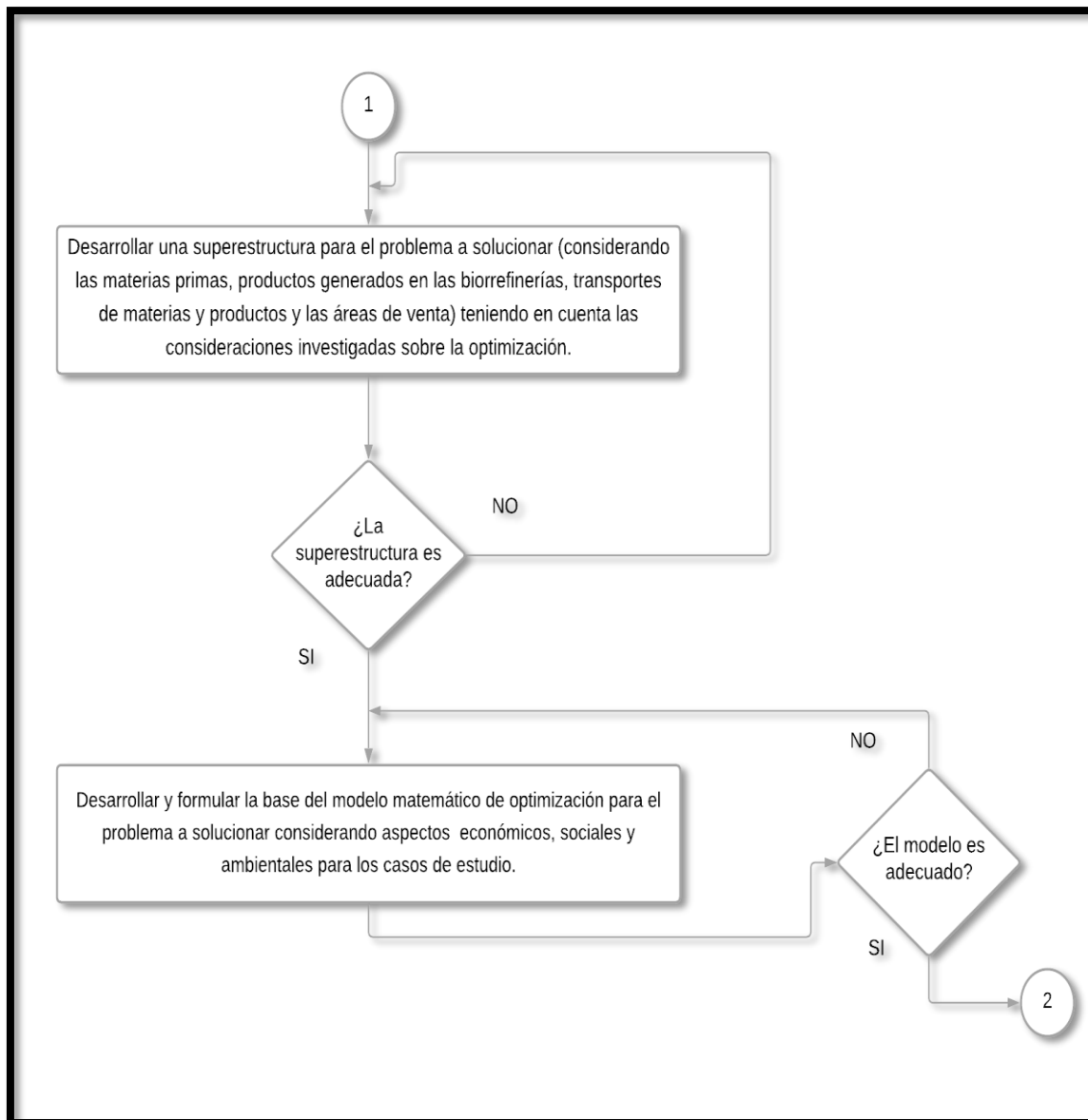


Figura 3.1b Diagrama de flujo lógico de la investigación

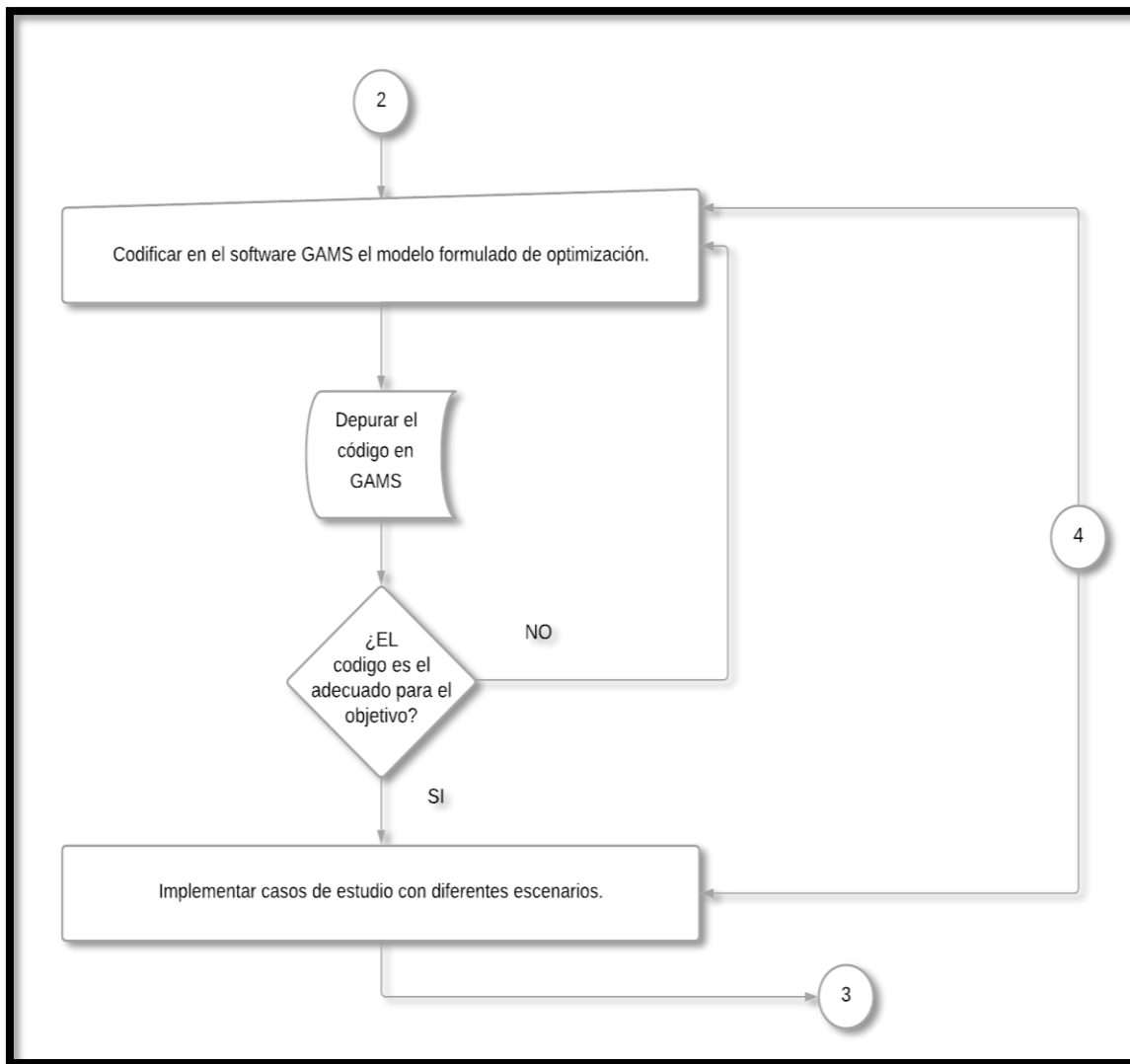


Figura 3.1c Diagrama de flujo lógico de investigación

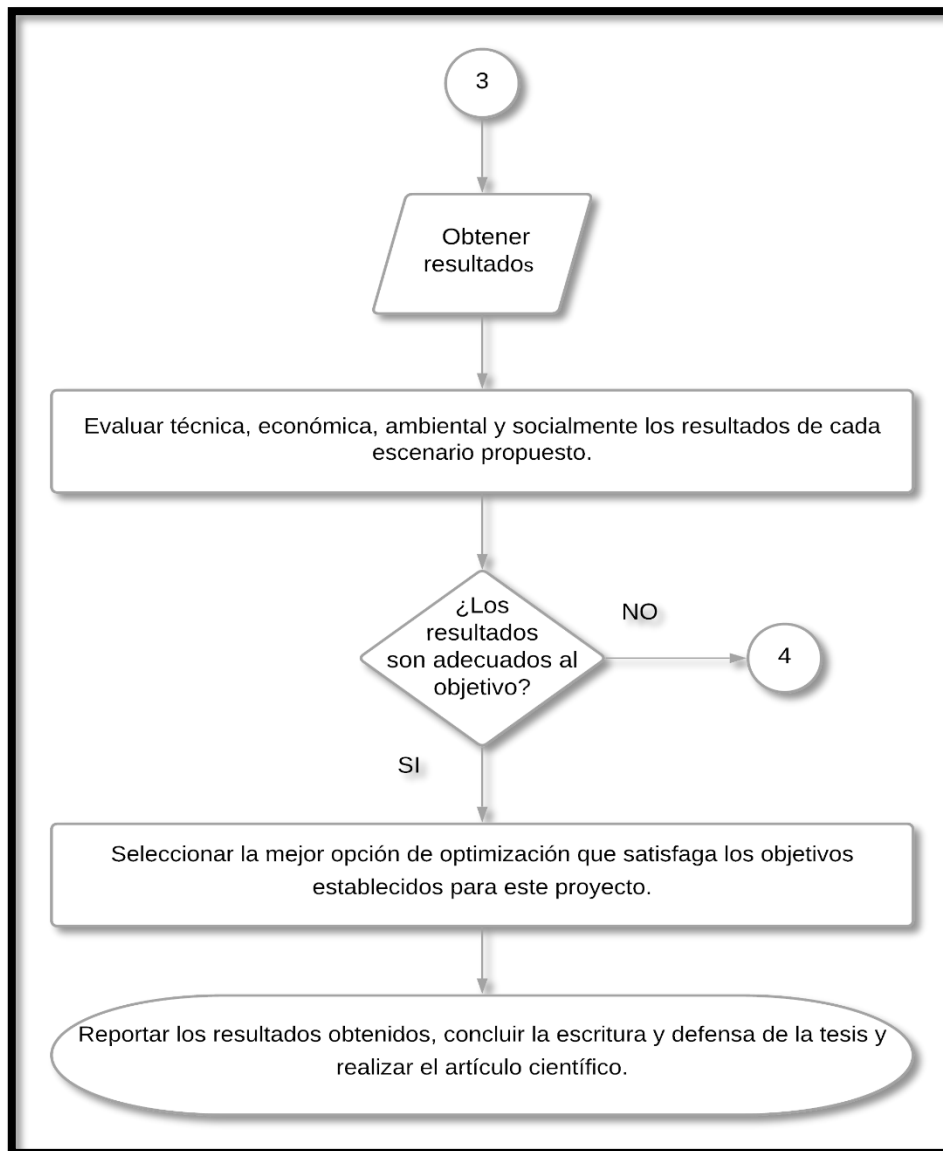


Figura 3.1d Diagrama de flujo lógico de investigación.

3.1. Formulación del modelo matemático

Para presentar el modelo matemático, es necesario primero definir los principales índices utilizados. Estos índices están definidos a continuación: el índice m representa las materias primas generadas en los sitios de cultivo h , tales como residuos agrícolas, residuos municipales orgánicos y lodos biológicos provenientes del agua residual tratada. El índice f representa las biorrefinerías distribuidas en una región geográfica (en el caso de estudio abordado en este trabajo se consideran 5 distribuidas en el país). En cada biorrefinería se llevan a cabo distintos bioprocesos representados por el índice r , los productos generados en las biorrefinerías son nueve entre estos destaca el bioetanol, gas natural y electricidad, representados por el índice p . El índice c representa los mercados en los cuales se vende el producto.

3.1.1 Materia prima almacenada en las regiones de cultivo y biorrefinerías.

La materia prima usada en la cadena de suministro es limitada y podría almacenarse. En este contexto, la materia prima almacenada deberá ser menor o igual que la máxima materia prima que se puede almacenar en cierto sitio de cultivo (Ecuación 3.1) y mayor a la materia prima mínima que se puede almacenar (Ecuación 3.2); en otras palabras, el almacenamiento debe estar delimitado.

Debido a que la existencia de almacenamiento es dependiente de la cantidad de materia prima almacenada, (por ejemplo: si la materia prima que se quiere almacenar es menor a la cantidad mínima, el almacenamiento no debe existir). El modelo matemático considera una variable binaria que define si el almacenamiento es necesario o no. La inclusión de esta variable binaria permite satisfacer las ecuaciones asociadas al almacenamiento independientemente del caso que se presente, de esta forma, si la materia prima necesita ser almacenada la variable será igual a 1 y de no ser necesario almacenarla será cero.

$$M_{m,h}^{inicial\ alm} \leq M_{m,h}^{Max\ alm} \cdot y_{m,h,0}^{Necessary\ alm} \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.1)$$

$$M_{m,h}^{inicial\ alm} \geq M_{m,h}^{Min\ alm} \cdot y_{m,h,0}^{Necessary\ alm} \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.2)$$

En el caso de las biorrefinerías se sigue el principio antes mencionado de límites superior e inferior y una variable binaria, las Ecuaciones resultantes son las 3.3 y 3.4.

$$M_{m,f}^{inicial\ alm} \leq M_{m,f}^{Max\ alm} \cdot y_{m,f,0}^{Necessary\ alm} \quad \forall m \in M, f \in F \quad (3.3)$$

$$M_{m,f}^{inicial\ alm} \geq M_{m,f}^{Min\ alm} \cdot y_{m,f,0}^{Necessary\ alm} \forall m \in M, f \in F \quad (3.4)$$

3.1.2 Productos almacenados en las biorrefinerías.

El producto generado será almacenado en las plantas antes de ser enviado a los consumidores por lo que debe tener límites máximos y mínimos de almacenamiento. Para facilitar un adecuado almacenamiento, se implementa una variable binaria que define si es necesario o no, almacenar producto teniendo un valor de 1 si es necesario almacenar y cero si no es necesario, como se muestra en las Ecuaciones 3.5 y 3.6.

$$P_{p,f}^{inicial\ alm} \leq P_{p,f}^{Max\ alm} \cdot y_{p,f,0}^{Necessary\ alm} \forall p \in P, f \in F \quad (3.5)$$

$$P_{p,f}^{inicial\ alm} \geq P_{p,f}^{Min\ alm} \cdot y_{p,f,0}^{Necessary\ alm} \forall p \in P, f \in F \quad (3.6)$$

3.1.3 Productos almacenados en el mercado.

Los productos una vez en el mercado podrán ser almacenados sin superar un límite máximo y mínimo, de acuerdo a sus ventas, para implementar esto se usa una variable binaria que satisface el adecuado almacenamiento en los mercados, las Ecuaciones 3.7 y 3.8 representan lo antes mencionado.

$$P_{p,c}^{inicial\ alm} \leq P_{p,c}^{Max\ alm} \cdot y_{p,c}^{Necessary\ alm} \forall p \in P, c \in C \quad (3.7)$$

$$P_{p,c}^{inicial\ alm} \geq P_{p,c}^{Min\ alm} \cdot y_{p,c}^{Necessary\ alm} \forall p \in P, c \in C \quad (3.8)$$

La cantidad de materia prima almacenada al inicio del horizonte de tiempo será una porción del almacenamiento máximo permitido. Esta porción se representa por $A_{m,h}$. Por ejemplo, si el almacenamiento es cero, entonces no habrá almacenamiento al comienzo del caso de estudio esto se representa mediante la Ecuación 3.9.

$$M_{m,h}^{inicial\ alm} = A_{m,h} \cdot M_{m,h}^{Max\ alm} \forall m \in M, h \in H \quad (3.9)$$

3.1.4 Restricciones de continuidad

Estas restricciones aseguran que el almacenamiento al comienzo del horizonte del tiempo debe ser igual que el almacenamiento al final del horizonte de tiempo, y es aplicable tanto para materias primas como para productos como se muestra en las Ecuaciones 3.10-3.13.

$$M_{m,h,t}^{alm} = M_{m,h}^{inicial alm} \forall m \in M, h \in H \quad (3.10)$$

$$M_{m,f,t}^{alm} = M_{m,f}^{inicial alm} \forall m \in M, f \in F \quad (3.11)$$

$$P_{p,f,t}^{alm} = P_{p,f}^{inicial alm} \forall p \in P, f \in F \quad (3.12)$$

$$P_{p,c,t}^{alm} = P_{p,c}^{inicial alm} \forall p \in P, c \in C \quad (3.13)$$

3.1.5 Restricción limitante de producción de materia prima.

Definida en la Ecuación 3.14, determina que la máxima materia prima producida en los sitios de cultivo deberá ser mayor o igual que la materia prima producida en el horizonte de tiempo, es decir se restringió que la materia prima producida en los sitios de cultivo no supere el máximo posible.

$$M_{m,h,t}^{max} \geq M_{m,h,t}^{produced} \forall m \in M, h \in H, t \in T \quad (3.14)$$

3.1.6 Materia prima almacenada en sitios de cultivo y biorrefinerías al final del periodo.

La materia prima en almacén al final del periodo, deberá ser la materia prima producida en los sitios de cultivo o recopilada en las biorrefinerías menos la sumatoria de la materia prima enviada a las biorrefinerías o consumida en el proceso más la materia prima existente en el almacén al inicio del horizonte de tiempo, esto para toda materia prima m , sitio de cultivo h y biorrefinería f , como se muestra en las Ecuaciones 3.15 y 3.16. Es importante mencionar que no está permitido transportar materia prima al inicio del caso de estudio.

$$M_{m,h,t}^{alm} = M_{m,h,t}^{produced} - \sum_f M_{m,h,f,t}^{out distr} + M_{m,h}^{inicial alm} \forall m \in M, h \in H, t \in T \quad (3.15)$$

$$M_{m,f,t}^{alm} = \sum_h M_{m,h,f,t}^{in distr} - \sum_p \sum_r M_{m,p,r,f,t}^{out process} + M_{m,f}^{inicial alm} \forall m \in M, f \in F, t \in T \quad (3.16)$$

3.1.7 Productos almacenados en las biorrefinerías al final del periodo.

Los productos almacenados en las biorrefinerías al final del periodo estarán definidos por la Ecuación 3.17, que muestran que los productos en almacén serán iguales a la sumatoria de los productos generados por las biorrefinerías más los productos almacenados al inicio del caso de estudio menos la sumatoria de los productos distribuidos al mercado, esto para todo producto p y para toda biorrefinería f .

$$P_{p,f,t}^{alm} = \sum_m \sum_r P_{m,p,r,f,t}^{in\ produced} - \sum_c P_{p,f,c,t}^{out\ distr} + P_{p,f}^{inicial\ alm} \quad \forall p \in P, f \in F, t \in T \quad (3.17)$$

3.1.8 Productos almacenados en el mercado al final del periodo.

Los productos almacenados en el mercado al final del periodo se definen por la Ecuación 3.18, que indica que los productos en el almacén de los mercados serán la sumatoria de los productos dispensados por las biorrefinerías hacia los mercados más los productos en el almacén en el mercado al inicio del caso de estudio menos los productos vendidos, esto para todo producto p y para todo mercado c .

$$P_{p,c,t}^{alm} = \sum_f P_{p,f,c,t}^{in\ distr} - P_{p,c,t}^{out\ sale} + P_{p,c}^{inicial\ alm} \quad \forall p \in P, c \in C, t \in T \quad (3.18)$$

3.1.9 Venta máxima de productos.

Los productos vendidos deberán tener un límite, el cual depende de la demanda los mercados, es de decir, la demanda máxima de producto en los mercados deberá ser mayor o igual a la cantidad de productos vendidos en cada mercado, como se muestra en la Ecuación 3.19.

$$P_{p,c,t}^{Max\ demand} \geq P_{p,c,t}^{out\ sale} \quad \forall p \in P, c \in C, t \in T \quad (3.19)$$

3.1.10 Generación de productos.

Los productos que se generan en cada biorrefinería estarán definidos por la Ecuación 3.20 que indica que la cantidad de producto generado es igual a la materia prima utilizada en el proceso por un factor de conversión, acorde a una combinación de ruta de procesamiento, producto y materia prima. Es importante señalar que la materia prima utilizada en el proceso deberá estar limitada debido a las cantidades de producción de la planta o tecnología de proceso, en caso de que la transformación hacia productos sea requerida por el sistema productivo, por lo que se asigna una variable binaria que tendrá el valor de 1 si es necesario generar productos y cero si no es necesario, como se muestra en la Ecuación 3.21 y 3.22.

$$P_{m,p,r,f,t}^{in\ produced} - \alpha_{p,m,r}^{factor} \cdot M_{m,p,r,f,t}^{out\ process} = 0 \quad \forall m \in M, p \in P, r \in R, f \in F, t \in T \quad (3.20)$$

$$M_{m,p,r,f,t}^{out\ process} \leq y_{m,p,r,f,t}^{Necessary\ process} \cdot M_{m,p,r,f}^{max\ used} \quad \forall m \in M, p \in P, r \in R, f \in F, t \in T \quad (3.21)$$

$$M_{m,p,r,f,t}^{out\ process} \geq y_{m,p,r,f,t}^{Necessary\ process} \cdot M_{m,p,r,f}^{min\ used} \quad \forall m \in M, p \in P, r \in R, f \in F, t \in T \quad (3.22)$$

3.1.11 Restricciones asociadas al transporte

Para modelar el transporte, es necesario definir que el material (materia prima o producto) proveniente de un nodo origen de la cadena productiva será igual al material en el nodo destinado asociado. Estas conexiones de origen-destino se dan entre sitios de cultivo y biorrefinerías (Ecuación 3.23), así como biorrefinerías y sitios de venta (Ecuación 3.24).

$$M_{m,h,f,t}^{out\ distr} - M_{m,h,f,t}^{in\ distr} = 0 \quad \forall m \in M, h \in H, f \in F, t \in T \quad (3.23)$$

$$P_{p,f,c,t}^{out\ distr} - P_{p,f,c,t}^{in\ distr} = 0 \quad \forall p \in P, f \in F, c \in C, t \in T \quad (3.24)$$

Además, las cantidades transportadas de materias prima y producto deben obedecer límites máximos y mínimos de transporte en caso de que el transporte se lleve a cabo. Para ello se asigna una variable binaria que tendrá el valor de 1 si es necesario el transporte y cero si no es necesario, como se muestra en la Ecuación 3.25 y 3.26 para materias primas y en la Ecuación 3.27 y 3.28 para productos.

$$M_{m,h,f,t}^{out\ distr} \leq y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans} \cdot U_{m,h,f}^{max\ transp} \quad \forall m \in M, h \in H, f \in F, t \in T \quad (3.25)$$

$$M_{m,h,f,t}^{out\ distr} \geq y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans} \cdot U_{m,h,f}^{min\ transp} \quad \forall m \in M, h \in H, f \in F, t \in T \quad (3.26)$$

$$P_{p,f,c,t}^{out\ distr} \leq y_{p,f,c,t}^{Necessary\ trans} \cdot U_{p,f,c}^{max\ transp} \quad \forall p \in P, f \in F, c \in C, t \in T \quad (3.27)$$

$$P_{p,f,c,t}^{out\ distr} \geq y_{p,f,c,t}^{Necessary\ trans} \cdot U_{p,f,c}^{min\ transp} \quad \forall p \in P, f \in F, c \in C, t \in T \quad (3.28)$$

3.1.12 Costos de almacenamiento

Respecto a la materia prima, esta puede ser almacenada en diferentes nodos de la cadena de suministro. En este caso, el modelo permite almacenamiento de materia prima en los sitios de cultivo (previo a ser enviada a las biorrefinerías) y en las biorrefinerías (previo a ser utilizadas en producción). La función de costo de almacenamiento de materia prima depende de un costo fijo asociado con la existencia de almacenamiento y el costo variable que depende de la materia prima almacenada la Ecuación 3.29 y 3.30 muestran los costos mencionados.

$$C_{m,h}^{total\ alm} = C_{m,h}^{fixed\ alm} \cdot M_{m,h}^{Max\ alm} \cdot y_{m,h}^{Necessary\ alm} + \sum_t C_{m,h}^{variable\ alm} \cdot M_{m,h,t}^{alm} \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.29)$$

$$C_{m,f}^{total\ alm} = C_{m,f}^{fixed\ alm} \cdot M_{m,f}^{Max\ alm} \cdot y_{m,f}^{Necesary\ alm} + \sum_t C_{m,f}^{variable\ alm} \cdot M_{m,f,t}^{alm} \quad \forall m \in M, f \in F \quad (3.30)$$

También los productos pueden ser almacenados pero los nodos cambian, en este caso, el almacenamiento de productos puede ser en biorrefinerías y sitios de consumo. El modelado es similar en el que los costos variables dependen de la cantidad de producto almacenado como lo muestran las Ecuaciones 3.31 y 3.32

$$C_{p,f}^{total\ alm} = C_{p,f}^{fixed\ alm} \cdot P_{p,f}^{Max\ alm} \cdot y_{p,f}^{Necesary\ alm} + \sum_t C_{p,f}^{variable\ alm} \cdot P_{p,f,t}^{alm} \quad \forall p \in P, f \in F \quad (3.31)$$

$$C_{p,c}^{total\ alm} = C_{p,c}^{fixed\ alm} \cdot P_{p,c}^{Max\ alm} \cdot y_{p,c}^{Necesary\ alm} + \sum_t C_{p,c}^{variable\ alm} \cdot P_{p,c,t}^{alm} \quad \forall p \in P, c \in C \quad (3.32)$$

3.1.13 Aspecto social y su función objetivo

Un aspecto crucial para el modelo y planificación de cadenas de suministro es el aspecto social. Particularmente, la presente formulación considera el aspecto social por medio de una función objetivo relacionada con el índice de desarrollo humano (IDH), así como dos restricciones relacionadas a los sitios de cultivo, con el fin de determinar sitios con potencial de mejorar su IDH e IPB.

Es importante mencionar que la contribución a la mejora del IDH e IPB es dada por la inclusión de sitios en la solución del problema de planificación por lo que la función asociada a la mejora del IDH, la cual está limitada por la selección de sitios; la cual a su vez está ligada a la existencia de transporte entre nodos de la cadena. En este caso, el modelo matemático considera la variable binaria $y_{m,h}^{existence}$ que define la existencia de un sitio de cultivo siempre y cuando haya transporte hacia una biorrefinería. Esta variable nos permite conocer que nodos están interactuando en la cadena de suministro.

Cabe destacar que la variable binaria $y_{m,h}^{existence}$ esta limitada a que exista transporte desde un sitio de cultivo hacia al menos una biorrefinería, por lo que dicha existencia es limitada a que el transporte ocurra independientemente hacia cual o hacia cuantas biorrefinerías. Es decir, si al menos una biorrefinería recibe materia prima desde el sitio de cultivo h , dicho sitio debe existir. En este

aspecto, es necesario representar la existencia de transporte entre sitios de cultivo y biorrefinerías para lo cual es usada la variable binaria $y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans}$.

Como se puede inferir, ambas variables binarias ($y_{m,h}^{existence}$, $y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans}$) deben estar relacionadas. Por un lado, si al menos existe transporte hacia una biorrefinería desde un sitio de cultivo h , al menos una de las variables binarias $y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans}$ debe ser igual a 1, así como la variable binaria $y_{m,h}^{existence}$ también debe ser igual a 1. En caso de que no exista transporte entre sitios de cultivo y biorrefinerías ambas deben ser igual a cero. Esta funcionalidad es presentada por las siguientes Ecuaciones 3.33 y 3.34

$$\sum_f \sum_t y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans} \geq y_{m,h}^{existencia} \quad \forall m \in M, h \in H \quad (3.33)$$

$$y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans} \leq y_{m,h}^{existencia} \quad \forall m \in M, h \in H, f \in F, \quad (3.34)$$

Finalmente, la variable binaria asociada a la existencia de un sitio de cultivo permite formular una función objetivo social para promover sitios con bajo índice de desarrollo humano. Es importante señalar que solo contribuyen al valor de la función objetivo los sitios que deben existir debido a que existen las conexiones de nodos debido al transporte, por tanto, entre mayor sea la función objetivo social, mayores serán los sitios en los que se beneficiara su IDH, como lo representa la Ecuación 3.35.

$$Max\ SocialProfit = \sum_m \sum_h (1 - IDH_h) * y_{m,h}^{existence} \quad (3.35)$$

3.1.14 Aspecto ambiental y su función objetivo

Otro aspecto importante para el modelado y planificación de cadenas de suministro es el aspecto ambiental. Particularmente, la presente formulación considera el aspecto ambiental por medio de una función objetivo relacionada con el CO₂ equivalente generado por el transporte de materia prima y productos entre distintos nodos dentro de la república mexicana. Esto debido a que las tecnológicas de procesamiento dentro de las biorrefinerías son consideradas como tecnologías verdes en su mayoría. Cabe mencionar que uno de los productos generados en las biorrefinerías es la electricidad por lo que el valor de CO₂ equivalente se considera como una reducción de electricidad y por tanto como una reducción de emisiones por la generación de energía renovable.

La función objetivo ambiental es dependiente de las distancias entre cada nodo, las materias primas distribuidas hacia las biorrefinerías, los productos distribuidos hacia los mercados y el factor de emisión equivalente a cada caso de transporte, teniendo en cuenta la naturaleza de las materias primas y los productos, como se presenta en la Ecuación 3.36.

$$Ambiental = \sum_m \sum_h \sum_f \sum_t DM_{h,f} \cdot EM_{m,h,f,t} \cdot M_{m,h,f,t}^{out\ distr} + \sum_p \sum_f \sum_c \sum_t DP_{f,c} \cdot EP_{p,f,c,t} \cdot P_{p,f,c,t}^{out\ distr} \quad (3.36)$$

3.1.15 Función objetivo Económico

La función objetivo económica es la maximización del beneficio neto anual (Profit), esta función viene dada por la sumatoria de los distintos componentes que conforman la parte económica del modelo, es decir, contempla costos por producción, almacenamiento y transporte de materias primas y productos en los distintos nodos origen destino, además de, las ventas de productos en los nodos específicos designados. Por lo que esta función objetivo proporciona un valor neto total de ganancias económicas para los sitios pertenecientes a la cadena de suministro. Como se muestra en la Ecuación 3.37.

$$\begin{aligned} Max\ PROFIT = & \sum_p \sum_c \sum_t C_{p,c,t}^{product} \cdot V_{p,c,t}^{out\ sale} - \sum_m \sum_h \sum_t C_{m,h,t}^{produced} \cdot M_{m,h,t}^{produced} - \\ & \sum_m \sum_h C_{m,h}^{total\ alm} - \sum_m \sum_f C_{m,f}^{total\ alm} - \sum_p \sum_f C_{p,f}^{total\ alm} - \sum_p \sum_c C_{p,c}^{total\ alm} - \\ & \sum_m \sum_h \sum_f \sum_t C_{m,h,f,t}^{transp} \cdot M_{m,h,f,t}^{out\ distr} - \sum_p \sum_f \sum_c \sum_t C_{p,f,c,t}^{transp} \cdot P_{p,f,c,t}^{out\ distr} - \sum_m \sum_p \sum_r \sum_f \sum_t C_{m,p,r,f,t}^{process} \cdot \\ & M_{m,p,r,f,t}^{out\ process} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Además, el modelo cuenta con funciones adicionales como son el beneficio generado en los sitios de cultivo (PROFITH) mostrado en la Ecuación 3.38, el beneficio generado en las plantas de proceso (PROFITF) mostrado en la Ecuación 3.39 y el costo total por almacenamiento en los mercados mostrado en la Ecuación 3.40. Estas funciones objetivo engloban todo el modelo matemático de optimización.

$$\begin{aligned} PROFITH = & \sum_m \sum_h \sum_t V_{m,f,t}^{price} \cdot M_{m,h,t}^{produced} - \sum_m \sum_h \sum_t C_{m,h,t}^{produced} \cdot M_{m,h,t}^{produced} - \\ & \sum_m \sum_h C_{m,h}^{total\ alm} \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned}
 PROFITF = & \sum_p \sum_f \sum_t C_{p,c,t}^{product} \cdot V_{p,c,t}^{out\ sale} - \sum_m \sum_h \sum_t V_{m,f,t}^{price} \cdot M_{m,h,t}^{produced} - \sum_m \sum_f C_{m,f}^{total\ alm} - \\
 & \sum_p \sum_f C_{p,f}^{total\ alm} - \sum_m \sum_h \sum_f \sum_t C_{m,h,f,t}^{transp} \cdot M_{m,h,f,t}^{out\ distr} - \sum_p \sum_f \sum_c \sum_t C_{p,f,c,t}^{transp} \cdot P_{p,f,c,t}^{out\ distr} - \\
 & \sum_m \sum_p \sum_r \sum_f \sum_t C_{m,p,r,f,t}^{process} \cdot M_{m,p,r,f,t}^{out\ process} \quad (3.39)
 \end{aligned}$$

$$ALMCOSTC = \sum_p \sum_c C_{p,c}^{total\ alm} \quad (3.40)$$

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Superestructura para el caso de estudio

La superestructura propuesta para este caso de estudio y modelo matemático se muestra en las Figuras 4.1a y 4.1b, donde se puede observar la relación entre los sitios de cultivos y las biorrefinerías, y posteriormente las relaciones entre las materias primas, plantas de procesamiento (biorrefinerías), rutas de procesos, productos y mercados, considerando las funciones objetivo económica, social y ambiental.

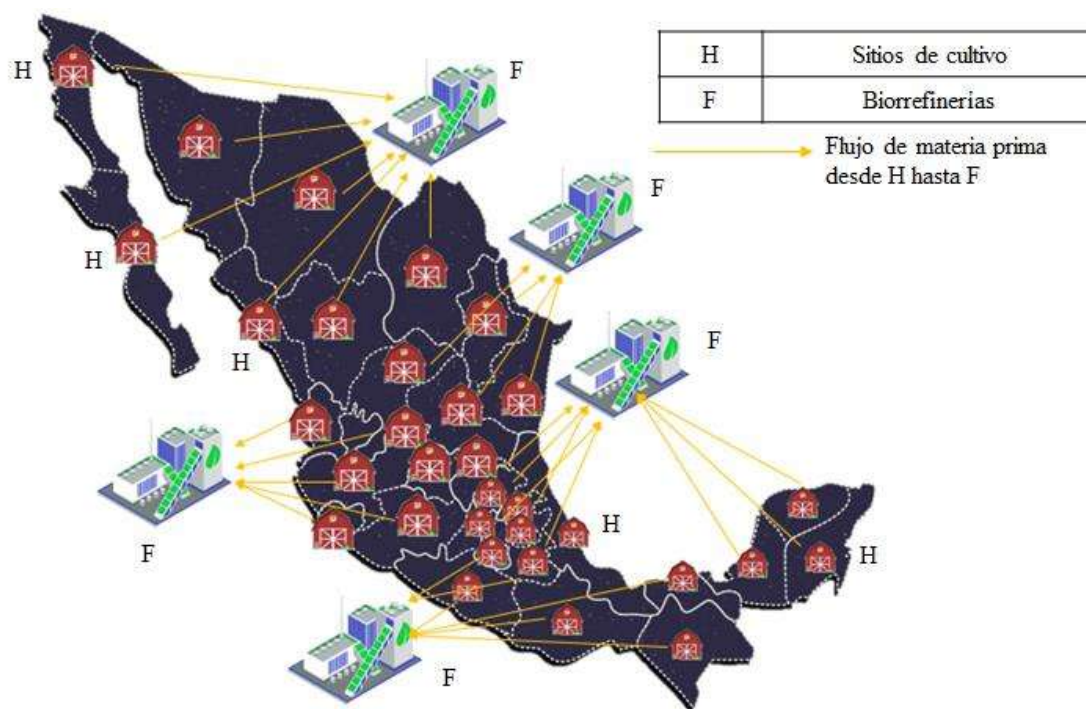


Figura 4.1a Superestructura propuesta para sitios de cultivos y plantas de procesamiento (biorrefinerías).

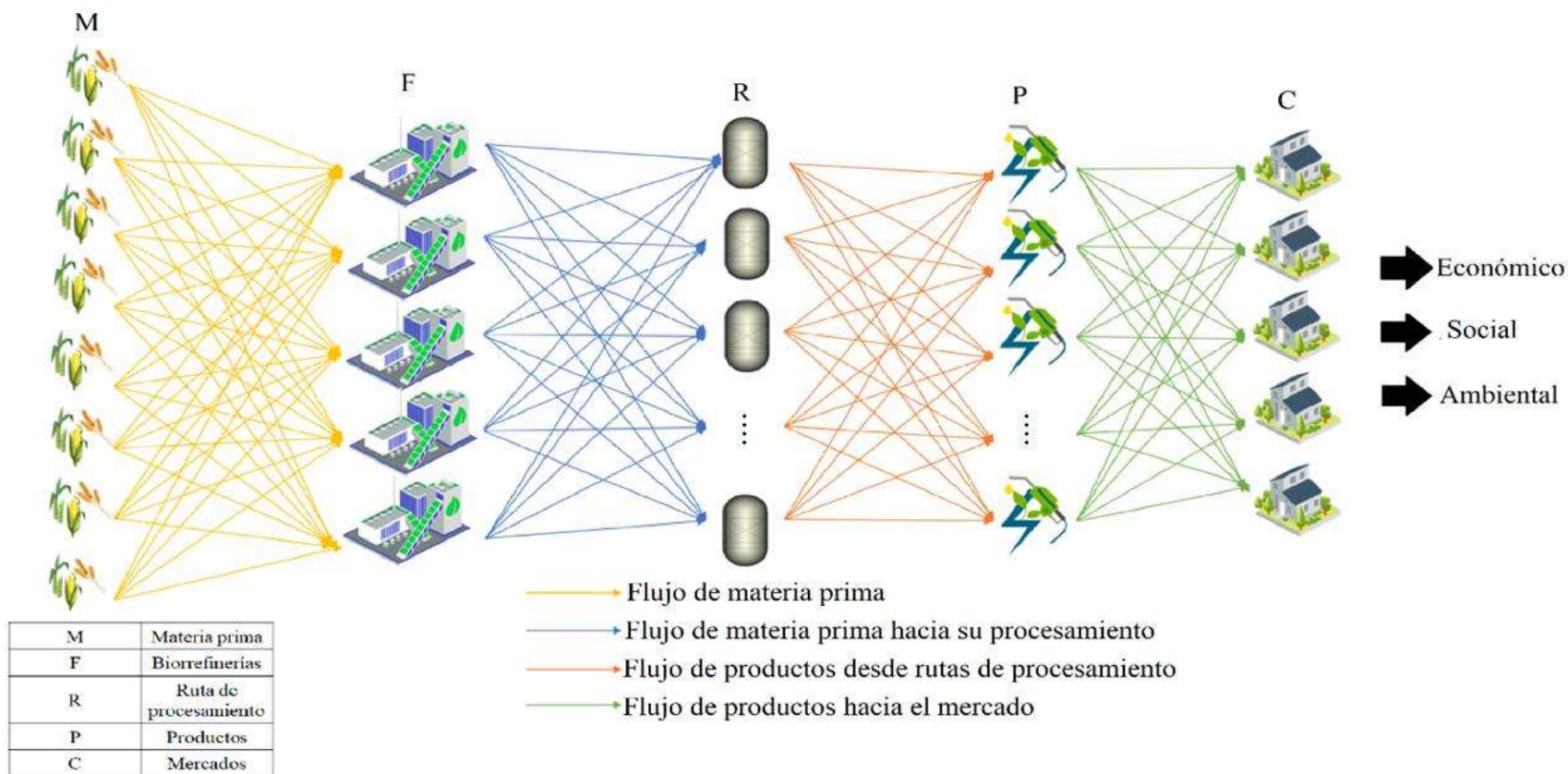


Figura 4.1b Superestructura propuesta cadena de suministro

4.2. Caso de estudio

Se presenta un caso de estudio para mostrar la aplicabilidad de la metodología propuesta. Este caso de estudio corresponde al manejo óptimo de biomasa en las regiones de bajos recursos de México respecto a la ganancia neta anual como objetivo económico y el aumento del IDH como objetivo social, además se considera se contraponen el objetivo económico y el objetivo ambiental que corresponde a la reducción de emisiones del tipo CO₂ equivalente, buscando así que el modelo abarque los tres objetivos de desarrollo sostenible dentro de la cadena de suministro, donde se han considerado todos los estados de la república como sitios de cultivo y el mercado se ha dividido en cinco zonas del país las cuales son centro, noroeste, centro oeste, noreste y sur. Se contemplaron 5 biorrefinerías distribuidas en el país las cuales presentan siete tecnologías de procesamiento que son fermentación ABE, proceso Fischer Tropsch, combustión, gasificación con aire, gasificación con vapor, pretratamiento hidrólisis ácida y fermentación y digestión anaerobia, los datos de factor de conversión para estas tecnologías se muestran en la Tabla 6.1 (del apéndice) estos factores se obtuvieron de Santibañez-Aguilar y col., (2019), Santibañez-Aguilar y col., (2011), González y González (2015), Pressley y col., (2014), Farmanbordar y col., (2018), Lozano y Lozano (2017), y Acosta y Obaya (2005). La cantidad y costos de la biomasa varía para cada estado como se muestra en la Tabla 6.2 y la Tabla 6.3, los datos de estas tablas fueron tomados de (SIAP, 2020). Los datos para los costos de producción se muestran en la Tabla 6.4, los costos de transporte de materias primas y productos se muestran en las Tablas 6.5 y 6.6 cabe mencionar que estos costos contemplan las distancias entre nodos origen-destino, la demanda y precios de cada producto que se generará para cada mercado se muestra en las Tablas 6.7 y 6.8 y sus datos fueron tomados de (CENACE, 2021), (SIE, 2021), (SIENER, 2021) y (Santibañez-Aguilar y col., 2020). Finalmente, en las Tablas 6.9 y 6.10 se muestran el índice de pobreza humano e índice de desarrollo humano calculados para cada uno de los estados del país tomado de (INEGI, 2021).

4.3. Resultados generales

El modelo matemático asociado al caso de estudio es MILP y está constituido por 3,204 variables binarias, 16,165 variables continuas y 21,459 restricciones. La codificación se realizó en el software GAMS (General Algebraic Modeling System) tomando en promedio

0.470s de tiempo del CPU con un procesador i3-1005G1 a 1.20GHz con una memoria RAM de 4.00GB. La solución de los puntos óptimos de la curva Pareto se obtuvo mediante el resolvidor CPLEX para el modelo MILP.

La Figura 4.2 muestra la curva Pareto que considera las dos funciones objetivo (beneficio neto anual y beneficio social), cabe destacar que el beneficio neto anual disminuye al aumentar el beneficio social por lo que el compromiso entre ambos objetivos es presentado. Mientras que la Figura 4.3 muestra la curva Pareto que considera las funciones objetivo (beneficio neto anual y beneficio ambiental), esta curva presenta un comportamiento en el cual el objetivo económico disminuye a la par con el objetivo ambiental es decir a menor beneficio neto anual menores emisiones de CO₂ equivalente.

Tanto para la Figura 4.2 y la Figura 4.3, los puntos que se encuentran en las curvas de Pareto son soluciones óptimas, los puntos que se encuentran debajo de las curvas de Pareto son soluciones subóptimas, mientras que los puntos que se encuentran sobre las curvas de Pareto son soluciones infactibles. A partir de una curva Pareto es posible obtener soluciones que satisfagan de manera óptima las restricciones del caso de estudio; no obstante, para objetivos de análisis e implementación es recomendable seleccionar una solución a partir de éste conjunto de soluciones óptimas.

La selección de una solución representativa puede llevarse a cabo por medio del tomador de decisiones, el cual puede seleccionar una de estas acorde a sus intereses y requisitos específicos. Por otro lado, en caso de requerir un análisis más objetivo, este se puede realizar por medio del análisis de la diferencia de cada solución de Pareto con el punto utópico, dicha diferencia es representada con un porcentaje de satisfacción ya que si la solución tiene una satisfacción del 100% correspondería al punto utópico. El porcentaje de satisfacción está representado por la Ecuación 4.1.

$$\text{Satisfacción} = \frac{\text{valor obtenido} - \text{valor mínimo}}{\text{valor máximo} - \text{valor mínimo}} * 100 \quad (4.1)$$

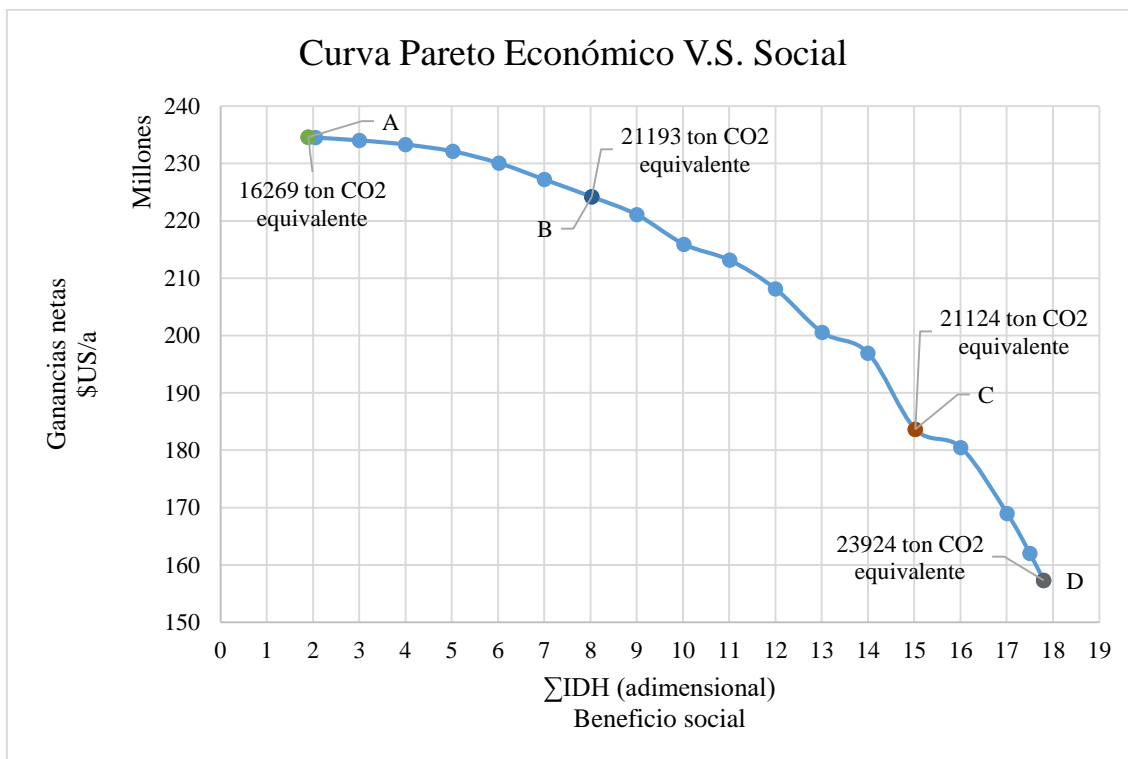


Figura 4.2 Curva Pareto del uso de biomasa para mejoramiento del IDH en las regiones analizadas (enfoque social).

Cada una de las soluciones de la curva de Pareto de la Figura 4.2 corresponde a distintas configuraciones para la cadena de suministro para satisfacer las restricciones del modelo. Cabe mencionar que la ganancia neta anual puede presentar valores superiores e inferiores a cero, sin embargo, la región de interés es aquella en la que se tienen valores de ganancia positiva y por tanto parte de la curva Pareto es omitida en la Figura 4.2.

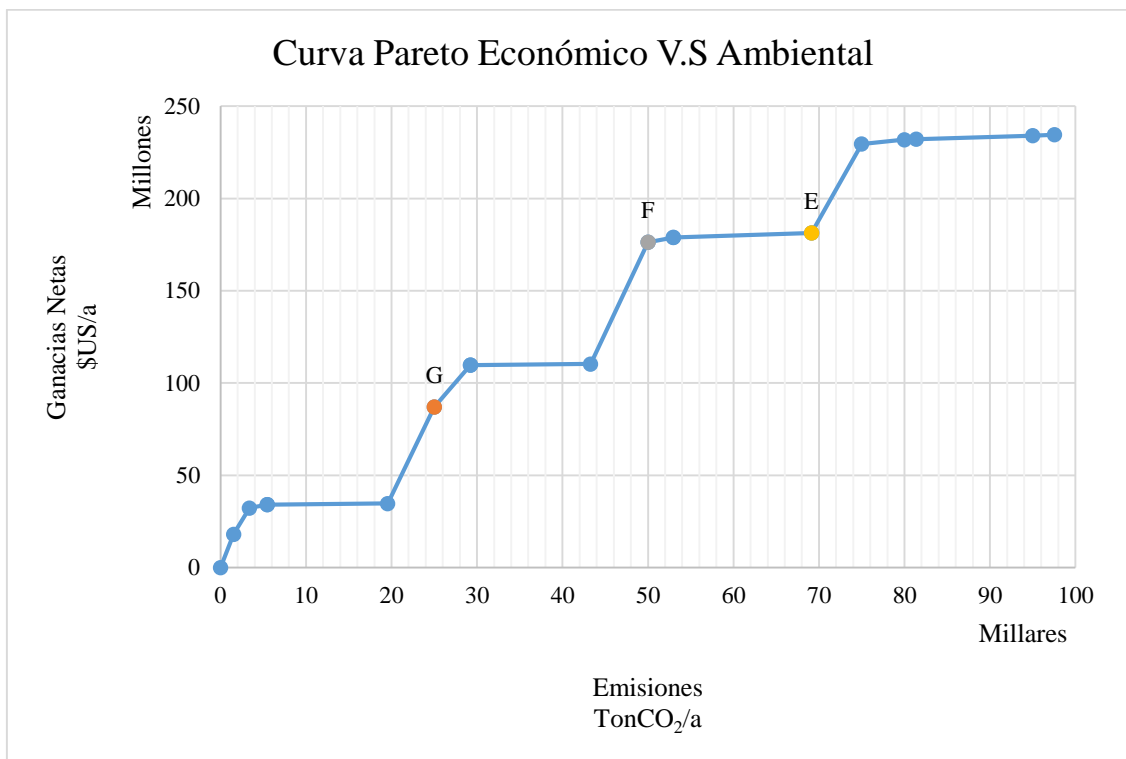


Figura 4.3 Curva Pareto del uso de biomasa para mejoramiento del IDH en las regiones analizadas (enfoque ambiental).

Cada una de las soluciones de la curva Pareto de la Figura 4.3 corresponde a distintas configuraciones para la cadena de suministro para satisfacer las restricciones del modelo. Y como es de esperarse, la ganancia neta anual puede presentar valores superiores e inferiores a cero, sin embargo, la región de interés es aquella en la que se tienen valores de ganancia positiva y por tanto parte de la curva Pareto es omitida en la Figura 4.3.

4.4. Resultados curva Pareto Económico V.S. Social

De la Figura 4.2, diferentes soluciones fueron analizadas y comparadas, estas soluciones obtenidas presentan distinto nivel de satisfacción. El punto óptimo A tiene una ganancia neta económica de 235 millones de dólares por año y beneficia a 8 sitios de cultivo, el punto óptimo B tiene una ganancia neta económica de 224 millones de dólares por año y beneficia a 20 sitios de cultivo, el punto óptimo C tiene una ganancia neta económica de 184 millones de dólares por año y beneficia a 27 sitios de cultivo, finalmente el punto óptimo D tiene una ganancia neta económica de 157 millones de dólares por año y beneficia a 32 sitios

de cultivo. El porcentaje de satisfacción para cada solución es 55%, 70%, 81% y 83% respectivamente.

Cada punto óptimo (A, B, C y D) dentro de la curva de Pareto representa un escenario distinto dentro del caso de estudio, por lo que es importante analizar tres factores dentro de cada escenario; estos factores son la materia prima utilizada para producción (ver Figura 4.4), los productos generados en las biorrefinerías (ver Figura 4.5) y los productos vendidos en el mercado (ver Figura 4.6). Esto con la finalidad de conocer el comportamiento de cada punto óptimo (escenario) dentro de la cadena de suministro.

La Figura 4.4 muestra la materia prima utilizada en producción para cada escenario, el escenario A muestra el uso de 4 materias primas distribuidas en las 5 biorrefinerías para la producción, aunque se puede observar que la biorrefinería 2 presenta el uso de una mayor cantidad de materias primas, las cuales son residuos sólidos orgánicos estatales principalmente, seguido por el rastro de sorgo y de maíz. Además, en este escenario también se observa el uso de rastrojo de maíz y lodos biológicos residuales en la biorrefinería 1, mientras que las refinerías 3, 4, 5 sólo utilizaron una sola materia prima.

El escenario B muestra el uso de 5 materias primas distribuidas en las 5 biorrefinerías para la producción, como se puede observar para este escenario tanto la biorrefinería 1 como la biorrefinería 2 utilizan 3 materias primas teniendo en común sólo el rastrojo de maíz, se puede observar que el bagazo de caña de azúcar solo se utiliza en la biorrefinería 1, mientras el resto de las biorrefinerías presentan un comportamiento similar al del escenario A, con excepción de la biorrefinería 5 donde se utilizaron residuos sólidos orgánicos estatales además del lodo biológico residual.

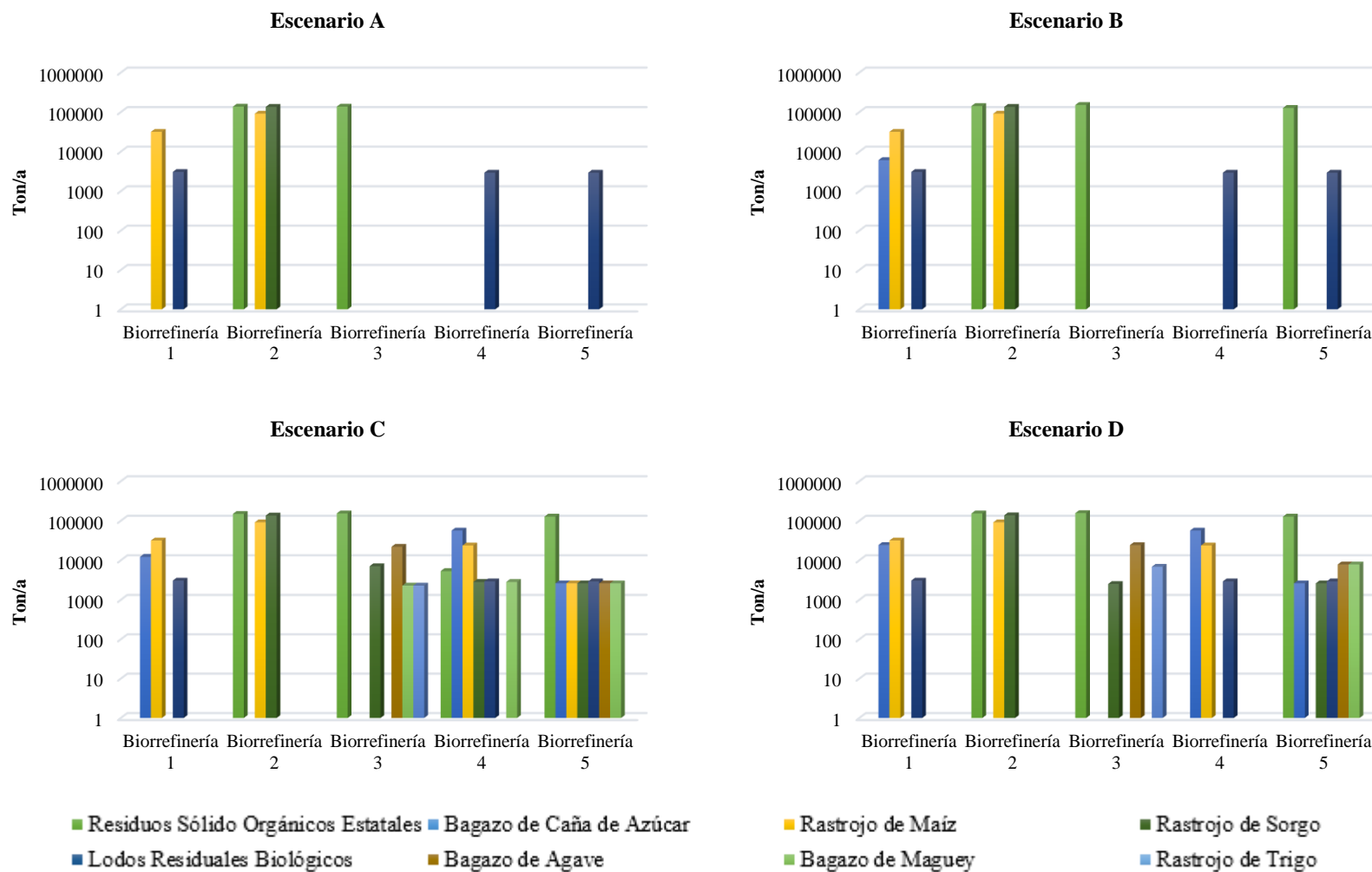


Figura 4.4 Biomasa usada para producción en las biorrefinerías (escala logarítmica).

El escenario C de la Figura 4.4 muestra el uso de 8 materias primas distribuidas entre las 5 biorrefinerías para la producción, para este escenario las materias fueron más variadas dentro de las biorrefinerías no obstante se puede observar que la biorrefinería 5 presenta el uso de 7 materias primas, de las cuales destacan principalmente los residuos sólidos orgánicos estatales, cabe mencionar que la única materia prima que no se utilizó en esta biorrefinería fue el rastrojo de trigo; además como se puede observar la biorrefinería 4 no utilizo bagazo de agave ni rastrojo de trigo, pero destaca en el uso de bagazo de caña de azúcar para la producción, es importante mencionar que la biorrefinería 3 es la única en utilizar rastrojo de trigo pero sus dos principales materias primas utilizadas en producción son los residuos sólidos orgánicos estatales y el bagazo de agave; en cuanto a las biorrefinerías 1 y 2 presentan un comportamiento similar al descrito en el escenario B.

Respecto al escenario D, este presenta el uso de 8 materias primas distribuidas entre las 5 biorrefinerías para la producción, para este escenario la biorrefinería 5 sólo utiliza 6 de las 8 materias primas disponibles siendo los residuos sólidos orgánicos estatales su principal materia prima pero presenta un aumento notorio en el uso de bagazo de agave y maguey; para este escenario la biorrefinería 4 solo utiliza 3 materias primas destacando nuevamente por el uso de bagazo de caña de azúcar, mientras que las biorrefinería 3 sólo utiliza 4 materias primas, con un ligero aumento en el uso de rastrojo de trigo y bagazo de agave pero una disminución en el uso de rastrojo de sorgo; referente a las biorrefinerías 1 y 2 estas presentan un comportamiento similar al escenario B.

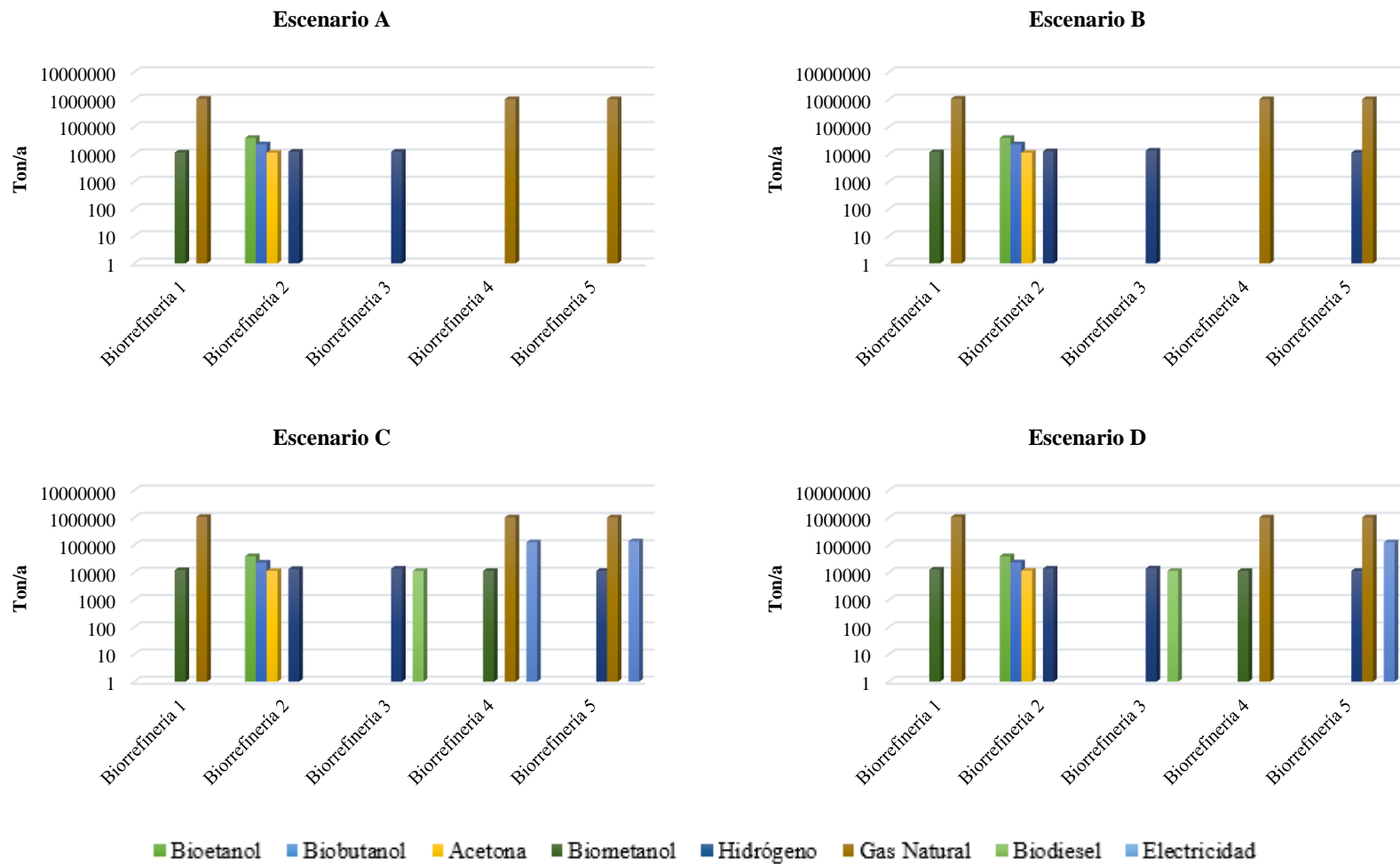


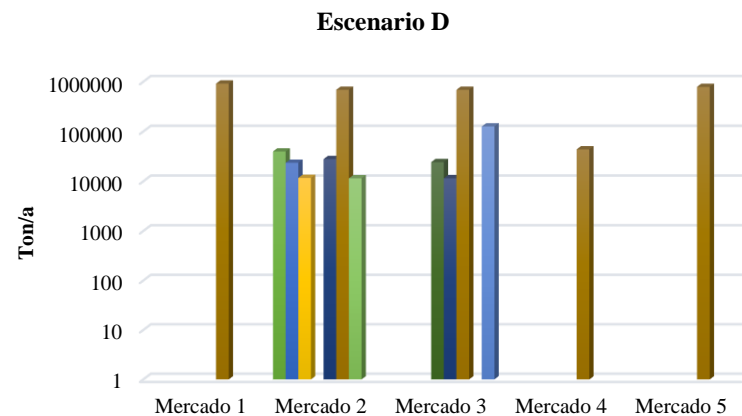
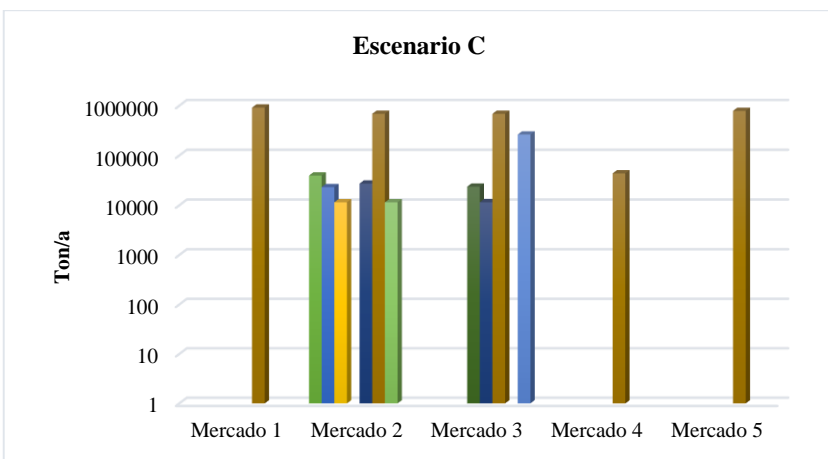
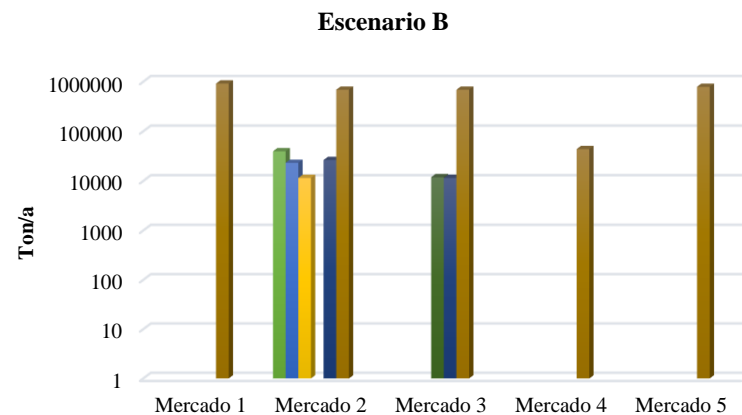
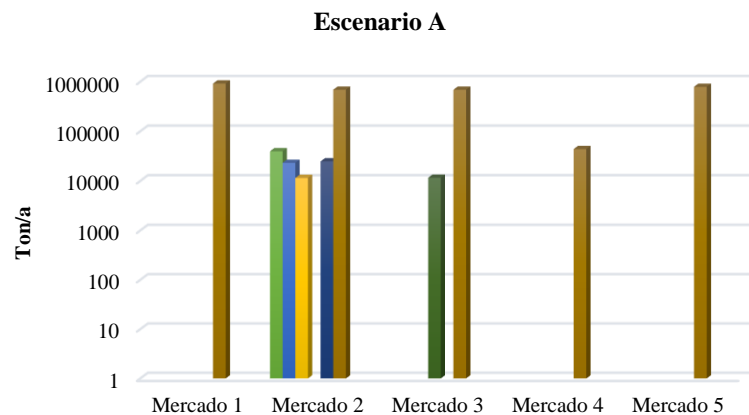
Figura 4.5 Toneladas de producto generado por año en biorrefinerías (escala logarítmica).

La Figura 4.5 muestra la cantidad de producto producido en cada una de las biorrefinerías para cada escenario. En el escenario A se puede observar que el principal producto generado en las biorrefinerías 1,4 y 5 es el gas natural procedente de los lodos biológicos residuales por la biodigestión como tecnología de proceso, a diferencia de la biorrefinería 4 y 5 en la biorrefinería 1 también se produjo biometanol mediante gasificación por vapor como técnica de procesamiento, además se puede notar que en la biorrefinería 2 se obtienen 4 productos los cuales son bioetanol, biobutanol y acetona procedente del rastrojo de sorgo mediante la fermentación ABE como tecnología de proceso, cabe mencionar que el bioetanol se produce principalmente mediante la fermentación común e hidrogeno gas a partir de gasificación por vapor utilizando residuos solido orgánicos estatales, este producto como se puede observar también se produjo en la biorrefinería 3.

El escenario B presenta una gran similitud en cuanto a la producción de productos con el escenario A, sin embargo, se puede observar que en la biorrefinería 5 se produjo hidrogeno gas además del gas natural.

En cuanto al escenario C en este se puede observar que se produjeron 8 productos distribuidos entre las 5 biorrefinerías, como se puede observar el principal producto generado en las biorrefinerías 1, 4 y 5 es el gas natural, también se observa en este escenario la generación de electricidad en las biorrefinerías 4 y 5 a partir de combustión y gasificación con aire como técnicas de procesamiento; además se puede observar la producción de biodiesel a partir del proceso Fischer-Tropsch en la biorrefinería 3; al igual que en los escenarios A y B se obtuvo bioetanol por la ruta de fermentación común principalmente y bioetanol, biobutanol y acetona por la fermentación ABE en la biorrefinería 2, biometanol en las biorrefinerías 1 y 4, así como hidrogeno gas en las biorrefinerías 2, 3 y 5.

Con relación al escenario D se observa que presenta una gran similitud en cuanto a la producción de productos con el escenario C, sin embargo, se puede observar que solo se produjo electricidad en la biorrefinería 5, cabe mencionar que este escenario presenta un ligero aumento en las cantidades de productos generados como son bioetanol, biobutanol, acetona, biometanol e hidrogeno gas con respecto al escenario C.



■ Bioetanol ■ Biobutanol ■ Acetona ■ Biometanol ■ Hidrógeno ■ Gas Natural ■ Biodiesel ■ Electricidad

Figura 4.6 Productos vendidos por año en los mercados (escala logarítmica).

La Figura 4.6 muestra las ventas de productos en los mercados. El escenario A muestra que el gas natural fue el producto más vendido en todos los 5 mercados, también se puede observar que el mercado 2 es el mercado con la mayor venta de productos mientras que el mercado 3 solo presenta la venta de biometanol y gas natural. En el escenario B se observa un aumento en venta de productos en el mercado 3 al adicionarse la venta de hidrogeno gas. Para el caso del escenario C se observa la venta de dos nuevos productos el biodiesel para el mercado 2 y electricidad en el mercado 3. En relación con el escenario D se observan una similitud con el escenario C, con la diferencia de un aumento en la venta de bioetanol, biobutanol, acetona, biometanol e hidrogeno gas.

Finalmente, la Figura 4.7 y la Figura 4.8 presentan una comparación entre los cuatro escenarios seleccionados de la Figura 4.2 respecto a las ganancias económicas por ventas y las ganancias netas económicas. En este contexto, se observa que en los escenarios A y B los productos resultantes en la cadena de suministro fueron bioetanol, biobutanol, acetona, biometanol, gas natural e hidrógeno gas, mientras que en los escenarios C y D se comercializaron dos productos más los cuales son biodiesel y electricidad. También podemos notar que las mayores ganancias económicas por ventas de productos fueron en el escenario D, seguido por los escenarios C, B y finalmente el escenario A.

La Figura 4.8 muestra la ganancia económica neta en cada escenario y los costos de la cadena de suministro. Es importante mencionar que, aunque el escenario D tuvo mayores ingresos económicos por ventas en los mercados, presentó una ganancia neta económica menor, esto debido a que dentro de la cadena de suministro se utilizó una mayor cantidad de materias primas en las biorrefinerías, lo que implicó mayores costos en materias primas y costo de transportes; por otro lado, este escenario tuvo el mayor beneficio social al contribuir al beneficio de 32 sitios. La solución del escenario A es el caso opuesto ya que en la cadena de suministro se tuvo una menor cantidad de materias primas en las biorrefinerías y con esto se minimizaron los costos de materias y transportes, permitiendo el aumento de la ganancia neta económica; sin embargo, esto repercutió en el beneficio social ya que este escenario solo contribuyó al beneficio de 8 sitios. En las Figura 6.1 del apéndice B se pueden ver las materias primas generadas en cada uno de los sitios de cultivo mismas que fueron transportadas hacia

las biorrefinerías de cada una de las cadenas de suministro para los cuatro escenarios analizados de este apartado.

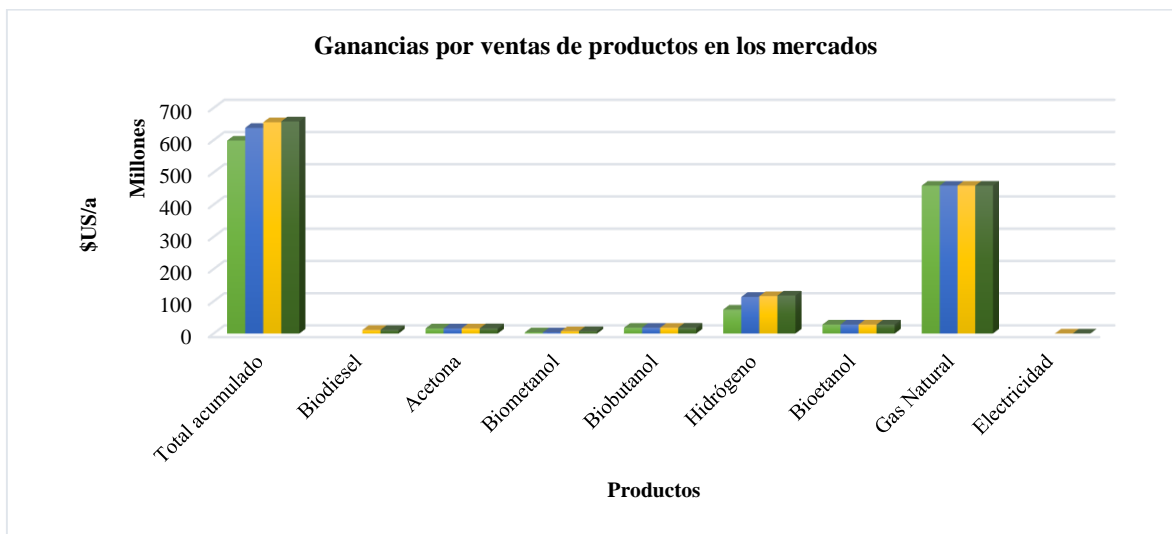


Figura 4.7 Beneficio económico por ventas de productos en el mercado.

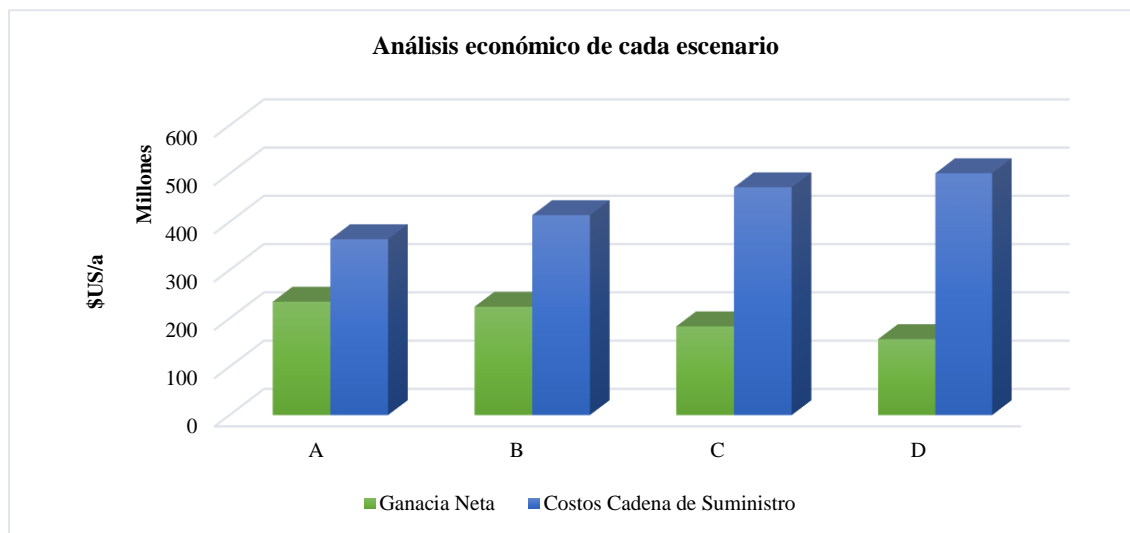


Figura 4.8 Análisis económico para cada escenario

Para evaluar el impacto social de una solución resultante, se realizó el análisis del objetivo social para los cuatro escenarios seleccionados de la curva Pareto (A, B, C y D). Este análisis se realizó por medio del cálculo del producto interno bruto (PIB) de cada sitio de la cadena de suministro, considerando que la ganancia neta contribuye de manera uniforme a los sitios seleccionados (ver Figura 6.1 del apéndice B). Este cálculo permite obtener el efecto que tiene la implementación de una configuración de la cadena de

suministro sobre el índice de desarrollo humano. Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran el incremento porcentual del PIB y del IDH respectivamente.

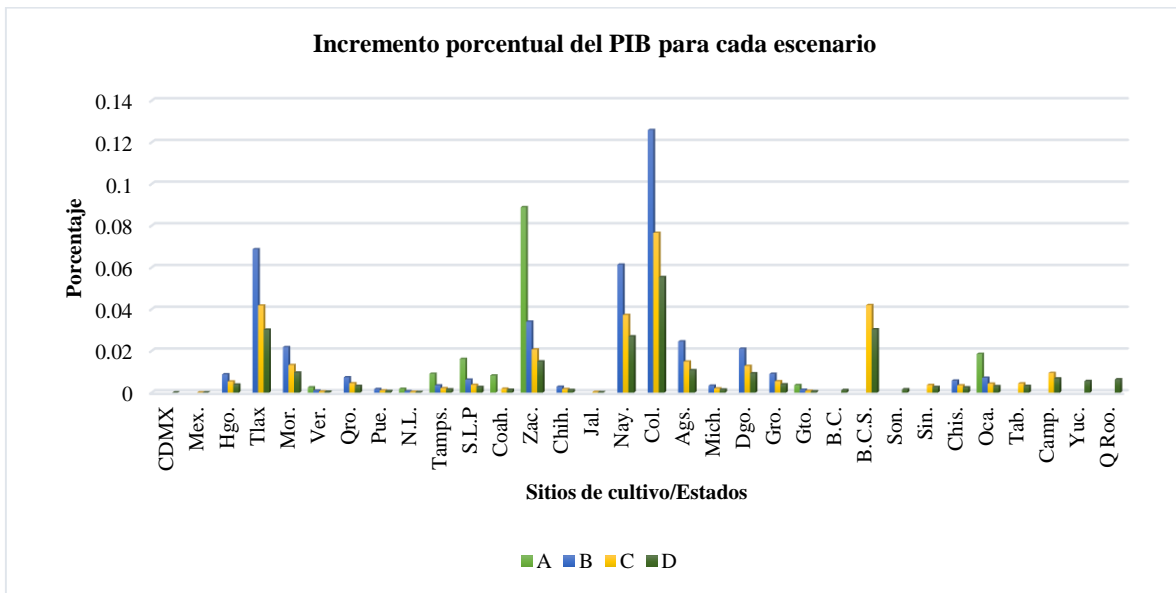


Figura 4.9 Incremento del PIB por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro.

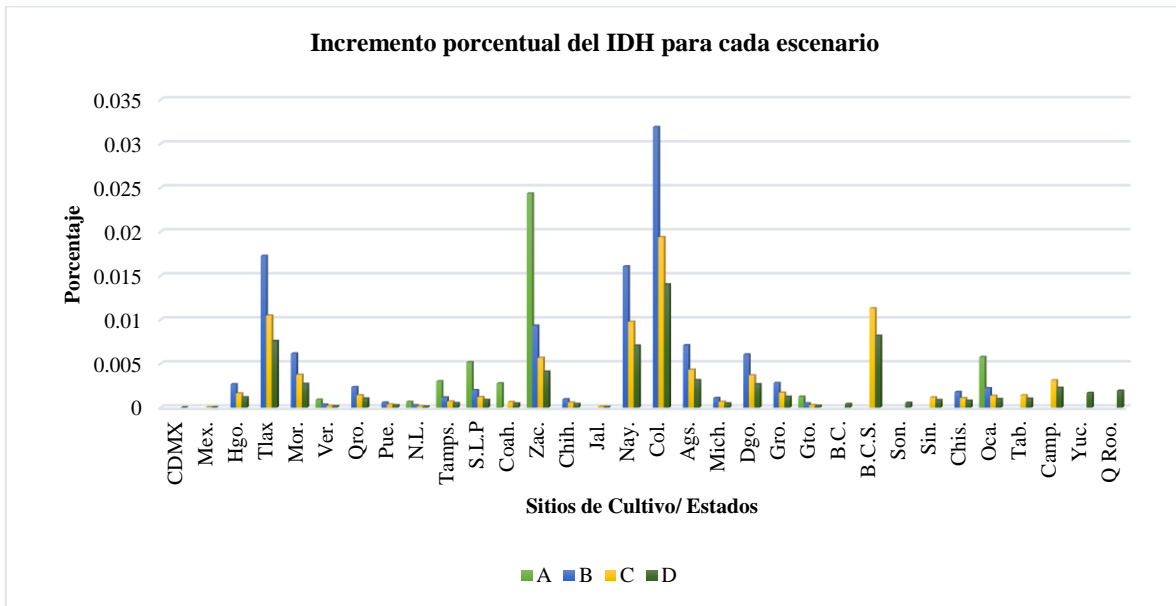


Figura 4.10 Incremento del IDH por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro.

Aunque el aumento en el IDH humano es muy similar en los escenarios analizados de la curva Pareto, es posible notar que el escenario A tiene el incremento más significativo en los sitios de cultivo que se consideran con un bajo IDH.

El incremento de IDH del escenario B beneficia a 20 sitios de cultivo, mientras que el escenario C beneficia a 27 sitios de cultivo y finalmente el escenario D beneficia a 32 sitios de cultivo.

4.5. Resultados curva Pareto Económico V.S Ambiental

De la Figura 4.3, las soluciones obtenidas presentan distinto nivel de satisfacción, éstas fueron analizadas y comparadas. El punto óptimo E tiene una ganancia neta económica de 181 millones de dólares por año, con un impacto ambiental de 69,128 Ton de CO₂ equivalente y beneficia a 7 sitios de cultivo, el punto óptimo F tiene una ganancia neta económica de 176 millones de dólares por año, con un impacto ambiental de 50,000 Ton de CO₂ equivalente y beneficia a 6 sitios de cultivo y finalmente el punto óptimo G tiene una ganancia neta económica de 87 millones de dólares por año, con un impacto ambiental de 25,000 Ton de CO₂ equivalente y beneficia a 4 sitios de cultivo. El porcentaje de satisfacción para cada solución es 53.22%, 61.95% y 55.73% respectivamente.

En estos tres escenarios (E, F y G) se analizaron los tres principales factores correspondiente a la materia prima utilizada para producción (ver Figura 4.11), los productos generados en las biorrefinerías (ver Figura 4.12) y los productos vendidos en el mercado (ver Figura 4.13). Esto con la finalidad de conocer el comportamiento de cada punto óptimo (escenario) dentro de la cadena de suministro.

La Figura 4.11 muestra la materia prima utilizada en las biorrefinerías para producción en cada escenario, en el escenario E se puede observar que se utilizaron 4 materias primas distribuidas en solo 4 biorrefinerías, la biorrefinería 2 presentó una mayor cantidad de materias primas utilizadas las cuales fueron residuos sólidos orgánicos, rastrojo de sorgo y rastrojo de maíz, mientras que la biorrefinería 1 sólo utilizó rastrojo de maíz y lodos biológicos residuales, para el caso de la biorrefinería 3 y 4 estas sólo utilizaron una materia prima residuos sólidos orgánicos y lodos biológicos residuales, respectivamente.

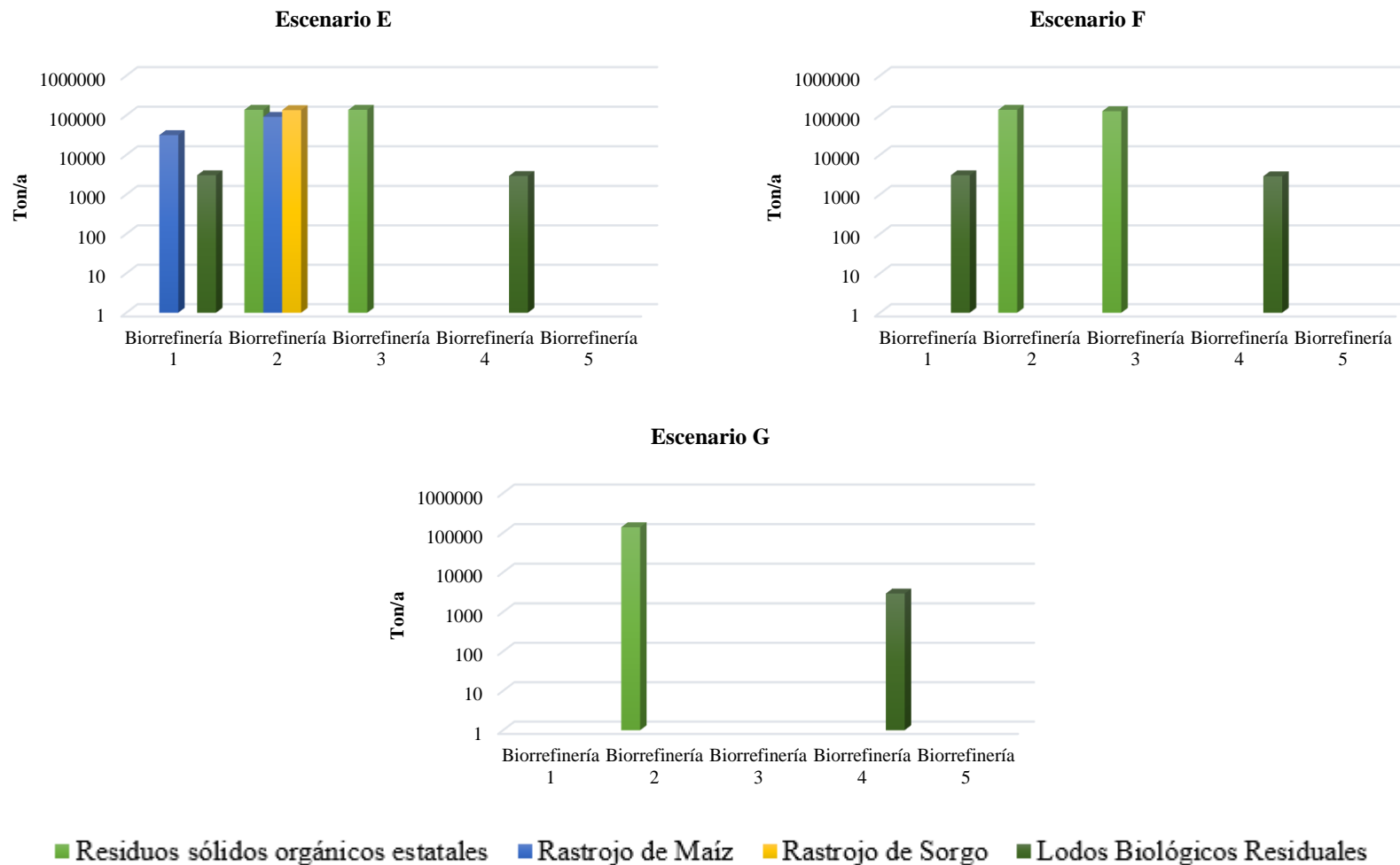


Figura 4.11 Biomasa usada para producción en las biorrefinerías (escala logarítmica)

En el escenario F se puede observar el uso de sólo dos materias primas, las cuales fueron residuos sólidos orgánicos y lodos biológicos residuales distribuidos en las biorrefinerías 2 y 3 y las biorrefinerías 1 y 4, respectivamente.

Del escenario G se puede notar una similitud con el escenario F en el uso de materias primas ya que se utilizan residuos sólidos orgánicos y lodos biológicos residuales, con la excepción de las cantidades de materias primas y las biorrefinerías dentro de la cadena de suministro.

Cabe recalcar como se observa en la Figura 4.3 existe un escalón entre el escenario E y F, esta situación claramente cobra sentido debido al uso de una mayor cantidad de materias primas distribuidas en las biorrefinerías.

La Figura 4.12 muestra los productos generados en las biorrefinerías para cada escenario. En el escenario E se puede observar que el principal producto generado fue el gas natural a partir de la digestión anaerobia de los lodos residuales, este proceso se llevó a cabo en las biorrefinerías 1 y 4, además se observa que en la biorrefinería 3 se produjo hidrogeno a partir de la gasificación con vapor de los residuos sólidos orgánicos, para este escenario la biorrefinería 2 es la que presenta una cantidad mayor de productos generados, estos son Hidrógeno, bioetanol, butano y acetona por la fermentación ABE del rastrojo de sorgo, además de bioetanol por fermentación común del rastrojo de maíz, cabe mencionar que esta fue la ruta de la que se obtuvo una mayor cantidad de producto. También se puede notar que en la biorrefinería 1 se generó biometanol a partir de la gasificación con vapor del rastrojo de maíz. Como se puede notar este es el escenario con la mayor cantidad de tecnologías de proceso utilizadas.

El escenario F presenta sólo dos productos generados los cuales se distribuyeron en 4 biorrefinerías, el principal producto fue el gas natural que se produjo en las biorrefinerías 1 y 4 mediante digestión anaerobia, mientras que en las biorrefinerías 2 y 3 se produjo solamente hidrogeno por gasificación con vapor.

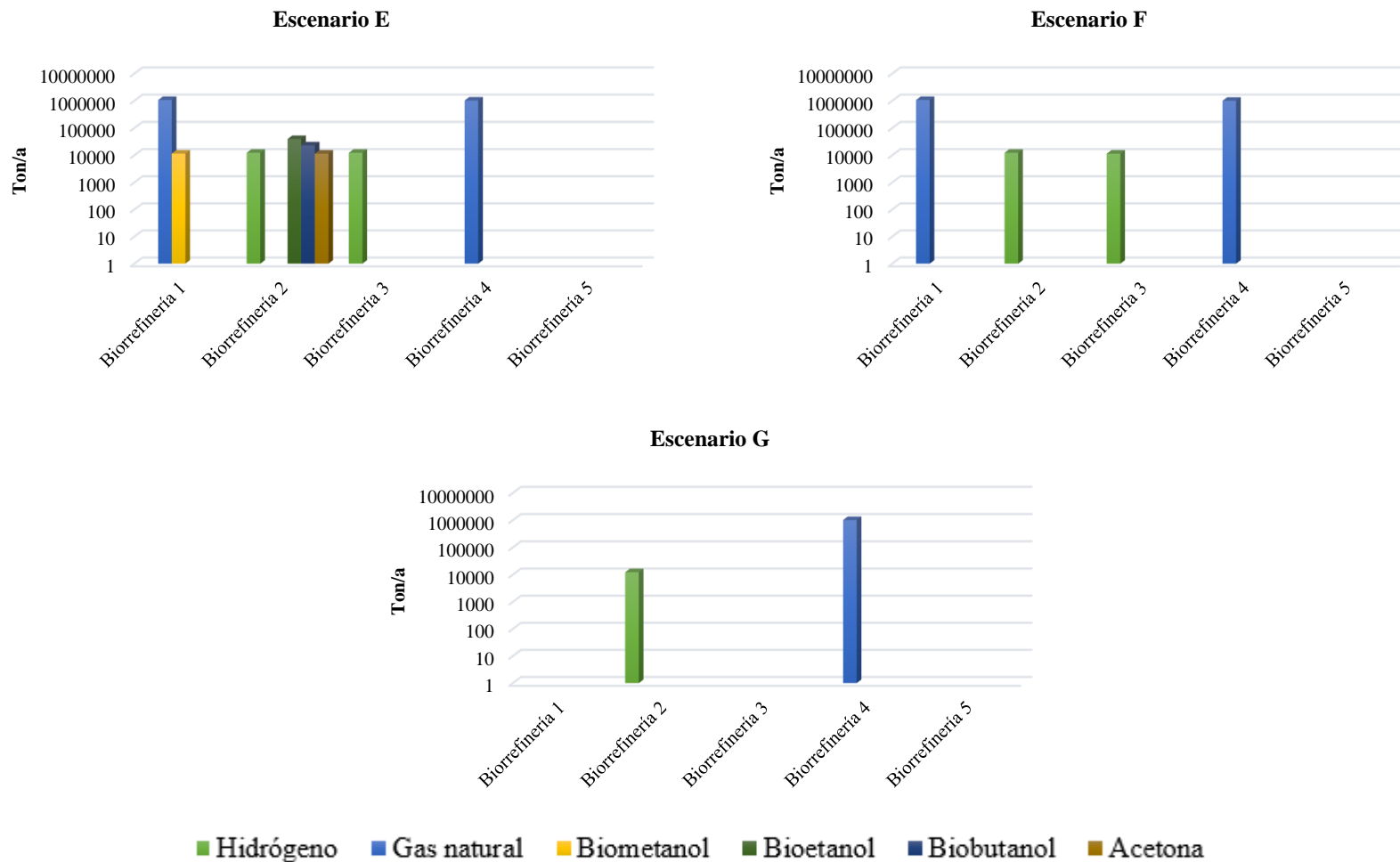


Figura 4.12 Toneladas de Producto generado por año en las biorrefinerías (escala logarítmica).

El escenario G es similar al escenario F en cuanto a los productos generados, con la diferencia de que solo se contemplan dos biorrefinerías en la cadena de suministro, y como se puede notar en la biorrefinería 2 se produjo hidrogeno por gasificación con vapor y en la biorrefinería 4 se produjo gas natural por digestión anaerobia.

Al comparar estos escenarios se hace evidente el aumento de las cantidades de productos producidos y así como el aumento en la instalación de biorrefinerías dentro de la cadena de suministro a consecuencia de la medición del impacto ambiental.

La Figura 4.13 presenta las ventas de productos en los mercados para cada escenario. Del escenario E se puede observar la venta de gas natural en los cinco mercados, lo que convierte a este producto en el principal dentro de la demanda de la cadena de suministro, no obstante, se presentó la venta de otros productos como son bioetanol, butanol, acetona e hidrogeno en el mercado 2 y en el mercado 3 la venta de biometanol. Del escenario F se observa nuevamente la venta de gas natural en los cinco mercados disponibles dentro de la cadena de suministro, además de la venta de hidrogeno en el mercado 2 aunque en una cantidad menor en comparación con el escenario E. El escenario G presenta la venta de productos en sólo 4 mercados dentro de la cadena de suministro siendo el gas natural el principal producto vendido en los mercados 1, 2, 3 y 5, además igual que en el escenario F se muestra la venta de hidrogeno en el mercado 2 aunque en una menor cantidad.

Finalmente, las Figura 4.14 y la Figura 4.15 presentan una comparación entre los tres escenarios seleccionados de la Figura 4.3 respecto a las ganancias económicas por ventas y las ganancias netas económicas. En este contexto, en la Figura 4.14 se observa que en el escenario E los productos resultantes en la cadena de suministro fueron bioetanol, butanol, acetona, biometanol, gas natural e hidrógeno gas, mientras que en los escenarios F y G se comercializaron sólo dos productos gas natural e hidrógeno. También, podemos notar que las mayores ganancias económicas por ventas de productos fueron en el escenario E, seguido por el escenario F y finalmente el escenario G.

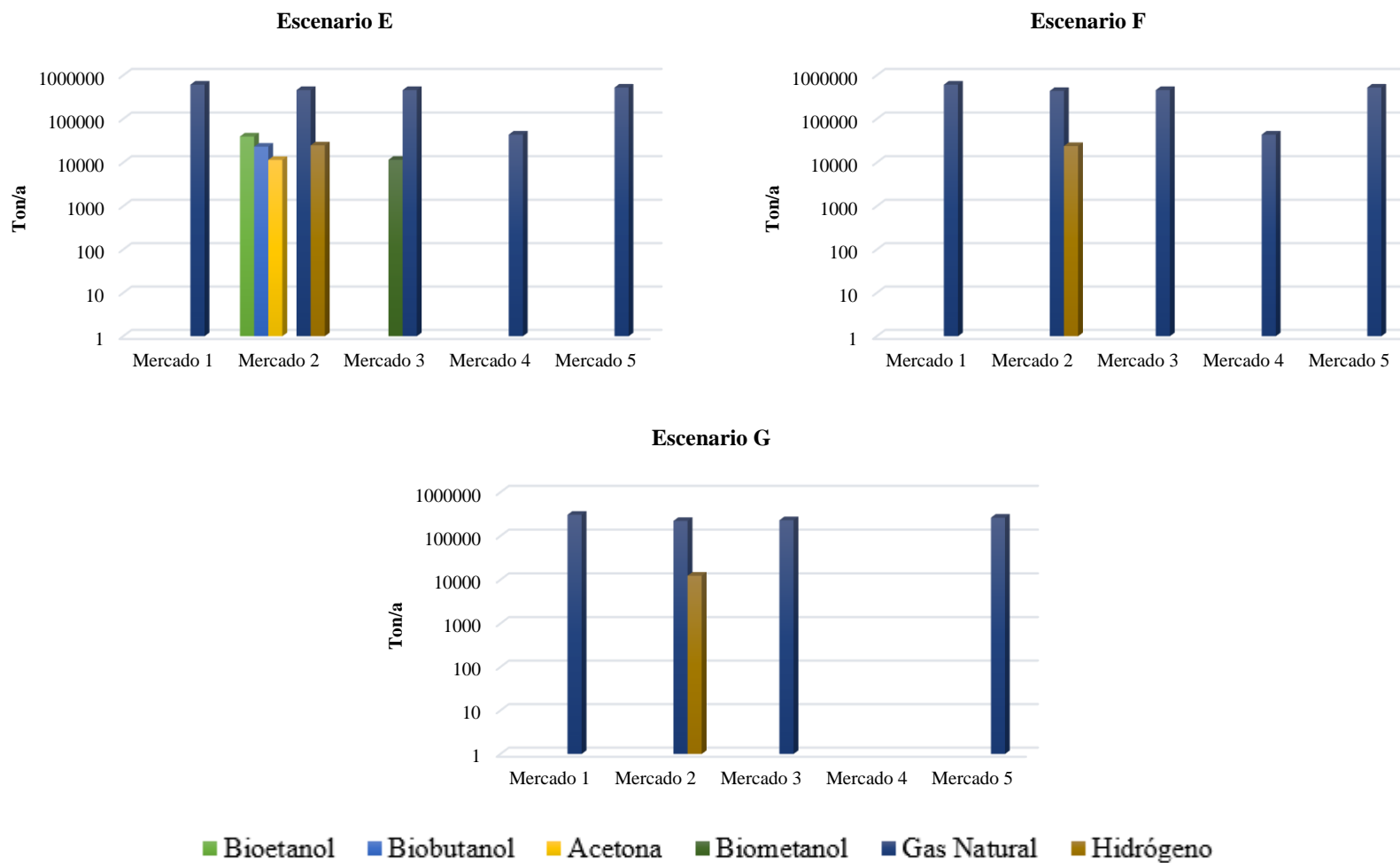


Figura 4.13 Productos vendidos por año en el mercado (escala logarítmica).

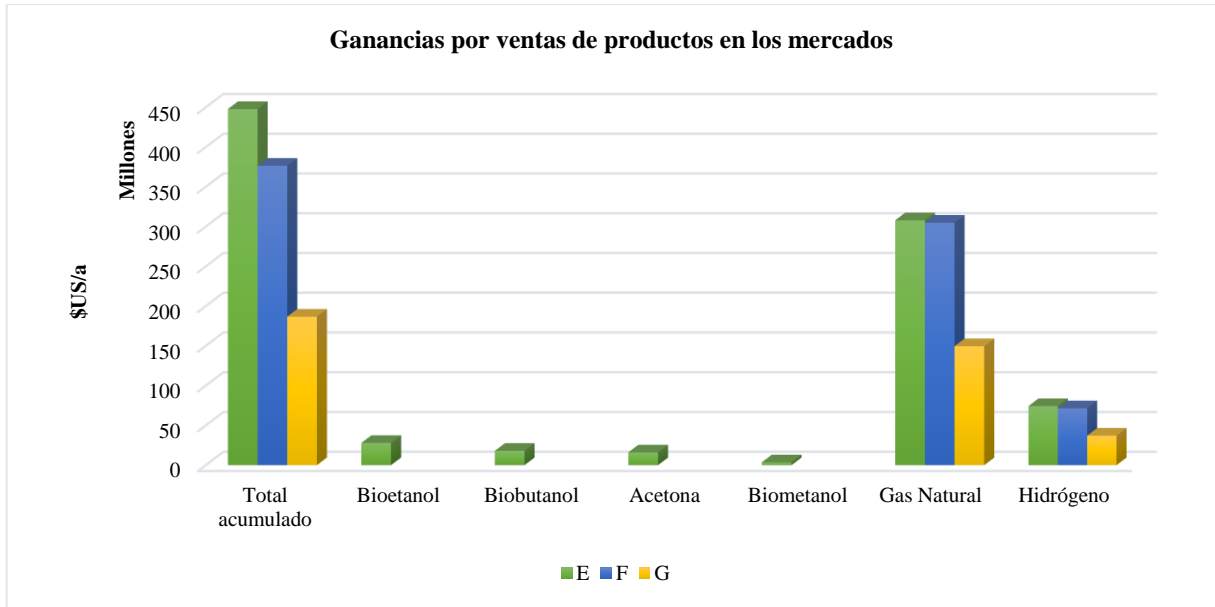


Figura 4.14 Beneficio económico por ventas de productos.

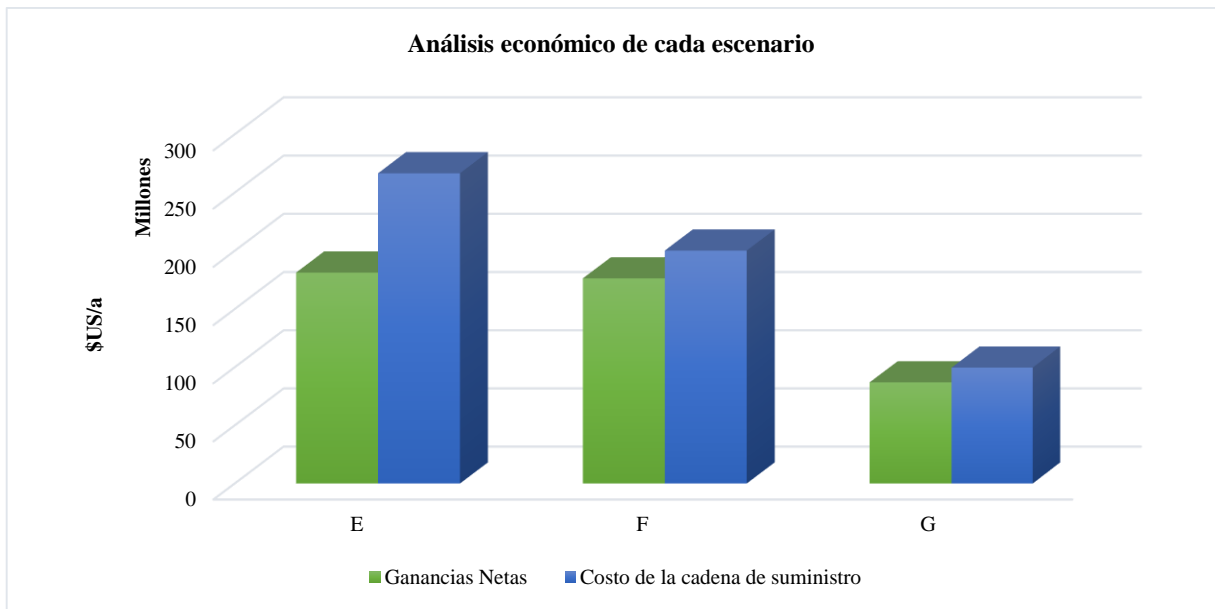


Figura 4.15 Análisis económico para cada escenario

La Figura 4.15 muestra la ganancia económica neta en cada escenario y los costos de la cadena de suministro. Es importante mencionar que, aunque el escenario E tuvo mayores ingresos económicos por ventas en los mercados, presentó una ganancia neta económica menor, esto debido a que dentro de la cadena de suministro se utilizó una mayor cantidad de materias primas en las biorrefinerías, lo que implicó mayores costos en materias primas, costo de transportes y producción

tanto de materias primas como de productos; por otro lado, este escenario tuvo el mayor beneficio social al contribuir al beneficio de 7 sitios de cultivo. Este mismo comportamiento se presenta en el escenario F que beneficio a 6 sitios de cultivo y el escenario G que beneficio a solo 4 sitios de cultivo. Este comportamiento es debido al impacto ambiental que presentan cada uno de los escenarios como se puede observar en la Figura 4.16 donde el mayor impacto ambiental se presenta en el escenario E debido las materias primas, productos, transportes y tecnologías de proceso dentro de la cadena de suministro, a diferencia del escenario G que presenta un menor impacto ambiental y por lo tanto una disminución en materias primas, productos, transportes y el uso de tecnologías de proceso; esto nos muestra que conforme el impacto ambiental aumenta las ganancias económicas y el beneficio social también aumentara, es decir el impacto ambiental es directamente proporcional a las ganancias económicas y al beneficio social. En las Figura 6.2 del apéndice B se pueden ver las materias primas generadas en cada uno de los sitios de cultivo mismas que fueron transportadas hacia las biorrefinerías de cada una de las cadenas de suministro para los tres escenarios analizados.

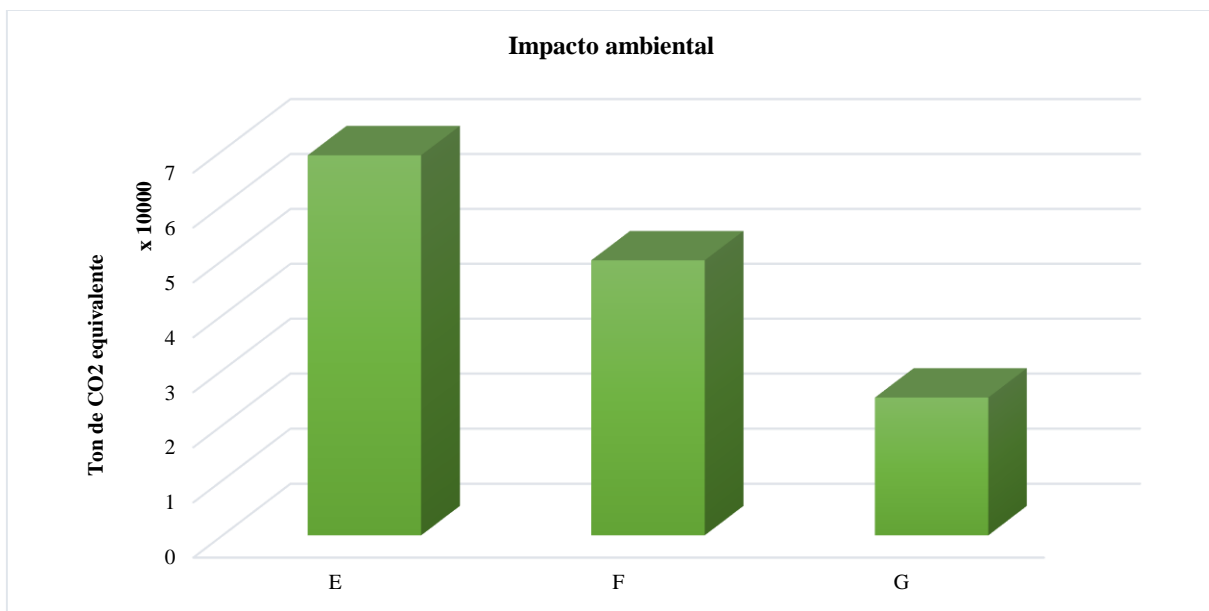


Figura 4.16 Comparativa del impacto ambiental en cada escenario

Para evaluar el impacto social se realizó el análisis del objetivo social para los cuatro escenarios seleccionados de la curva Pareto (E, F y G). Este análisis se realizó por medio del cálculo del producto interno bruto (PIB) de cada sitio de la cadena de suministro, considerando que la ganancia neta contribuye de manera uniforme a los sitios seleccionados (ver Figura 6.2 del

apéndice B). Este cálculo permite obtener el efecto que tiene la implementación de una configuración de la cadena de suministro sobre el índice de desarrollo humano. Las Figuras 4.17 y 4.18 muestran el incremento porcentual del PIB y del IDH respectivamente.

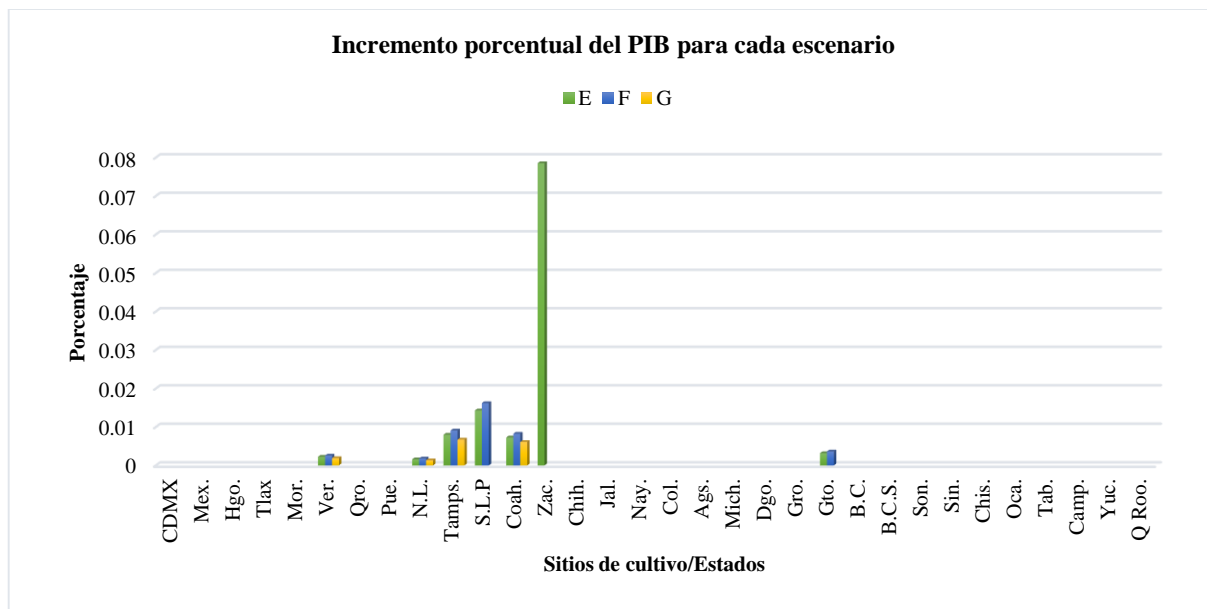


Figura 4.17 Incremento del PIB por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro (escenarios E al G).

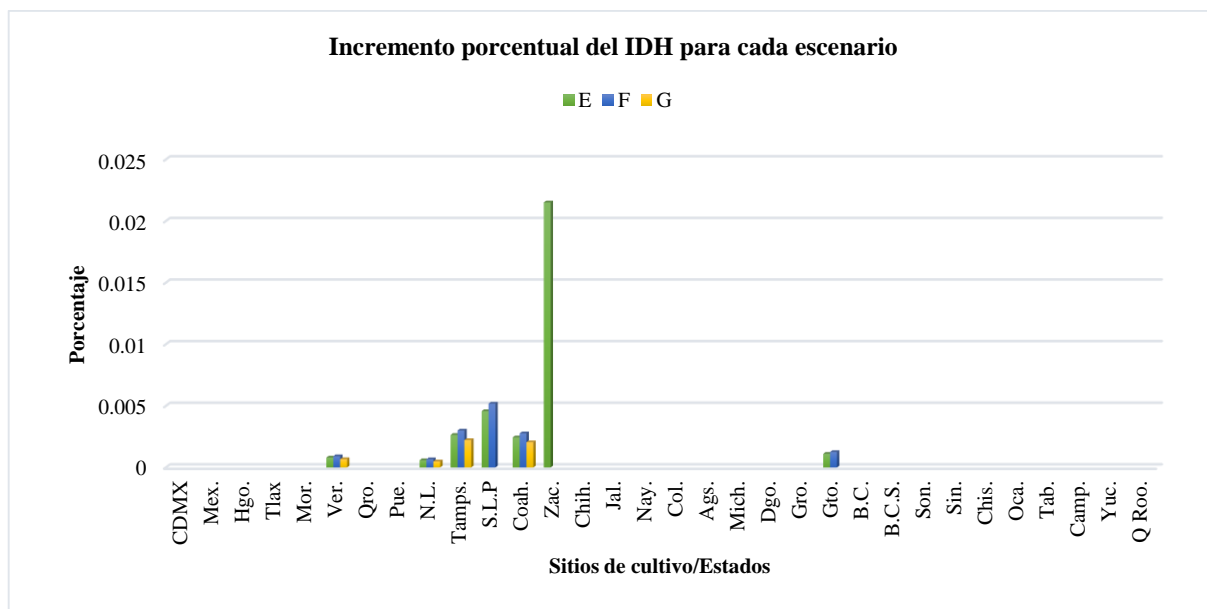


Figura 4.18 Incremento del PIB por el uso de biomasa para el beneficio de sitios de cultivo pertenecientes a la cadena de suministro (escenarios E al G).

Aunque el aumento en el IDH humano es muy similar en los escenarios analizados de la curva Pareto, es posible notar que el escenario E tiene el incremento más significativo en los sitios de cultivo que se consideran con un bajo IDH. Cabe mencionar que el incremento del IDH que se observa en la Figura 4.18 contempla parámetros como son el índice de esperanza de vida y el índice de educación, y que el producto interno bruto calculado a partir de las ganancias netas es per cápita por lo que se contempla a la población de cada sitio de cultivo para así asegurar que el aumento sea lo más real posible, como consecuencia de esto en la figura se puede notar que Zacatecas es el sitio de cultivo con un aumento porcentual mayor.

El incremento de IDH del escenario F beneficia a 7 sitios de cultivo y San Luis Potosí es el sitio de cultivo con mayor aumento de IDH, mientras que el escenario G beneficia a 4 sitios de cultivo y Tamaulipas es el sitio de cultivo con mayor aumento de IDH.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La presente tesis ha presentado una metodología para la planificación óptima de una cadena de suministro basada en biomasa residual agrícola, residuos orgánicos estatales y lodos biológicos residuales, para la mejora del índice de desarrollo humano de los estados de la república mexicana considerados dentro de la cadena de suministro, con la localización estratégica de biorrefinerías en el país. El enfoque propuesto se ha aplicado a un caso de estudio para México, en los que se utilizaron datos determinísticos de producción, demanda, generación de productos, disponibilidad de biomasa residual, etc., además de datos de IDH y todo lo que conlleva a su evolución en el país. Se combinó una estrategia basada en el nivel actual de cada estado respecto a sus recursos y ubicación geográfica y una formulación óptima de la cadena de suministro considerando el beneficio neto como objetivo económico, el beneficio por aumento de PIB y de IDH como objetivo social y la disminución de emisiones de CO₂ equivalente como objetivo ambiental. El enfoque propuesto permite que el número de instalaciones en la cadena de suministro sea el adecuado para favorecer el desarrollo social particular de cada estado considerado con un bajo nivel de IDH, y a la vez generar el mejor valor para el objetivo económico y el objetivo ambiental.

De la comparativa de los escenarios A, B, C y D, se puede concluir que las estructuras de las cadenas de suministro resultantes no son soluciones obvias, es decir las materias primas más económicas son los residuos sólidos orgánicos y los lodos biológicos residuales sin embargo estos últimos no entran dentro de las principales materias primas en cuanto a su uso en las biorrefinerías. Por ejemplo, en el análisis de estos escenarios las soluciones resultantes muestran que la principal materia prima fueron los residuos sólidos orgánicos estatales con un promedio de 400.000 Ton/a, mientras que el rastrojo de maíz ocupa el segundo lugar con aproximadamente 140.000 Ton/a, lo que permite saber que el modelo cumple su función ya que los residuos sólidos orgánicos son la materia prima más barata.

Otro aspecto para considerar en estos escenarios es que, el precio de los productos no es un factor determinante para elegir la producción de determinado producto en las cadenas de suministro. Por ejemplo, el hidrogeno gas es el producto de mayor precio con \$US 3000/Ton, a pesar de ello su generación en las cadenas de suministro no fue ampliamente considerada a diferencia del bioetanol y el gas natural que fueron los dos principales productos generados en las

cadena de suministro con precios de \$US977/Ton y \$US147/Ton, respectivamente. Respeto a esto, podría afirmarse que el costo de fabricación juega un papel importante ya que para la producción de toneladas por año de bioetanol, gas natural o hidrógeno gas, el costo indica que el costo de fabricación del bioetanol es menor que el del gas natural y mucho menor que el costo de fabricación del hidrógeno gas.

Del análisis social de estos escenarios se puede concluir que el beneficio social está directamente ligado al uso de materias primas disponibles en cada sitio de cultivo así como de los productos generados, es decir en los escenarios en los que participen en la cadena de suministro más sitios de cultivo habrá un menor aumento de su índice de desarrollo humano esto debido a que las ganancias netas son repartidas equitativamente entre todos los sitios de cultivo participantes, por lo que se podría decir que a menor cantidad de sitios de cultivo dentro de la cadena de suministro mayor aumento de índice de desarrollo humano habrá en estos sitios. Además, es importante mencionar que esta ganancia neta es repartida de forma per cápita es decir toma en cuenta la población existente dentro de cada sitio de cultivo esto para tener un resultado lo más real posible.

De la comparativa de los escenarios E, F y G se puede observar que los cambios escalonados presentados entre cada solución indican el uso de nuevas materias primas, nuevas tecnologías de procesamiento, la generación de nuevos productos, esto conlleva a un aumento de emisiones de CO₂ dentro de la cadena de suministro y por lo tanto un aumento económico en las ganancias netas, a su vez estos aumentos también permiten beneficiar a más sitios de cultivo aumentando su índice de desarrollo humano. Cabe mencionar que el modelo considera de forma estratégica aquellos sitios de cultivo que presenten la menor cantidad de emisiones de CO₂ dentro de la cadena de suministro, considerando los transportes de materias primas y productos.

De estos escenarios en cuanto al uso de materias primas, generación de producto y beneficio social de los sitios de cultivo en la cadena de suministro se puede concluir que conforme las soluciones se acerquen más hacia valores bajos de ganancias netas y emisiones de CO₂ el uso de materias primas, generación de productos y beneficio hacia sitios de cultivo será menor, por ejemplo, la solución del escenario E presenta una mayor cantidad de materias primas como son el rastrojo de maíz y de sorgo, además de la generación de productos como bioetanol, biobutanol, biometanol y acetona, y por ende considera más sitios de cultivo dentro de la cadena de suministro

en comparación con los otros dos escenarios (F y G) que sólo utilizan dos materias primas y generan dos productos, esto nos indica que el modelo cumple con su función, en cuanto a los tres objetivos de desarrollo sostenible. Cabe mencionar que a diferencia de los escenarios A, B, C y D en los escenarios E, F y G se observa que el beneficio social por aumento del índice de desarrollo humano es mejor para aquellas cadenas de suministro que tienen una mayor cantidad de sitios de cultivo participantes esto debido a que al involucrar más materias primas y una mayor generación de productos las ganancias netas repartidas de forma equitativa se ven mayormente beneficiadas.

Recomendaciones

A futuro se recomienda:

- Robustecer la formulación del modelo matemático multiobjetivo (ambiental, social y económico) considerando nuevas métricas más eficientes de evaluación para los tres objetivos, así como la codificación del modelo en un software, enfocado en nuevos casos de estudio.
- Considerar en el objetivo social, otros aspectos como la generación de empleos generados por las biorrefinerías o nuevas métricas de evaluación de beneficio social, así como los nexos agua-energía, o criterios de seguridad social relacionados con el Eco-indicador 99 u otros indicadores.
- Considerar el objetivo ambiental en la formulación matemática que podría abordarse a través de un enfoque relacionado con el Eco-indicador 99, medición de huella ecológica y huella hídrica.
- Implementar el método Epsilon-Constraint y obtener las curvas de Pareto que considere los tres objetivos contrapuestos: Económico vs. social, Económico vs. Ambiental y Ambiental vs. Social para la toma de la mejor alternativa de optimización.

APÉNDICES

Apéndice A

Tablas de parámetros

La Tabla A.1 presenta el factor de conversión de relación másica que relaciona una tonelada de materia prima (se cual sea) que mediante una ruta de proceso generará una tonelada de producto (fuese el que fuese) en cada biorrefinería.

La Tabla A.2 presenta la disponibilidad de materia prima para cada proveedor de biomasa y tipo de biomasa, esta disponibilidad de biomasa corresponde a la máxima cantidad de biomasa que será colectada y procesada.

La Tabla A.3 presenta el costo que presentan los sitios de cultivo para la generación de las materias primas.

La Tabla A.4 presenta los costos de producción de cada bioproceso es decir de cada ruta de procesamiento para generar una tonelada de producto.

La Tabla A.5 se muestran los costos de transporte de los productos que van de las biorrefinerías hacia los mercados.

En la Tabla A.6 se presentan los costos de transporte de materias primas que van de los sitios de cultivo hacia las biorrefinerías.

La Tabla A.7 presenta la demanda del producto en el mercado es importante mencionar que la producción está limitada por la disponibilidad de materia prima y la capacidad de proceso de cada biorrefinería.

La Tabla A.8 indica el precio de venta de los productos en el mercado.

Mientras que las Tabla A.9 presenta los datos para el índice de pobreza humana nacional y la Tabla A.10 presenta los datos actuales de índice de desarrollo humano en los que se encuentran los estados del país y que serán asignados también dentro del código de optimización para el factor social.

Tabla A.1 Relación másica entre la materia prima (biomasa) y el producto generadoⁱ. Adaptado de (Santibañez-Aguilar y col., 2019), (Santibañez-Aguilar y col., 2011), (González & González, 2015), (Zhenh y col., 2018), (Farmanbordar y col., 2018), (Carmona-Garcia y col., 2021), (Castellanos y col., 2014), (Pressley y col., 2014).

Materia prima	Proceso	Relación másica (ton/ton), (GJ/ton)	Producto
Residuos sólidos orgánicos estatales	Fermentación ABE	0.0208	Etanol
	Fermentación ABE	0.0839	Butanol
	Fermentación ABE	0.0366	Acetona
	Combustión	1.9584 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	2.466 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con vapor	0.036	Monóxido de carbono
	Gasificación con vapor	0.09	Hidrogeno
	Fischer Tropsh	0.057	Biodiesel
Rastrojo de maíz	Fermentación ABE	0.0145	Etanol
	Fermentación ABE	0.2366	Butanol
	Fermentación ABE	0.0466	Acetona
	Combustión	16 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	55.5 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	0.049302	Metanol
	Fischer Tropsh	0.3407	Biodiesel
	Pretratamiento hidrolisis acida y fermentación	0.381697	Etanol
Bagazo de caña de azúcar	Fermentación ABE	0.007101	Etanol
	Fermentación ABE	0.07693	Butanol
	Fermentación ABE	0.05135	Acetona
	Combustión	16 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	108 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	0.049302	Metanol
	Fischer Tropsh	0.045995	Biodiesel
	Pretratamiento hidrolisis acida y fermentación	0.0592	Etanol
Bagazo de Agave	Fermentación ABE	0.106	Butanol
	Fermentación ABE	0.121	Acetona
	Fermentación ABE	0.01	Etanol
	Combustión	36.78 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	2.26 ⁱ	Electricidad
	Fischer Tropsh	0.3407	Biodiesel

ⁱ Indica unidades de GJ/ton.

**Tabla A.1 Relación másica entre la materia prima (biomasa) y el producto generado
(Continuación)ⁱ.**

Materia prima	Proceso	Relación másica (ton/ton), (GJ/ton)	Producto
Rastrojo de Sorgo	Fermentación ABE	0.0347	Etanol
	Fermentación ABE	0.1708	Butanol
	Fermentación ABE	0.0847	Acetona
	Combustión	16 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	85 ⁱ	Electricidad
	Fischer Tropsh	0.3407	Biodiesel
	Pretratamiento hidrolisis acida y fermentación	0.0553	Etanol
Bagazo de Maguey	Fermentación ABE	0.106	Butanol
	Fermentación ABE	0.121	Acetona
	Fermentación ABE	0.01	Etanol
	Combustión	36.78 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	2.26 ⁱ	Electricidad
	Fischer Tropsh	0.3407	Biodiesel
Rastrojo de trigo	Fermentación ABE	0.0347	Etanol
	Fermentación ABE	0.1708	Butanol
	Fermentación ABE	0.0847	Acetona
	Combustión	16 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	60 ⁱ	Electricidad
	Gasificación con aire	0.1314	Metanol
	Fischer Tropsh	0.3407	Biodiesel
	Pretratamiento hidrolisis acida y fermentación	0.2723	Etanol
Lodos biológicos residuales	Digestión anaerobia	350	Gas natural

ⁱ Indica unidades de GJ/ton.

Tabla A.2 Disponibilidad de biomasa en los sitios de cultivo (SIAP, 2020).

Nombre	Materia prima	Residuos sólidos orgánicos estatales (ton/año)	Rastrojo de maíz (ton/año)	Bagazo de caña de azúcar (ton/año)	Bagazo de agave (ton/año)	Rastrojo de sorgo (ton/año)	Bagazo de maguey (ton/año)	Rastrojo de trigo (ton/año)	Lodos biológicos residuales (ton/año)
Sitios de cultivo	ID	1	2	3	4	5	6	7	8
Aguascalientes	1	167,333	1,104,517			16,950			82,157,203
Baja California	2	549,233	40,809		31	201,477			445,373,342
Baja California Sur	3	186,149	336			7,803			184,683,650
Campeche	4	128,272	299	984,622					2,250,497,159
Coahuila	5	443,197	947,402			622,846		1,315	877,038,802
Colima	6	136,367	23,860	1,202,475		11,791			1,595,174,847
Chiapas	7	524,970		3,239,984		4,680			27,788,471,972
Chihuahua	8	673,455	788,214			202,246		7,835	1,487,710,123
CDMX	9	2,598,927	1,427		12,731				6,276,608
Durango	10	233,057	1,942,154		1,354	423,763		2,379	2,039,579,487
Guanajuato	11	767,975	427,791		148,211	18,190	41		598,370,626
Guerrero	12	398,812	12,226		22,581	195,265	26		3,140,357,902
Hidalgo	13	357,631	137,424				46,840	162	1,116,572,883
Jalisco	14	1,379,927	5,484,119	8,003,734	706,524	304,332			2,384,764,021
Estado de México	15	2,059,172	1,103,261	13,493	12,731	5,534	1,692		211,810,923
Michoacán	16	605,082		1,378,922	33,501	178,497			809,000,622
Morelos	17	261,767		2,190,641	113	13,497			2,343,106,617
Nayarit	18	305,930	264,237	2,253,364	53,423	25,948			953,684,551
Nuevo León	19	876,839				46,294			675,169,852
Oaxaca	20	367,595	20,124	3,890,992	93,378	6,224		898	8,290,129,333
Puebla	21	685,149	314,192	1,830,260	14,028		4,126		1,763,412,351
Querétaro	22	336,248	754,211			6,474			330,014,510
Quintana Roo	23	497,961	5,750	1,862,108					1,220,297,817
San Luis Potosí	24	331,979	183,446	4,397,348		14,716	278		1,592,195,476
Sinaloa	25	557,861		391,015	13,921	617,766			1,326,434,546
Sonora	26	426,034	4,274			282,884		3,532	1,053,806,576
Tabasco	27	317,422		2,324,964					4,826,363,447
Tamaulipas	28	552,294		3,141,533	8,200	16,839			1,321,209,945
Tlaxcala	29	196,661	250,635				15,000		140,406,944
Veracruz	30	980,139	36,943	21,788,889		27,479	591		7,813,661,387
Yucatán	31	246,666	313			400			1,061,898,693
Zacatecas	32	195,732	1,721,884		8,988	33,312		124	591,963,915

Tabla A.3 Costo de biomasa (materia prima). Adaptado de (SIAP, 2020).

Nombre	Materia prima	Residuos sólidos orgánicos estatales \$USD/ton	Rastrojo de maíz \$USD/ton	Bagazo de caña de azúcar \$USD/ton	Bagazo de agave \$USD/ton	Rastrojo de sorgo \$USD/ton	Bagazo de maguey \$USD/ton	Rastrojo de trigo \$USD/ton	Lodos biológicos residuales \$USD/ton
Sitios de cultivo	ID	1	2	3	4	5	6	7	8
Aguascalientes	1	0	35.96	0	0	37.67	0	0	0
Baja California	2	0	31.93	0	30.07	24.09	0	0	0
Baja California Sur	3	0	50.91	0	0	46.77	0	0	0
Campeche	4	0	32.14	40.76	0	0	0	0	0
Coahuila	5	0	41.62	0	0	34.25	0	41.68	0
Colima	6	0	29.63	38.63	0	29.01	0	0	0
Chiapas	7	0	0	41.28	0	26.18	0	0	0
Chihuahua	8	0	33.69	0	0	21.71	0	139.60	0
CDMX	9	0	51.75	0	0	0	0	0	0
Durango	10	0	37.21	0	17.89	35.90	0	24.93	0
Guanajuato	11	0	23.86	0	44.45	22.25	18.40	0	0
Guerrero	12	0	48.99	0	13.94	39.03	9.09	0	0
Hidalgo	13	0	22.37	0	0	0	14.45	28.84	0
Jalisco	14	0	34.02	43.71	53.67	35.38	0	0	0
Estado de México	15	0	24.45	44.94	8.49	35.43	10.07	0	0
Michoacán	16	0	0	38.68	15.23	20.15	0	0	0
Morelos	17	0	0	45.21	24.02	26.07	0	0	0
Nayarit	18	0	30.16	47.54	38.06	33.09	0	0	0
Nuevo León	19	0	0	0	0	20.16	0	0	0
Oaxaca	20	0	24.38	36.39	8.33	25.28	0	33.29	0
Puebla	21	0	35.08	38.45	4.99	0	11.97	0	0
Querétaro	22	0	35.56	0	0	36.68	0	0	0
Quintana Roo	23	0	36.35	37.98	0	0	0	0	0
San Luis Potosí	24	0	30.56	40.99	0	30.42	3.25	0	0
Sinaloa	25	0	0	31.89	38.86	26.00	0	0	0
Sonora	26	0	35.23	0	0	40.66	0	35.40	0
Tabasco	27	0	0	45.14	0	0	0	0	0
Tamaulipas	28	0	0	44.16	23.37	44.46	0	0	0
Tlaxcala	29	0	18.79	0	0	0	8.00	0	0
Veracruz	30	0	44.93	38.28	0	40.06	13.93	0	0
Yucatán	31	0	56.50	0	0	48.71	0	0	0
Zacatecas	32	0	36.82	0	38.60	34.05	0	36.35	0

Tabla A.4 Costos de producciónⁱ. Adaptado de (Carmona-Garcia y col., 2021), (Qureshi y Blaschek, 2001), (Snehesh y col., 2017), (Yao y col., 2017), (AlNouss y col., 2020), (Masera y col., 2011).

Proceso	Costo \$USD/ton	Producto
Fermentación ABE	633	Etanol
Fermentación ABE	633	Butanol
Fermentación ABE	633	Acetona
Combustión	577 ⁱ	Electricidad
Gasificación con aire	622 ⁱ	Electricidad
Gasificación con aire	622	Metanol
Gasificación con vapor	774	Monóxido de carbono
Gasificación con vapor	774	Hidrogeno
Fischer Tropsch	8592	Biodiesel
Pretratamiento hidrolisis acida y fermentación	451 (promedio)	Etanol
Digestión anaerobia	210	Gas natural

Tabla A.5 Costos de transporte de productos. Adaptado de (Dickerson y Rubin, 2009).

		Costo (\$US/ton-Km)				
		Biorrefinerías				
Mercados	ID	1	2	3	4	5
Centro	1	32.31	77.01	60.16	29.26	39.71
Noreste	2	52.81	33.77	40.30	87.77	106.78
Centro Oeste	3	31.40	74.03	68.72	74.93	82.30
Noroeste	4	119.38	116.38	133.04	167.04	174.35
Sur	5	107.69	140.00	123.15	62.52	74.32

ⁱ Indica unidades de \$USD/GJ

Tabla A.6 Costos de transporte de materia prima (Ayar y col., 2021).

Costo (\$US/ton-km)						
Sitio de cultivo	ID	Mercados				
		1	2	3	4	5
CDMX	9	176.04	497.68	390.24	206.26	241.78
Estado de México	15	151.99	473.84	397.20	284.62	332.55
Hidalgo	13	179.05	500.74	353.79	200.39	248.27
Tlaxcala	29	233.99	467.46	369.78	147.01	194.63
Morelos	17	242.09	563.78	450.53	207.61	243.18
Veracruz	30	359.55	494.46	396.78	0.00	237.47
Querétaro	22	67.14	390.86	314.27	296.20	345.43
Puebla	21	234.71	531.12	389.41	147.42	177.91
Nuevo León	19	389.51	0.00	151.89	494.46	731.61
Tamaulipas	28	313.02	151.89	0.00	396.78	570.12
San Luis Potosí	24	106.97	292.93	216.44	399.90	449.07
Coahuila	5	447.41	135.95	284.57	626.25	789.51
Zacatecas	32	165.49	266.75	311.62	502.51	553.97
Chihuahua	8	593.54	441.75	574.12	930.76	982.01
Jalisco	14	151.47	436.04	394.45	469.22	518.50
Nayarit	18	274.80	559.42	517.83	592.66	641.83
Colima	6	274.65	560.41	518.81	591.98	639.65
Aguascalientes	1	102.51	322.89	303.05	440.51	490.98
Michoacán	16	127.43	488.70	412.21	378.50	428.10
Durango	10	312.04	332.29	464.65	649.36	700.51
Guerrero	12	355.50	678.75	574.07	332.24	364.02
Guanajuato	11	0.00	389.51	313.02	359.55	405.77
Baja California	2	921.20	833.45	921.72	1203.69	1257.18
Baja California Sur	3	622.10	606.52	677.66	916.53	952.88
Sonora	26	907.29	874.52	1006.89	1225.24	1272.34
Sinaloa	25	587.83	647.44	779.80	905.78	954.85
Chiapas	7	594.06	775.65	679.27	282.90	277.19
Oaxaca	20	405.77	731.61	570.12	237.47	0.00
Tabasco	27	578.27	759.86	663.43	267.07	440.45
Campeche	4	752.65	934.24	837.81	441.44	614.83
Yucatán	31	879.40	1060.94	964.56	568.20	741.59
Quintana Roo	23	900.95	1082.54	986.11	589.75	763.14

Tabla A.7 Demanda en los mercados para cada producto. Adaptado de (SIE, 2021), (CENACE, 2021), (SIENER, 2021), (Bermudez y Hannula, 2021), (Petróleos Mexicanos, 2022).

Mercados	Sitios de cultivo	Demanda de producto (Ton / año)								
		Electricidad (GJ/a)	Acetona (Ton/a)	Butanol (Ton/a)	Etanol (Ton/a)	Biodiesel (Ton/a)	Metanol (Ton/a)	Monóxido de carbono (Ton/a)	Hidrógeno (Ton/a)	Gas natural (Ton/a)
Centro	CDMX									
	Estado de México									
	Hidalgo									
	Tlaxcala									
	Morelos	10,744,549	358,474,157	366,116,392	366,116,392	31,914,433	40,480	56,888	227,550	2,001,233
	Veracruz									
	Querétaro									
Noreste	Puebla									
	Nuevo León									
	Tamaulipas									
	San Luis Potosí									
	Coahuila	9,771,669	182,982,869	186,883,843	186,883,843	19,124,518	40,480	56,888	227,550	2,001,233
Centro oeste	Zacatecas									
	Chihuahua									
	Jalisco									
	Nayarit									
	Colima									
	Aguascalientes									
	Michoacán	7,440,947	218,755,365	200,847,528	223,418,964	27,017,842	40,480	56,888	227,550	2,001,233
Durango										
Guerrero										
Guanajuato										

Tabla A.7 Demanda en el mercado para cada producto (Continuación).

Mercado	Sitios de cultivo	Demanda de producto (Ton / año)								
		Electricidad (GJ/a)	Acetona (Ton/a)	Butanol (Ton/a)	Etanol (Ton/a)	Biodiesel (Ton/a)	Metanol (Ton/a)	Monóxido de carbono (Ton/a)	Hidrógeno (Ton/a)	Gas natural (Ton/a)
Noreste	Baja California									
	Baja California Sur									
	Sonora	5,020,562	96,173,698	98,224,005	98,224,005	14,023,247	40,480	56,888	227,550	2,001,233
	Sinaloa									
Sur	Chiapas									
	Oaxaca									
	Tabasco									
	Campeche	3,181,339	99,357,635	101,475,819	101,475,819	6,880,418	40,480	56,888	227,550	2,001,233
	Yucatán									
	Quintana Roo									

Tabla A.8 Costo de venta de productos. Adaptado de (Santibañez-Aguilar y col., 2020), (DiChristopher, 2021) (Petróleos Mexicanos, 2022).

		Precio de productos (\$ US / Ton)								
Mercados	Sitios de cultivo	Acetona (\$US/ton)	Butanol (\$US/ton)	Etanol (\$US/ton)	Biodiesel (\$US/ton)	Electricidad (\$US/GJ)	Metanol (\$US/ton)	Monóxido de carbono (\$US/ton)	Hidrógeno (\$US/ton)	Gas natural (\$US/ton)
Centro	CDMX	1396	781	707	977	0.1617	306	6140	3000	146
	Estado de México									
	Hidalgo									
	Tlaxcala									
	Morelos									
	Veracruz									
	Querétaro									
Puebla										
Noreste	Nuevo León	1396	781	707	977	0.1617	306	6140	3000	146
	Tamaulipas									
	San Luis Potosí									
	Coahuila									
	Zacatecas									
Chihuahua										
Centro oeste	Jalisco	1396	781	707	977	0.1617	306	6140	3000	146
	Nayarit									
	Colima									
	Aguascalientes									
	Michoacán									
	Durango									
Guerrero										
Guanajuato										
Noroeste	Baja California	1396	781	707	977	0.1617	306	6140	3000	146
	Baja California Sur									
	Sonora									
	Sinaloa									
Sur	Chiapas	1396	781	707	977	0.1617	306	6140	3000	146
	Oaxaca									
	Tabasco									
	Campeche									
	Yucatán									
Quintana Roo										

Tabla A.9 Índice de pobreza humana nacional. Adaptado de (INEGI, 2020), (INEGI, 2021).

Estado	P1 (adimensional)	P2 (adimensional)	P3 (adimensional)	P3 Real (adimensional)	P4 (adimensional)	A	%IPH Nacional
Sonora	1.02	2.60000	27.7401475	13.8700738	4.2625	3	8.84
Durango	1.28	3.50000	37.3497589	18.6748794	4.01		11.83
Nayarit	0.97	5.60000	34.7704262	17.3852131	3.91		11.11
Baja California	1.11	2.60000	23.2568537	11.6284268	2.5625		7.38
Baja California Sur	1.18	3.00000	18.0715158	9.03575788	4.1875		5.94
Sinaloa	0.89	4.40000	29.7606651	14.8803326	3.2025		9.49
Nuevo León	1.16	2.10000	14.5270489	7.26352447	3.495		4.78
Chihuahua	1.44	3.20000	26.28073	13.140365	3.035		8.35
Zacatecas	0.91	4.90000	45.0091811	22.5045905	3.02		14.24
Aguascalientes	0.98	2.80000	26.1829587	13.0914794	3.5375		8.33
Coahuila de Zaragoza	1.22	2.30000	22.4866139	11.2433069	4.54		7.26
CDMX	1.73	2.10000	30.5504358	15.2752179	19.97		14.24
Querétaro	1.04	4.50000	24.9704575	12.4852287	4.3375		8.09
Estado de México	1.23	3.80000	42.7160039	21.3580019	4.5575		13.52
Tlaxcala	1.24	4.30000	46.2730331	23.1365166	3.7375		14.63
Morelos	1.08	5.60000	50.8155675	25.4077837	2.3325		16.07
Michoacán	0.83	8.90000	46.0445154	23.0222577	2.695		14.78
Jalisco	1.25	3.70000	28.4291724	14.2145862	2.99		9.04
Guanajuato	1.08	6.90000	43.3838539	21.6919269	3.665		13.83
Guerrero	0.97	15.90000	66.4694883	33.2347441	1.515		21.68
Colima	0.8	4.20000	30.8685969	15.4342984	3.54		9.83
Puebla	1.49	9.00000	56.4708668	28.2354334	2.665		17.98
Tamaulipas	1.16	3.30000	35.0007324	17.5003662	3.435		11.08
Hidalgo	1	8.40000	43.8451555	21.9225777	2.42		14.07
San Luis Potosí	1	6.50000	42.589246	21.294623	2.585		13.55
Veracruz	1.32	10.40000	59.2487788	29.6243894	2.9925		18.93
Tabasco	1.61	6.30000	50.782526	25.391263	7.09		16.19
Campeche	1.29	7.30000	46.249366	23.124683	3.3		14.73
Yucatán	1.29	7.60000	39.426378	19.713189	1.8825		12.66
Quintana Roo	1.01	4.00000	26.9578725	13.4789362	3.0475		8.60
Oaxaca	1.07	14.90000	66.3516222	33.1758111	1.7825		21.51
Chiapas	1.69	17.40000	76.4110319	38.205516	3.2675		24.81

Tabla A.10 Índice de desarrollo humano estatal. Adaptado de (INEGI, 2021).

Estado	Valores adimensionales									IDH Nacional
	IEV	IEV Calculado	IA	IM	IA Calculado	IM Calculado	IE	IPB	IPB calculado	
Sonora	75.3	0.83833	97.40000	79.93333	0.97400	0.79933	0.91578	19051.98749	0.87621	0.87677
Durango	75	0.83333	96.50000	80.33333	0.96500	0.80333	0.91111	6724.23088	0.70238	0.81561
Nayarit	75.2	0.83667	94.40000	78.30000	0.94400	0.78300	0.89033	3922.46801	0.61242	0.77981
Baja California	75.9	0.84833	97.40000	85.00000	0.97400	0.85000	0.93267	19612.34006	0.88104	0.88735
Baja California Sur	75.8	0.84667	97.00000	85.60000	0.97000	0.85600	0.93200	5043.17316	0.65437	0.81101
Sinaloa	75	0.83333	95.60000	81.50000	0.95600	0.81500	0.90900	12327.75661	0.80355	0.84863
Nuevo León	75.8	0.84667	97.90000	79.40000	0.97900	0.79400	0.91733	44828.20585	1.01902	0.92767
Chihuahua	75.3	0.83833	96.80000	79.36667	0.96800	0.79367	0.90989	19612.34006	0.88104	0.87642
Zacatecas	74.9	0.83167	95.10000	81.03333	0.95100	0.81033	0.90411	5043.17316	0.65437	0.79672
Aguascalientes	75.8	0.84667	97.20000	78.80000	0.97200	0.78800	0.91067	7284.58345	0.71574	0.82436
Coahuila de Zaragoza	75.6	0.84333	97.70000	79.76667	0.97700	0.79767	0.91722	20733.04520	0.89032	0.88362
CDMX	76.5	0.85833	97.90000	104.03333	0.97900	1.04033	0.99944	90216.76427	1.13575	0.99784
Querétaro	75.5	0.84167	95.50000	83.96667	0.95500	0.83967	0.91656	12888.10918	0.81097	0.85640
Estado de México	75.1	0.83500	96.20000	84.46667	0.96200	0.84467	0.92289	49311.02643	1.03493	0.93094
Tlaxcala	75.1	0.83500	95.70000	83.63333	0.95700	0.83633	0.91678	3362.11544	0.58669	0.77949
Morelos	75.1	0.83500	94.40000	86.10000	0.94400	0.86100	0.91633	6163.87830	0.68786	0.81306
Michoacán	74.7	0.82833	91.10000	74.50000	0.91100	0.74500	0.85567	14008.81433	0.82489	0.83630
Jalisco	75.4	0.84000	96.30000	77.90000	0.96300	0.77900	0.90167	39785.03269	0.99910	0.91359
Guanajuato	75.1	0.83500	93.10000	80.50000	0.93100	0.80500	0.88900	23534.80807	0.91147	0.87849
Guerrero	73.2	0.80333	84.10000	77.30000	0.84100	0.77300	0.81833	7844.93602	0.72811	0.78326
Colima	75.4	0.84000	95.80000	76.16667	0.95800	0.76167	0.89256	3362.11544	0.58669	0.77308
Puebla	74.7	0.82833	91.00000	84.10000	0.91000	0.84100	0.88700	18491.63491	0.87122	0.86219
Tamaulipas	75.1	0.83500	96.70000	78.76667	0.96700	0.78767	0.90722	17370.92977	0.86079	0.86767
Hidalgo	75	0.83333	91.60000	87.86667	0.91600	0.87867	0.90356	8965.64117	0.75040	0.82910
San Luis Potosí	74.8	0.83000	93.50000	81.66667	0.93500	0.81667	0.89556	12888.10918	0.81097	0.84551
Veracruz	74.4	0.82333	89.60000	76.20000	0.89600	0.76200	0.85133	25215.86579	0.92299	0.86589

Tabla 6.10 Índice de desarrollo humano estatal (Continuación).

Estado	Valores adimensionales									IDH Nacional
	IEV	IEV Calculado	IA	IM	IA Calculado	IM Calculado	IE	IPB	IPB calculado	
Tabasco	74.9	0.83167	93.70000	86.73333	0.93700	0.86733	0.91378	12888.10918	0.81097	0.85214
Campeche	74.7	0.82833	92.70000	75.70000	0.92700	0.75700	0.87033	15129.51947	0.83773	0.84547
Yucatán	74.6	0.82667	92.40000	80.26667	0.92400	0.80267	0.88356	8405.28860	0.73963	0.81662
Quintana Roo	75.4	0.84000	96.00000	83.73333	0.96000	0.83733	0.91911	8965.64117	0.75040	0.83650
Oaxaca	74	0.81667	85.10000	79.26667	0.85100	0.79267	0.83156	8405.28860	0.73963	0.79595
Chiapas	74.2	0.82000	82.60000	79.46667	0.82600	0.79467	0.81556	7844.93602	0.72811	0.78789

Índices del modelo matemático

Índices del modelo matemático

La asignación de los índices y sus descripciones para las partes involucradas en la cadena de suministro y sus valores para comenzar a desarrollar el código de GAMS para la optimización multiobjetivo se muestran en la Tabla A.11 que presenta la asignación de los índices y variables del modelo matemático.

Tabla A.11 Parámetros, índices y variables asignadas al modelo matemático.

Conjuntos	Descripción
M	Materia prima
P	Productos
R	Rutas
H	Sitios de cultivo
F	Plantas de procesamiento/biorrefinerías
C	Mercados
T	Periodos (tiempo)
Parámetros	Descripción
IDH_h	Índice de desarrollo humano (Estatad)
$DM_{h,f}$	Distancia en Km de la materia prima distribuida entre un sitio de cultivo h y una biorrefinería f
$DP_{f,c}$	Distancia en km del producto distribuido entre una biorrefinería f y un mercado c
$EM_{m,h,f,t}$	Emisiones generadas por la generación de materias primas
$EP_{p,f,c,t}$	Emisiones generadas por la producción de productos
$M_{m,h,t}^{max}$	Máxima materia prima producida en los sitios de cultivo (h) al final del periodo de tiempo (t)
$p_{p,c,t}^{Max demand}$	Máxima demanda de producto (p) en el mercado (c) al final del periodo (t) (toneladas por año)
$M_{m,h}^{Max alm}$	Máximo almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) (toneladas por año)
$M_{m,f}^{Max alm}$	Máximo almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f) (toneladas por año)
$p_{p,f}^{Max alm}$	Máximo almacenamiento de producto (p) en las biorrefinerías (f) (toneladas por año)

Tabla A.11 Parámetros, índices y variables asignadas al modelo matemático (continuación).

Parámetros	Descripción
$P_{p,c}^{Max alm}$	Máximo almacenamiento de producto (p) en el mercado (c) (toneladas por año)
$M_{m,h}^{Min alm}$	Mínimo almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) (toneladas por año)
$M_{m,f}^{Min alm}$	Mínimo almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f) (toneladas por año)
$P_{p,f}^{Min alm}$	Mínimo almacenamiento de producto (p) en las biorrefinerías (f) (toneladas por año)
$P_{p,c}^{Min alm}$	Mínimo almacenamiento de producto (p) en el mercado (c) (toneladas por año)
$U_{m,h,f}^{max transp}$	Máximo transporte de materia prima (m) desde los sitios de cultivo (h) hacia las biorrefinerías (f) (toneladas por año)
$U_{p,f,c}^{max transp}$	Máximo transporte de producto (p) desde las biorrefinerías (f) hacia el mercado (c) (toneladas por año)
$U_{m,h,f}^{min transp}$	Mínimo transporte de materia prima (m) desde los sitios de cultivo (h) hacia las biorrefinerías (f) (toneladas por año)
$U_{p,f,c}^{min transp}$	Mínimo transporte de producto (p) desde las biorrefinerías (f) hacia el mercado (c) (toneladas por año)
$\alpha_{p,m,r}^{factor}$	Factor de conversión de productos (p) desde materia prima (m) por la ruta de procesamiento (r)
$M_{m,p,r,f}^{max used}$	Máximo procesamiento de materia prima (m) para generar productos (p) mediante la ruta de procesamiento (r) en las biorrefinerías (f) (toneladas por año)
$M_{m,p,r,f}^{min used}$	Mínimo procesamiento de materia prima (m) para generar productos (p) mediante la ruta de procesamiento (r) en las biorrefinerías (f) (toneladas por año)
$C_{m,h,t}^{produced}$	Costo de la prima (m) generada en los sitios de cultivo (h) al final del periodo de tiempo (t) (\$US por tonelada)
$C_{p,c,t}^{product}$	Costo de los productos (p) en el mercado (c) al final del periodo de tiempo (t) (\$US por tonelada)
$C_{m,h}^{fixed alm}$	Costo fijo de almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) (\$US)
$C_{m,f}^{fixed alm}$	Costo fijo de almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f) (\$US)
$C_{p,f}^{fixed alm}$	Costo fijo de almacenamiento de los productos (p) en las biorrefinerías (f) (\$US)
$C_{p,c}^{fixed alm}$	Costo fijo de almacenamiento de los productos (p) en los mercados (c) (\$US)

Tabla A.11 Parámetros, índices y variables asignadas al modelo matemático (continuación).

Parámetros	Descripción
$C_{m,h,t}^{variable\ alm}$	Costo variable de almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) (\$US por tonelada)
$C_{m,f,t}^{variable\ alm}$	Costo variable de almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f) (\$US por tonelada)
$C_{p,f,t}^{variable\ alm}$	Costo variable de almacenamiento de los productos (p) en las biorrefinerías (f) (\$US por tonelada)
$C_{p,c,t}^{variable\ alm}$	Costo variable de almacenamiento de los productos (p) en los mercados (c) (\$US por tonelada)
$C_{m,h,f,t}^{transp}$	Costo de transporte de la materia prima (m) desde los sitios de cultivo (h) hacia las biorrefinerías (f) (\$US por tonelada)
$C_{p,f,c,t}^{transp}$	Costo de transporte de los productos (p) desde las biorrefinerías (f) hacia los mercados (c) (\$US por tonelada)
$C_{m,p,r,f,t}^{process}$	Costo de procesamiento de la materia prima (m) para generar productos (p) por la ruta de procesamiento (r) en las biorrefinerías (f) (\$US por tonelada)
$V_{m,f,t}^{price}$	Determina el precio de venta de la materia prima (m) a las biorrefinerías (f)
$A_{m,h}^{gral\ alm}$	Almacén de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h)
VARIABLES POSITIVAS	Descripción
$M_{m,h}^{inicial\ alm}$	Almacenamiento inicial de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h)
$M_{m,f}^{inicial\ alm}$	Almacenamiento inicial de materia prima (m) en las biorrefinerías (f)
$P_{p,f}^{inicial\ alm}$	Almacenamiento inicial de productos (p) en las biorrefinerías (f)
$P_{p,c}^{inicial\ alm}$	Almacenamiento inicial de productos (p) en los mercados (c)
$M_{m,h,t}^{produced}$	Producción de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) al final del periodo de tiempo (t)
$M_{m,h,t}^{alm}$	Almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) al final del periodo de tiempo (t)
$M_{m,f,t}^{alm}$	Almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f) al final del periodo de tiempo (t)
$P_{p,f,t}^{alm}$	Almacenamiento de productos (p) en las biorrefinerías (f) al final del periodo de tiempo (t)
$P_{p,c,t}^{alm}$	Almacenamiento de productos (p) en los mercados (c) al final del periodo de tiempo (t)

Tabla A.11 Parámetros, índices y variables asignadas al modelo matemático (continuación).

Variables positivas	Descripción
$M_{m,h,f,t}^{out\ distr}$	Materia prima (m) distribuida desde los sitios de cultivo (h) hacia las biorrefinerías (f) (salida)
$M_{m,h,f,t}^{in\ distr}$	Materia prima (m) distribuida desde los sitios de cultivo (h) hacia las biorrefinerías (f) (entrada)
$M_{m,p,r,f,t}^{out\ process}$	Materia prima (m) utilizada por las rutas de procesamiento (r) para generar productos (p) desde las biorrefinerías (f) (salida)
$P_{p,f,c,t}^{out\ distr}$	Productos (p) distribuidos desde las biorrefinerías (f) hacia los mercados (c) (salida)
$P_{m,p,r,f,t}^{in\ produced}$	Productos (p) generados por las biorrefinerías (f) (entrada)
$P_{p,f,c,t}^{in\ distr}$	Productos (p) distribuidos desde las biorrefinerías (f) hacia el mercado (c) (entrada)
$V_{p,c,t}^{out\ sale}$	Productos (p) vendidos en el mercado (c) (salida)
$C_{m,h}^{total\ alm}$	Costo total de almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h)
$C_{m,f}^{total\ alm}$	Costo total de almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f)
$C_{p,f}^{total\ alm}$	Costo total de almacenamiento de productos (p) en las biorrefinerías (f)
$C_{p,c}^{total\ alm}$	Costo total de almacenamiento de productos (p) en los mercados (c)
Variables binarias	Descripción
$y_{m,h,f,t}^{Necessary\ trans}$	Define si es necesario el transporte de materia prima (m) desde los sitios de cultivo (m) hacia las biorrefinerías (f)
$y_{p,f,c,t}^{Necessary\ trans}$	Define si es necesario el transporte de productos (p) desde las biorrefinerías (f) hacia los mercados (c)
$y_{m,p,r,f,t}^{Necessary\ process}$	Define si es necesario el procesamiento en las biorrefinerías (f)
$y_{m,h}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h)
$y_{m,f}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f)
$y_{p,f}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de productos (p) en las biorrefinerías (f)

Tabla A.11 Parámetros, índices y variables asignadas al modelo matemático (continuación).

Variables binarias	Descripción
$y_{p,c}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de producto (p) en los mercados (c)
$y_{m,h,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) en el periodo de tiempo cero
$y_{m,f,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f) en el periodo de tiempo cero
$y_{p,f,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de productos (p) en las biorrefinerías (f) en el periodo de tiempo cero
$y_{p,c,0}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de productos (p) en los mercados (c) en el periodo de tiempo cero
$y_{m,h,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima (m) en los sitios de cultivo (h) en un periodo de tiempo (t)
$y_{m,f,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de materia prima (m) en las biorrefinerías (f) en un periodo de tiempo (t)
$y_{p,f,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de productos (p) en las biorrefinerías (f) en un periodo de tiempo (t)
$y_{p,c,t}^{Necessary\ alm}$	Define si es necesario el almacenamiento de productos (p) en los mercados (c) en un periodo de tiempo (t)
$y_{m,h}^{Existence}$	Define la existencia de un sitio de cultivo siempre que haya transporte desde ese sitio hacia una biorrefinería.

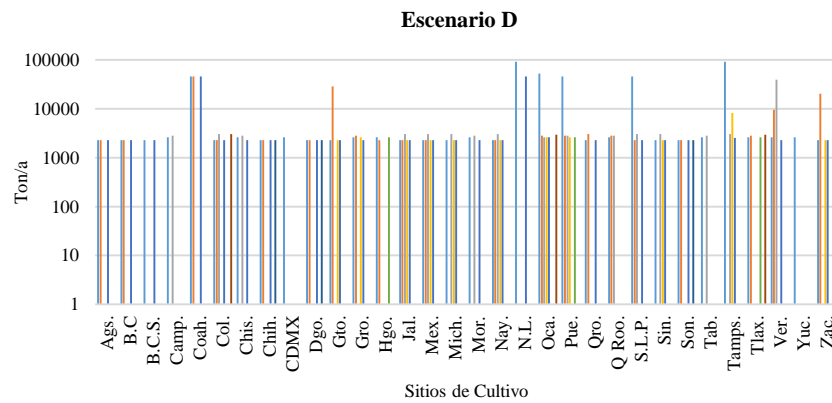
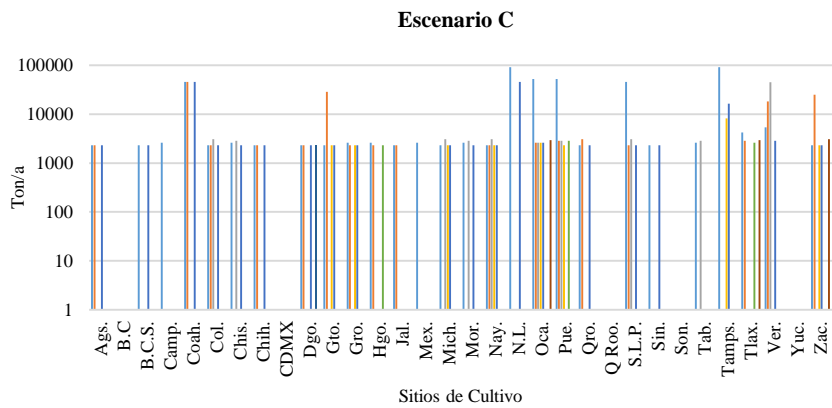
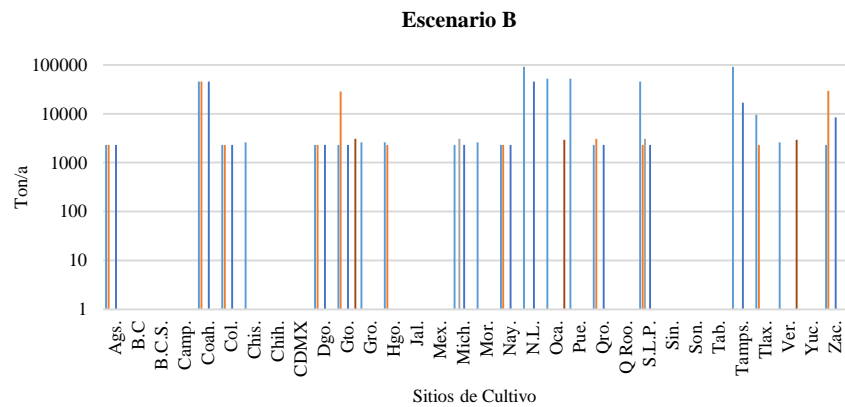
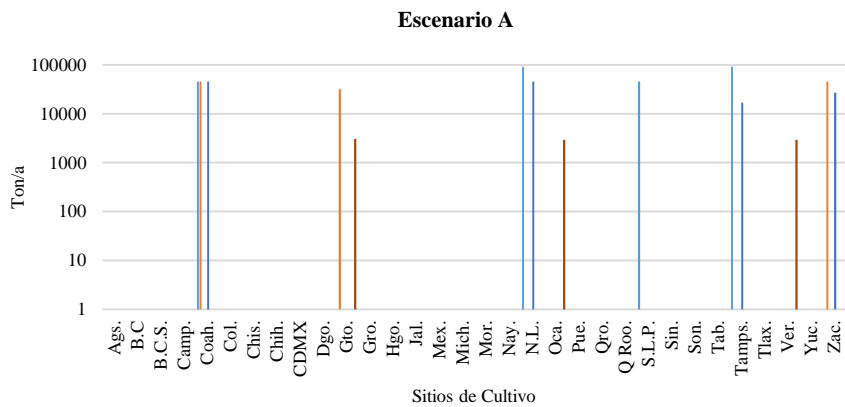
Apéndice B

Gráficos de apoyo para análisis de resultados

Las figuras siguientes permiten conocer de una mejor manera los resultados generados respecto a materias primas generadas, así como los sitios de cultivo participantes en cada una de las cadenas de suministro de los escenarios.

La Figura B.1 muestra las materias primas generadas en los sitios de cultivo para los escenarios A, B, C y D en los cuales se contrapuso el objetivo económico con el objetivo social.

La Figura B.2 presenta las materias primas generadas en los sitios de cultivo para los escenarios E, F y G en los cuales se contrapuso el objetivo económico con el objetivo ambiental, principalmente.



- Residuos Sólidos Orgánicos Estatales
- Rastrojo de Maíz
- Bagazo de Caña de Azúcar
- Bagazo de Agave
- Rastrojo de Sorgo
- Bagazo de Maguey
- Rastrojo de Trigo
- Lodos Biológicos Residuales

Figura B.1 Materias primas generadas en los sitios de cultivo

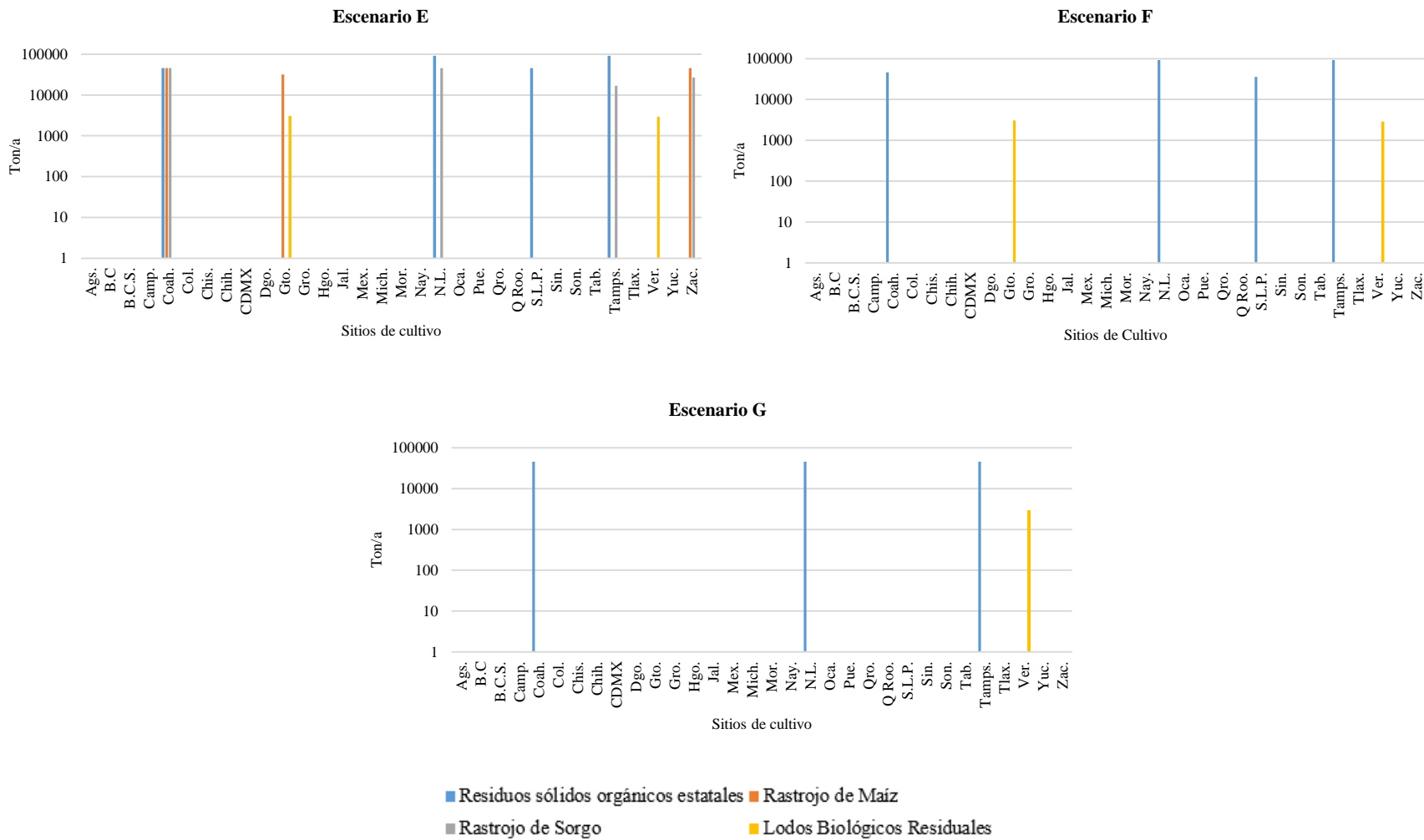


Figura B.2 Materias primas generadas en los sitios de cultivo (escenarios E, F y G)

BIBLIOGRAFÍA

- Achinas, S., y Euverink, G. (2016). Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*, 2, 143-147. doi:doi.org/10.1016/j.reffit.2016.08.001
- Acosta, L., y Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39, 35-48. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- AlNouss, A., McKay, G., y Al-Ansari, T. (2020). A comparison of steam and oxygen fed biomass gasification through a techno-economic-environmental study. *Energy Conversion and Management*, 208, 112612. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112612>
- Alvarez del Castillo-Romo, A., Morales-Rodriguez, R., y Román-Martínez, A. (2018). Multiobjective optimization for the socio-eco-efficient conversion of lignocellulosic biomass to biofuels and bioproducts. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 603-620. doi:<https://doi.org/10.1007/s10098-018-1490-x>
- Arenas. (2009). *Propuesta de diseño de un proceso para la generación de energía eléctrica a partir de los residuos de la producción de café*. Recuperado el 2020, de Repositorio Digital de Pontificia Universidad Javeriana: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7371/tesis>
- Athanasoulia, E., Melidis, P., y Aivasidis, A. (2012). Optimization of biogas production from waste activated sludge through serial digestion. *Renewable Energy*, 47, 147-151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.038>
- Ayar, J., Estrada, L., y Ayar, E. (Abril de 2021). Costo Transporte Agrícola. (J. Pulido, Entrevistador)
- Azelee, N., Manas, N., Dailin, D., Ramli, A., y Shaarani, S. (2020). Biological Treatment of Agro-Industrial Waste. *Valorisation of Agro-industrial Residues – Volume I: Biological Approaches.*, 59-79. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-39137-9_3
- Bamufleh, H., Ponce-Ortega, J., y El-Halwagi, M. (2013). Multi-objective optimization of process cogeneration systems with economic, environmental, and social tradeoffs. *Clean*

Technologies and Environmental Policy, 15, 185-197. doi:<https://doi.org/10.1007/s10098-012-0497-y>

- Bermudez, J., y Hannula, I. (2021). *Hydrogen*. Recuperado el 2022, de International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
- Borja, M. (2018). *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Barcelona, España: Reverté. Recuperado el 5 de enero de 2021, de https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/ebd1e307-f7da-4d77-9118-93dbf3783c82/TOC_0609_63_02.pdf?guest=true
- Bowling, I., Ponce-Ortega, J., y El-Halwagi, M. (2011). Facility Location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50, 6276-6286. doi:<https://doi.org/10.1021/ie101921y>
- Budzianowski, W., y Postawa, K. (2016). Total Chain Integration of sustainable biorefinery systems. *Applied Energy*, 184, 1432-1446. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.050>
- Camero, C., Sowlati, T., y Pavel, M. (2016). Economic and life cycle environmental optimization of forest-based biorefinery supply chains for bioenergy and biofuel production. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 218-235. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.040>
- Cao, Y., Wang, Q., Du, J., y Chen, J. (2019). Oxygen-enriched air gasification of biomass materials for highquality syngas production. *Energy Conversion and Management*, 199, 111628. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.054>
- Carmona-Garcia, E., Marín-Valencia, P., Solarte-Toro, J., Moustakas, K., y Cardona-Alazate, C. (2021). Comparison of acetone–butanol–ethanol fermentation and ethanol catalytic upgrading as pathways for butanol production: A techno-economic and environmental assessment. *Biofuel*, 8, 1384-1399. doi:10.18331/BRJ2021.8.2.4
- Castellanos, L., Matallana, L., y López, L. (2014). Análisis de estabilidad de un sistema de fermentación acetona-butanol-etanol (ABE) a partir de glucosa empleando *Clostridium acetobutylicum* ATCC 824. *Mutis*, 4(1), 15-23. doi:10.21789/22561498.906

- CENACE. (2021). *Demanda Sistema Eléctrico Nacional*. Obtenido de Centro Nacional de Control de Energía: <https://www.cenace.gob.mx/GraficaDemanda.aspx>
- CEPAL. (2006). *CEPAL Nota tecnica I*. Recuperado el 12 de febrero de 2021, de Informe sobre el desarrollo humano: <https://dds.cepal.org/infancia/guia-para-estimar-la-pobreza-infantil/bibliografia/capitulo-III/Calculo%20IDH.pdf>
- CONEVAL. (2020). *Informe de Pobreza y Evaluación 2020*. Recuperado el 2020, de Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social: https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Documents/Informes_de_pobreza_y_evaluacion_2020_Documentos/Informe_Mexico_2020.pdf
- Contreras-Zarazúa, G., Martin-Martin, M., Ponce-Ortega, J., y Segovia-Hernandez, J. (2021). Sustainable Design of an Optimal Supply Chain for Furfural Production from Agricultural Wastes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60, 14495-14510. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01847>
- Delgado, R. (2010). *Minimización de pérdidas en media tensión con intervención de generadores dispersos en el control*. Recuperado el diciembre de 2020, de Repositorio de la Universidad de Sevilla E-RedIng: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4836/direccion/Memoria+PFC%252F>
- DiChristopher, T. (2021). *Experts explain why green hydrogen costs have fallen and will keep falling*. Recuperado el 2021, de S&P global, Market Intelligence: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/experts-explain-why-green-hydrogen-costs-have-fallen-and-will-keep-falling-63037203>
- Dickerson, K., y Rubin, J. (2009). *Maine Bioproducts Business Pathways: Ethanol Comparison & Transportation Analysis*. Obtenido de Energy & the Environment: https://digitalcommons.library.umaine.edu/mcspc_energy_environ/5
- El-Halwagi, A., Rosas, C., Ponce-Ortega, J., Jiménez-Gutierrez, A., Mannan, M., y El-Halwagi, A. (2013). Multiobjective optimization of biorefineries with economic and safety objectives. *AIChE Journal*, 59, 2427-2434. doi:<https://doi.org/10.1002/aic.14030>

- Espinoza-Vázquez, Y., Gómez-Castro, F., y Ponce-Ortega, J. (2021). Optimization of the supply chain for the production of biomass-based fuels and high-added value products in Mexico. *Computers & Chemical Engineering*, *145*, 107181. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107181>
- Farmanbodar, S., Karimi, K., y Amiri, H. (2018). Municipal solid waste as a suitable substrate for butanol production as an advanced biofuel. *Energy Conversion and Management*, *157*, 396-408. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.020>
- Ferrero, M., y Chiotti, O. (2015). *Optimización*. Recuperado el enero de 2021, de Modelado, Simulación y Optimización de proceso químicos: <http://metabase.uaem.mx/handle/123456789/599>
- Fuentes-Cortés, L., Ponce-Ortega, J., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., y El-Hawagi, M. (2015). Optimal design of integrated CHP systems for housing complexes. *Energy Conversion and Management*, *99*, 252-263. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.036>
- Gomez-Millan, G. (2015). Desarrollo de biorrefinerías en el mundo (Biorefineries development: a worldwide review). *Ciencia y Desarrollo (Research Gate)*, 34-39. Recuperado el 5 de enero de 2021, de <https://www.researchgate.net/publication/277774313>
- González, J. (2018). Las biorrefinerías: aplicación a materiales y residuos lignocelulósicos. *Horizonte 2050. bie3 Boletín (Instituto Español de Estudios Estratégicos) IEEE*, 718-731. Recuperado el 5 de enero de 2021, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6715648>
- González, J., y González, L. (2015). Biomasa: métodos de producción, potencial energético y medio ambiente. *Revista I3+, Investigación, Innovación, Ingeniería*, *2(2)*, 28-44. doi:<https://doi.org/10.24267/23462329.109>
- INEGI. (2019). *Agricultura, ganadería y pesca*. Recuperado el 2020, de Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>
- INEGI. (2020). *Índice bruto de matriculación*. Obtenido de Tasa neta de matriculación por entidad federativa según nivel educativo:

https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/pxweb/pxweb/es/Educacion/-/Educacion_09.px/table/tableViewLayout2/?rxid=85f6c251-5765-4ec7-9e7d-9a2993a42594

INEGI. (2020). *Producto Interno Bruto por entidad federativa*. Obtenido de COMUNICADO DE PRENSA NÚM. 632/20: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2020/OtrTemEcon/PIBEntFed2019.pdf>

INEGI. (2021). *Banco de Indicadores*. Obtenido de Indicadores de Bienestar por entidad federativa: <https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/?ind=6300000011&tm=8#divFV310600200163000000116300000011#D6300000011>

INEGI. (2021). *Desocupación*. Obtenido de asa de desocupación total trimestral según entidad federativa: <https://www.inegi.org.mx/app/tabulados/default.html?nc=624>

INEGI. (2021). *Indicadores de Bienestar por entidad federativa*. Obtenido de INEGI: <https://www.inegi.org.mx/app/bienestar/>

Lee, S. Y., Park, J. H., Jang, S. H., Nielsen, L. K., Kim, J., y Jung, K. S. (2008). Fermentative butanol production by clostridia. *Biotechnology and Bioengineering*, 101(2), 209-228. doi:10.1002/bit.22003

Liu, C., y Wu, S. (2016). From biomass waste to biofuels and biomaterial building blocks. *Renewable Energy*, 96, 1056-1062. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.059>

Long, Y., Wang, H., Yu, X., Shen, D., Yin, J., y Chen, T. (2018). Effect of activated persulfate on gas production from food waste anaerobic digestion. *Energy*, 165, 343-348. doi:doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.178

López, J. (2013). *Optimización Multi-objetivo Aplicaciones a problemas del mundo real*. Recuperado el enero de 2021, de Portal de Libros Universidad Nacional de La Plata: <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/152/132/418-1>

- López-Calva, L., Rodríguez García, C., y Vélez, R. (2003). Estimación del IDH estatal en México, análisis de sensibilidad a distintas decisiones metodológicas y comparaciones internacionales. *Estudio sobre Desarrollo Humano PNUD*, 4-12.
- López-Calva, L., Rodríguez-Chamussy, L., y Skékely, M. (2004). Medición del Desarrollo Humano en México. *Estudios sobre desarrollo humano PNUD*, 5-22.
- López-Molina, A., Sengupta, S., Shi, C., Aldamigh, E., Alandejani, M., y El-Halwagi, M. (2020). An Integrated Approach to the Design of Centralized and Decentralized Biorefineries with Environmental, Safety, and Economic Objectives. *Processes*, 8, 1682. doi:<https://doi.org/10.3390/pr8121682>
- Lozano, F., y Lozano, R. (2017). Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production. *Journal of Cleaner Production, Elsevier*, 172, 4162-4169. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.037>
- Martínez-Amariz, A., y Garrido-Silva, G. (2019). Uso de la biomasa de residuos orgánicos para el diseño de una estación eléctrica. *Revista UIS Ingenierías*, 18(1), 167-176.
- Martinkus, N., Latta, G., Rijkhoff, S., Mueller, D., Hoard, S., Sasatani, D., . . . Wolcott, M. (2019). A multi-criteria decision support tool for biorefinery siting: Using economic, environmental, and social metrics for a refined siting analysis. *Biomass and Bioenergy*, 128, 105330. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105330>
- Masera, O., Coralli, F., García, C., Riegelhaupt, E., Arias, T., Vega, J., . . . Cecotti, L. (2011). *La bioenergía en México, situación actual y perspectivas*. México: Red Mexicana de Bioenergía.
- Mayank, R., Ranjan, A., y Moholkar, V. (2012). Mathematical models of ABE fermentation: review and analysis. *Critical Reviews in Biotechnology*, 34(4), 419-447. doi:[10.3109/07388551.2012.726208](https://doi.org/10.3109/07388551.2012.726208)
- Miret, C., Chazara, P., Montastruc, L., Negny, S., y Domenech, S. (2016). Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning

- economic, environmental and social criteria. *Computers & Chemical Engineering*, 85(2), 16-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.10.008>
- Naseem, K., Andarasu, S., y Murugan, S. (2018). Biogas potential from spent tea waste: A laboratory scale investigation of co-digestion with cow manure. *Energy*, 165, 760-768. doi:doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.163
- Obando, C., y Wellington, H. (2018). *Análisis para la obtención de energía eléctrica utilizando un Gasificador de Biomasa*. Recuperado el 2020, de Repositorio Digital Universidad Católica de Santiago de Guayaquil: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/11351/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-148.pdf>
- Osorio, F., y Torres, J. (2009). Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable Energy*, 34, 2164-2171. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.023>
- Palmeros-Parada, M., Osseweijer, P., y Posada-Duque, J. (2017). Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. *Industrial Crops and Products*, 106, 105-123. doi:<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.052>
- Patra, K., Nimisha, K. R., y Sheth, P. (2016). A comprehensive dynamic model for downdraft gasifier using heat and mass transport coupled with reaction kinetics. *Energy*, 116, 1230-1242. doi:doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.036
- Petróleos Mexicanos. (2022). *Estadísticas petroleras*. México: Pemex. Recuperado el 2022, de <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Indicadores%20Petroleros/indicador.pdf>
- Pressley, P., Aziz, T., DeCarolis, J., Barlaz, M., He, F., Li, F., y Damgaard, A. (2014). Municipal solid waste conversion to transportation fuels: a life-cycle estimation of global warming potential and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 70, 145-153. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.041>
- Qureshi, N., y Blaschek, H. (2001). ABE production from corn: a recent economic evaluation. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 27, 292-297. doi:<https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000123>

- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J., Barquín, J., & Linares, P. (2010). *Modelos Matemáticos de Optimización*. Recuperado el Enero de 2021, de researchgate: https://www.researchgate.net/publication/237494291_MODELOS_MATEMATICOS_D E_OPTIMIZACION
- Rodrigues, L., Silva dos Santos, I., Silva dos Santos, T., Mambeli, R., y Tiago, G. (2022). Energy and economic evaluation of MSW incineration and gasification in Brazil. *Renewable Energy*, 188, 933-944. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.083>
- Roni, M. S., Thompson, D. N., y Hartley, D. S. (2019). Distributed biomass supply chain cost optimization to evaluate multiple feedstocks for a biorefinery. *Applied Energy*, 254, 113660. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113660>
- Saghaei, M., Ghaderi, H., y Soleimani, H. (2020). Design and optimization of biomass electricity supply chain with uncertainty in material quality, availability and market demand. *Energy*, 197, 117165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117165>
- Santibañez-Aguilar, J., Gonzalez-Campos, J., Ponce-Ortega, J., Serna-Gonzales, M., y El-Halwagi, M. (2014). Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*, 65, 270-294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>
- Santibañez-Aguilar, J., González-Campos, J., Ponce-Ortega, J., Serna-González, M., y El-Halwagi, M. (2011). Optimal Planning of a Biomass Conversion System Considering Economic and Environmental Aspects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(14), 8558-8570. doi:<https://doi.org/10.1021/ie102195g>
- Santibañez-Aguilar, J., Lozano-García, D., Lozano, F., y Flores-Tlacuahuac, A. (2019). Sequential Use of Geographic Information System and Mathematical Programming for Optimal Planning for Energy Production Systems from Residual Biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(35), 15818-15837. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00492>
- Santibañez-Aguilar, J., Quiroz-Ramírez, J., Sánchez-Ramírez, E., Segovia-Hernández, J., Flores-Tlacuahuac, A., y Ponce-Ortega, J. (2022). Marginalization index as social measure for Acetone-Butanol-Ethanol supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111816. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111816>

- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Biomasa, creación ecológica de energía*. Recuperado el 10 de enero de 2021, de Gobierno de Mexico (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural): <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/biomasa-creacion-ecologica-de-energia#:~:text=Es%20una%20fuente%20importante%20de,y%20municipios%20del%20territorio%20nacional.&text=La%20biomasa%20fue%20la%20fuente,el%20uso%20de%20combustibles%20f%C3%B3siles>.
- Shaya, E., Zare, V., y Mirzaee, I. (2018). Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents. *Energy Conversion and Management, 159*, 30-41. doi:10.1016/j.enconman.2017.12.096
- SIAP. (2020). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Obtenido de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIE. (2021). *Demanda de Diesel por estados*. Obtenido de Sistema de Información Energética: https://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=cuadro&cvecua=VIDI_PSP
- SIENER. (2021). *Consumo de energía eléctrica por entidad federativa*. Recuperado el March de 2021, de Sistema de Información Energética: https://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=cuadro&cvecua=DIIE_C32_ESP
- Snehesh, S., Mukunda, H., Mahapatra, S., y Dasappa, S. (2017). Fischer-Tropsch route for the conversion of biomass to liquid fuels - Technical and economic analysis. *Energy, 130*, 182-191. doi:10.1016/j.energy.2017.04.101
- Torreiro, Y., Pérez, L., Blanco, D., y Rodríguez-Abalde, Á. (2018). Valorización energética de biomasa agroforestal mediante microgeneración: de residuo a recurso. *Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA 2018)* (págs. 1-12). España: Rumbo 20.30 (EnergyLab).
- Ulonska, K., König, A., Klatt, M., Mitsos, A., y Viell, J. (2018). Optimization of Multiproduct Biorefinery Processes under Consideration of Biomass Supply Chain Management and Market Developments. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 57(20)*, 6980-6991. doi:10.1021/acs.iecr.8b00245

- Veza, I., Said, M. F., y Latiff, Z. A. (2020). Recent advances in butanol production by acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation. *Biomass and Bioenergy (ELSEVIER)*, 144, 1-19. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105919>
- Ximenes, E., Farinas, C., Badino, A., y Ladisch, M. (2020). Moving from residual lignocellulosic biomass into high-value products: Outcomes from a long-term international cooperation. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15, 563-573. doi: <https://doi.org/10.1002/bbb.2179>
- Yang, T., Li, Y., Gao, J., Huang, C., Chen, B., Zhang, L., . . . Li, X. (2015). Performance of dry anaerobic technology in the co-digestion of rural organic solid wastes in China. *Energy*, 93, 2497-2502. doi:doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.014
- Yee-Ting, N., y Nai-Peng, T. (2019). Human Development Index as a Predictor of Life Satisfaction. *Journal of Population and Social Studies*, 27(1), 70-86. doi:[10.25133/JPSSv27n1.005](https://doi.org/10.25133/JPSSv27n1.005)
- Yue, D., Slivinsky, M., Sumpter, J., y You, F. (2014). Sustainable Design and Operation of Cellulosic Bioelectricity Supply Chain Networks with Life Cycle Economic, Environmental, and Social Optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(10), 4008-4029. doi:<https://doi.org/10.1021/ie403882v>
- Zhenh, X., Ting, Z., Wang, B., y Chen, C. (2018). Hydrogen and syngas production from municipal solid waste (MSW) gasification via reusing CO₂. *Applied Thermal Engineering*, 144, 242-247. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.058>