



UNIVERSIDAD  
DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

# OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO PARA LA PRODUCCIÓN DE DERIVADOS DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS EN MÉXICO

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRA EN INGENIERÍA  
QUÍMICA (INTEGRACIÓN DE PROCESOS)

PRESENTA

I.Q. YULISSA MERCEDES ESPINOZA VÁZQUEZ

Guanajuato, Guanajuato. Diciembre del 2020

Declaratoria:

Por medio de la presente me responsabilizo de la autenticidad y originalidad del presente trabajo titulado:

**“Optimización de la cadena de suministro para la producción de derivados de materiales lignocelulósicos en México”**

---

Dr. Fernando Israel Gómez Castro  
Director de tesis

---

Dr. José María Ponce Ortega  
Co-director de tesis

Miembros del Jurado del Examen de Titulación para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Química con el trabajo titulado:

**“Optimización de la cadena de suministro para la producción de derivados de materiales lignocelulósicos en México”**

SINODALES:

**Presidente.**

Dr. Salvador Hernández Castro

**Secretario.**

Dr. Juan Gabriel Segovia Hernández

**Vocal.**

Dr. Fabricio Omar Barroso Muñoz

**Suplente.**

Dr. Ricardo Morales Rodríguez



---

## “Optimización de la cadena de suministro para la producción de derivados de materiales lignocelulósicos en México”

Presenta: Yulissa Mercedes Espinoza Vázquez

Director: Dr. Fernando Israel Gómez Castro

Co-Director: Dr. José María Ponce Ortega

### Resumen

Debido a la creciente preocupación por el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, así como el agotamiento de las reservas petroleras, los biocombustibles han cobrado gran importancia. Siendo la actividad humana, principalmente en los sectores industrial y de transporte, una de las causas principales del panorama anterior. Por ello, esta tesis de maestría se enfoca en la cadena de suministro asociada a la producción de biocombustibles para el sector transporte, particularmente el terrestre. La biomasa lignocelulósica es una materia prima para producir biocombustibles y bioproductos. Por lo tanto, el uso adecuado de tales materiales puede ayudar al desarrollo de una industria de base renovable, además de dar un segundo uso a dicho material.

México es un país con una alta producción agrícola, lo que implica una alta producción de residuos agrícolas. Dado que existen muchas posibilidades para hacer uso de los residuos, la pregunta que surge es: ¿cuál es la mejor estrategia para el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica disponible en el país? Para responder a esta pregunta, esta tesis propone el desarrollo de un modelo matemático para la cadena de suministro de la producción de biocombustibles y bioproductos. Este modelo se trata de un problema de optimización multi-objetivo a través de programación disyuntiva generalizada (GDP, por sus siglas en inglés) con manejo de restricciones tomando en cuenta la incertidumbre que surge al ser la materia prima y la demanda, variables anuales. El modelo GDP se relaja y se resuelve en su forma mixto entero lineal (MILP, por sus siglas en inglés) equivalente, empleando el software GAMS. A través de este modelo se analizarán distintos escenarios, considerando objetivos económicos, ambientales, hídricos y sociales.



---

## Abstract

Due to the growing concern about the increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere, as well as the depletion of oil reserves, biofuels have become very important. One of the main causes of that scenario is human activity, with a strong contribution by the industrial and transport sectors. Therefore, this Master degree thesis is focused on the supply chain associated with the production of biofuels for the transport sector, particularly the land transport sector. Lignocellulosic biomass is a raw material used to produce biofuels and bioproducts. Therefore, the appropriate use of such materials can help the development of a renewable-based industry, while giving a second use to such material.

Mexico is a country with a wide agricultural production, which implies a high production of agricultural residues. Since there are many possibilities to make use of the residues, the question that arises is: what is the best strategy for the use of the lignocellulosic biomass available in the country? To answer this question, this research thesis proposes the development of a mathematical model for the supply chain of the production of biofuels and bioproducts. This model leads to a multi-objective optimization problem through generalized disjunctive programming (GDP) with constraints handling, taking into account the uncertainty that arises from the fact that the raw material and the demand show annual variations. The GDP model is relaxed and solved on its equivalent mixed-integer linear problem (MILP) form, using the GAMS software. Through this model different scenarios are analyzed, considering economic, environmental, water and social objectives.



---

## Agradecimientos

A Dios, por iluminar cada uno  
de mis pasos en este trayecto.

A mi abuelita, mi motor de vida, por ti  
cada día aspiro a ser alguien mejor. A mis  
papás: Mary y Luis, jamás podré  
pagarles todo lo que han hecho por mi.

A mis hermanos, espero logren sus metas  
y siempre añoren más de lo que ya tienen.

A mi familia, que estuvo presente en el  
desarrollo de mi tesis, les agradezco sinceramente.

A mi novio, Jahaziel, gracias por estar  
ahí cuando te necesitaba y apoyarme  
cuando ya no veía la salida. Sabes que no  
fue sencillo culminar este proyecto, sin embargo,  
siempre me motivaste y siempre me decías que  
lo lograría. Me ayudaste hasta donde te era  
posible y más que eso. ¡Muchas gracias, mi amor!

A mis amigos, que en la distancia siguieron apoyandome, les agradezco mucho. A mis colombianos favoritos Jen y Mario, un placer haber conocido a personas tan maravillosas, todo el tiempo presentes.

Al Dr. José María Ponce, por su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo, siempre presente.

En forma especial, quiero agradecer al Dr. Fernando Gómez, por haberme aceptado como miembro del equipo de trabajo, por su conocimiento, apoyo y confianza en estos años de trabajo.

A todas las personas que de  
una u otra manera contribuyeron en el  
desarrollo de este proyecto.  
¡Gracias!



# Índice general

	Página
Resumen	7
Abstract	7
Agradecimientos	7
Índice de Figuras	9
Índice de Tablas	9
<b>1. Introducción</b>	<b>16</b>
1.1. Biomasa: Residuos agrícolas . . . . .	17
1.2. Biocombustibles: Bioetanol y biobutanol . . . . .	19
1.3. Productos de alto valor agregado: ácido levulínico y furfural . . . . .	20
1.4. Optimización de la cadena de suministro . . . . .	22
1.5. Hipótesis, objetivos y justificación . . . . .	23
1.5.1. Hipótesis . . . . .	23
1.5.2. Objetivo general . . . . .	23
1.5.3. Objetivos específicos . . . . .	23
1.5.4. Justificación . . . . .	24
<b>2. Antecedentes</b>	<b>25</b>



---

2.1. Biocombustibles a partir de biomasa . . . . .	25
2.2. Bioproductos producidos por biomasa . . . . .	27
2.3. Cadenas de suministro para la producción de biocombustibles . . . . .	28
2.4. Economía y sostenibilidad . . . . .	30
<b>3. Metodología</b>	<b>32</b>
3.1. Modelado de la cadena de suministro . . . . .	32
3.1.1. Superestructura . . . . .	32
3.1.2. Generación de información . . . . .	33
3.1.3. Modelo matemático: Programación Disyuntiva Generalizada . . . . .	36
3.2. Definición de escenarios para los modelos propuestos . . . . .	42
3.2.1. Escenario de estudio I . . . . .	42
3.2.2. Escenario de estudio II . . . . .	43
3.2.3. Escenario de estudio III . . . . .	44
3.2.4. Escenario de estudio IV . . . . .	44
3.2.5. Escenario de estudio V . . . . .	44
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>45</b>
4.1. Escenario I: Análisis de incertidumbre . . . . .	45
4.2. Escenario II: Máxima producción de bioetanol . . . . .	49
4.3. Escenario III: Máxima producción de biobutanol . . . . .	56
4.4. Escenario IV. Frente de Pareto: Enfoque en bioetanol . . . . .	63
4.5. Escenario V. Frente de Pareto: Enfoque en biobutanol . . . . .	69
<b>5. Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>75</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	75
5.2. Trabajo a futuro . . . . .	76
<b>Nomenclatura</b>	<b>77</b>



---

Bibliografía	79
Apéndices	88
A. Programación Disyuntiva Generalizada GDP	88
B. Disponibilidad de materia prima	90
C. Método de restricción $\varepsilon$	95
D. Código del modelo matemático programado en GAMS	97



# Índice de Figuras

1.1. Emisiones de CO <sub>2</sub> . . . . .	17
1.2. Representación gráfica de residuos agrícolas en México . . . . .	18
1.3. Contenido comparativo de celulosa, hemicelulosa, lignina y ceniza como porcentaje de fibra presente en residuos agrícolas . . . . .	18
2.1. Las tres dimensiones de la sostenibilidad . . . . .	31
3.1. Superestructura de la cadena de suministro . . . . .	33
3.2. Disponibilidad total de materia prima lignocelulósica por año: a)cebada, b)maíz, c)sorgo, d)trigo . . . . .	34
3.3. Representación pictórica de la distribución de los cultivos en México . . . . .	34
3.4. Demanda anual de los productos estudiados: a)biobutanol, b)bioetanol, c)ácido levulínico, d)furfural . . . . .	35
4.1. Demanda satisfecha de ácido levulínico, Escenario I . . . . .	46
4.2. Contribución para cada materia prima de las diferentes fuentes, Escenario I, a)2015, b)2016, c)2017, d)2018, primavera-verano . . . . .	47
4.3. Contribución para cada materia prima de las diferentes fuentes, Escenario I, a)2015, b)2016, c)2017, d)2018, otoño-invierno . . . . .	47
4.4. Cadena de suministro final, Escenario I, 2018, primavera-verano . . . . .	48
4.5. Cadena de suministro final, Escenario I, 2018, otoño-invierno . . . . .	48
4.6. Variación de la ganancia máxima, Escenario I . . . . .	49
4.7. Cobertura máxima de la demanda de bioetanol, Escenario II . . . . .	50



---

4.8. Demanda satisfecha de bioetanol y ácido levulínico, Escenario II, a)bioetanol, primavera-verano, b)bioetanol, otoño-invierno, c)ácido levulínico, primavera-verano, d)ácido levulínico, otoño-invierno . . . . .	51
4.9. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guanajuato en la temporada primavera-verano, Escenario II, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018 . . . . .	52
4.10. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Veracruz en la temporada primavera-verano, Escenario II, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018 . . . . .	52
4.11. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guanajuato en la temporada otoño-invierno, Escenario II, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018 . . . . .	53
4.12. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Veracruz en la temporada otoño-invierno, Escenario II, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018	54
4.13. Cadena de suministro final, Escenario II, 2018, primavera-verano . . . . .	54
4.14. Cadena de suministro final, Escenario II, 2018, otoño-invierno . . . . .	55
4.15. Variación de la ganancia máxima, Escenario II . . . . .	55
4.16. Cobertura máxima de la demanda de biobutanol, Escenario III . . . . .	56
4.17. Demanda satisfecha de biobutanol, Escenario III, a)biobutanol de Guanajuato, primavera-verano, b)biobutanol de Guanajuato, otoño-invierno, c)biobutanol de Baja California, primavera-verano, d)biobutanol de Baja California, otoño-invierno . . . . .	57
4.18. Demanda satisfecha de ácido levulínico, Escenario III, a)primavera-verano, b)otoño-invierno . . . . .	58
4.19. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guanajuato en la temporada primavera-verano, Escenario III, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018 . . . . .	59
4.20. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Baja California en la temporada primavera-verano, Escenario III, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018 . . . . .	59



4.21. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guajuato en la temporada otoño-invierno, Escenario III, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018 . . . . .	60
4.22. Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Baja California en la temporada otoño-invierno, Escenario III, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018 . . . . .	60
4.23. Cadena de suministro final, Escenario III, 2018, primavera-verano . . . . .	61
4.24. Cadena de suministro final, Escenario III, 2018, otoño-invierno . . . . .	62
4.25. Variación de la ganancia máxima, Escenario III . . . . .	62
4.26. Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Impacto Ambiental, Escenario IV . . . . .	63
4.27. Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario IV . . . . .	64
4.28. Impacto Ambiental Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario IV . . . . .	64
4.29. Impacto Social Vs. Huella hídrica Vs. Impacto Ambiental, Escenario IV . . . . .	65
4.30. Frente de pareto final, Escenario IV . . . . .	66
4.31. Demanda satisfecha por mercado, Escenario IV . . . . .	66
4.32. Fracción de la demanda satisfecha por planta, Escenario IV . . . . .	67
4.33. Materia prima utilizada, Escenario IV . . . . .	67
4.34. Fracción de materia prima utilizada por planta, Escenario IV . . . . .	68
4.35. Cadena de suministro final, Escenario IV . . . . .	68
4.36. Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Impacto Ambiental, Escenario V . . . . .	69
4.37. Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario V . . . . .	70
4.38. Impacto Ambiental Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario V . . . . .	70
4.39. Impacto Social Vs. Huella hídrica Vs. Impacto Ambiental, Escenario V . . . . .	71
4.40. Frente de pareto final, Escenario V . . . . .	71
4.41. Demanda satisfecha por mercado, Escenario V . . . . .	72
4.42. Fracción de la demanda satisfecha por planta, Escenario V . . . . .	72
4.43. Materia prima utilizada, Escenario V . . . . .	73
4.44. Fracción de materia prima utilizada por planta, Escenario V . . . . .	73
4.45. Cadena de suministro final, Escenario V . . . . .	74



---

C.1. Diagrama de flujo para solución de problema multiobjetivo . . . . .	95
--	----



# Índice de Tablas

1.1. Características del biobutanol, bioetanol y gasolina . . . . .	20
2.1. Bioetanol a partir de biomasa . . . . .	26
2.2. Productos de alto valor agregado a partir de biomasa. Modificado de (Susmozas y col., 2020) . . . . .	27
3.1. Demanda nacional de biocombustibles y productos de alto valor agregado en México (kt/año) . . . . .	35
3.2. Costos de producción y rendimientos . . . . .	37
3.3. Ecoindicadores unitarios usados . . . . .	40
3.4. Requerimientos energéticos para el procesamiento de productos . . . . .	40
3.5. Agua disponible en cada planta . . . . .	40
3.6. Requerimientos hídricos para el procesamiento de productos . . . . .	41
3.7. Trabajos generados por kt de cada materia prima considerada hacia cada producto . . . . .	41
4.1. Uso total de materia prima, Escenario I . . . . .	46
4.2. Uso total de materia prima, Escenario II . . . . .	51
4.3. Uso total de materia prima, Escenario III . . . . .	58
4.4. Uso de la materia prima en la instalación de Guanajuato, Escenario III . . . . .	61
4.5. Límites de funciones objetivo, Escenario IV . . . . .	63
4.6. Límites de funciones objetivo, Escenario V . . . . .	69
4.7. Comparación de funciones objetivo entre Escenario IV y V . . . . .	74



---

B.1. Disponibilidad de residuos de sorgo (kt/año) . . . . .	90
B.2. Disponibilidad de residuos de trigo (kt/año) . . . . .	91
B.3. Disponibilidad de residuos de cebada (kt/año) . . . . .	92
B.4. Disponibilidad de residuos de maíz (kt/año) . . . . .	93



# Capítulo 1

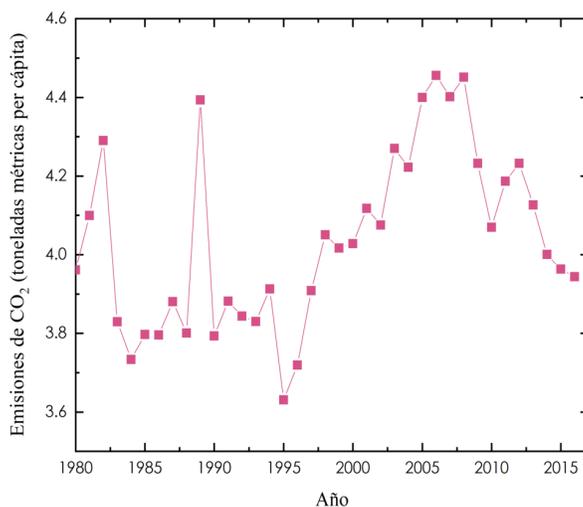
## Introducción

El uso de combustibles fósiles para obtener energía ha tenido un impacto enorme para la humanidad y el medio ambiente, desde la contaminación del aire y el agua hasta el calentamiento global. El autotransporte es uno de los sectores más contaminantes en México. El consumo de gasolina y diésel son la principal fuente de las emisiones de CO<sub>2</sub> (Reyes y col., 2010). Tan solo en el país se consumen cerca de 190 millones de litros de gasolina todos los días, convirtiendo al país en el cuarto consumidor más grande del mundo, según cifras de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (Jaramillo, 2019). En el año 2012, el transporte representó 39% de las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la producción y uso de energía. Tal como puede verse en la Figura 1.1, existe un incremento considerable en las emisiones de gases de efecto invernadero del sector transporte a través de los años (Solís y Sheinbaum, 2016). Aunado a esto, resulta importante destacar que el tiempo que tardarían en terminarse el petróleo y el gas en México, al ritmo de la producción actual con las reservas probadas con 90% de posibilidades de ser extraídas, es de 8.5 años al 1 de enero del 2019 (García, 2019). Para combatir estas problemáticas, se ha propuesto el uso de biocombustibles. Estos se obtienen a partir de biomasa renovable (Demirbas, 2017) y se espera que muestren menores emisiones de gases de efecto invernadero que los combustibles fósiles.

Es importante mencionar que los biocombustibles pueden ser de primera generación, que consiste en el uso de cultivos primarios, sin embargo, este esquema de producción ha generado gran controversia debido a que forman parte de la cadena alimenticia, entrando en un conflicto ético. Por ello, los esfuerzos de investigación se han enfocado en los biocombustibles de segunda generación, que son los obtenidos a partir de varios tipos de biomasa, generalmente de residuos agrícolas y de los de tercera generación, cuya producción se basa en la filosofía de aprovechar plantas acuáticas. Los biocombustibles de segunda generación son muy prometedores para abordar algunos de los principales desafíos para lograr una sociedad sostenible,



como el cambio climático global, la seguridad energética y el uso de la tierra (alimentos frente a combustibles). Es decir, son más adecuados para abordar estos desafíos porque sus materias primas están o pueden estar ampliamente disponibles y no se usan para la alimentación.



**Figura 1.1:** Emisiones de CO<sub>2</sub> (Agencia Internacional de Energía, 2019).

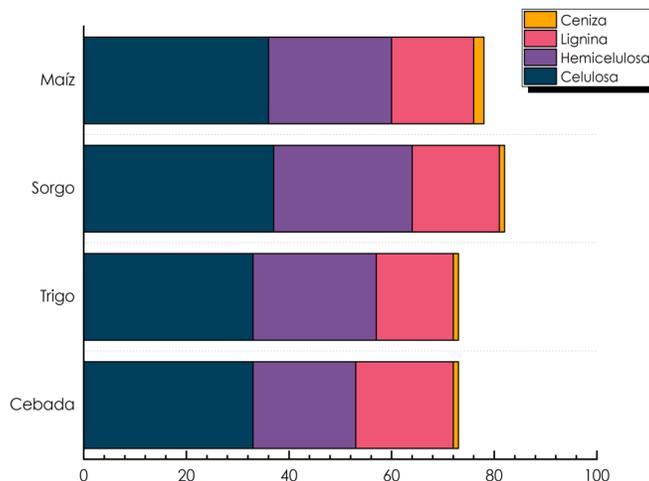
## 1.1. Biomasa: Residuos agrícolas

La biomasa tiene un gran potencial para proporcionar materia prima para fabricar una amplia gama de productos químicos y materiales. Generalmente, la biomasa lignocelulósica se compone de 38-50 % de celulosa, 23-32 % de hemicelulosa y 15-25 % de lignina (Popa, 2018). En México, existe un potencial para la producción de biocombustibles, proveniente principalmente de residuos de maíz, caña de azúcar, sorgo, trigo y cebada, cuya distribución se muestra en la Figura 1.2. Más del 50 % de los residuos se utilizan para protección del suelo, 27 % para alimentar el ganado y 20 % se quema (Damián-Huato y col., 2013). Cabe mencionar que, la quema de biomasa se reconoce como una importante fuente mundial de emisiones que contribuyen en un 40 % al dióxido de carbono bruto y en un 38 % al ozono troposférico (Levine, 1991). En el 2006, se reportó una producción de residuos agrícolas de 75.73 millones de toneladas (Saval, 2012). Por ello, existe un principal interés en evaluar el potencial energético de residuos que tienen baja calidad alimenticia, los cuales son mayormente quemados en campo.



**Figura 1.2:** Representación gráfica de residuos agrícolas en México.

Tal como se observa en la Figura 1.2, existe una heterogénea distribución geográfica de los residuos. Esto conlleva a evaluar el consumo de dichos residuos en demandas localizadas y a pequeña escala o bien, profundizar en el estudio de logística de transporte de biocombustibles procesados. Dentro de los residuos estudiados están: sorgo, trigo, maíz y cebada. Estos cuatro cultivos, aparte de ser abundantes en el país, cuentan con composiciones similares de celulosa y hemicelulosa, como se muestra en la Figura 1.3.



**Figura 1.3:** Contenido comparativo de celulosa, hemicelulosa, lignina y ceniza como porcentaje de fibra presente en residuos agrícolas (Chuck-Hernández y col., 2011).

El aprovechamiento de residuos de cosecha con fines energéticos implica considerar,



además de sus usos alternativos, otros aspectos, tales como: estabilidad del suelo, prácticas de cosecha, manejo y almacenamiento, y viabilidad de sustitución de combustibles (Hiloidhari y col., 2014). También son importantes las consideraciones técnicas, debido a que la biomasa agrícola como combustible es relativamente difícil de usar y generalmente requiere ser sometida a un pretratamiento, ya que no es homogénea, contiene elevados porcentajes de humedad y es de baja densidad energética.

## 1.2. Biocombustibles: Bioetanol y biobutanol

El etanol o alcohol etílico es el más conocido de los alcoholes y puede obtenerse por procesos químicos a partir del etileno, o bien por procesos bioquímicos empleando azúcares fermentables provenientes de la caña de azúcar, cultivos con almidón, celulosa y otras formas de biomasa. Al etanol producido a partir de biomasa se le conoce como bioetanol (García y Masera, 2016). El primer paso en la conversión de biomasa en bioetanol es reducción de tamaño y pretratamiento. Los polímeros de hemicelulosa y celulosa se hidrolizan con enzimas o ácidos para liberar azúcares monoméricos. Los azúcares de las etapas de pretratamiento e hidrólisis enzimática son fermentados por bacterias o levaduras como *Saccharomyces cerevisiae* (Lee y col., 2017), aunque la hidrólisis enzimática y la fermentación también se pueden realizar en una etapa combinada, la denominada sacarificación y fermentación simultáneas (SSF). Después de la purificación final, el bioetanol está listo para ser utilizado como combustible, puro o mezclado con gasolina (Hahn-Hägerdal y col., 2006).

El bioetanol se utiliza principalmente en mezclas con gasolina y presenta varias ventajas, entre ellas: a) mayor octanaje y b) es un oxigenante que puede sustituir a otros que tienen impactos negativos en la salud y el medio ambiente como es el caso del éter metil terbutílico (MTBE). Sin embargo, su poder calorífico es 30 % más bajo que el de la gasolina, lo que implica un mayor consumo específico, tanto en volumen como en masa. Existen diversos lineamientos para establecer las especificaciones de calidad y características para bioetanol, en los cuales se indica que la pureza del mismo debe de estar en el rango de 92.1 % a 100 % y cumplir los lineamientos de las Tablas 1a y 1b del Diario Oficial de la Federación, de acuerdo con la NOM-16 (Diario Oficial de la Federación, 2018). No obstante, no se recomienda utilizar directamente bioetanol en motores existentes, por lo que se mezcla con gasolina, con un contenido máximo de 10 % vol de bioetanol (Costagliola y col., 2016).

Por otra parte, el biobutanol es también un alcohol, por ende, posee un grupo hidroxilo (OH) enlazado a uno de los átomos de carbono primario que tiene. El proceso de producción de este biocombustible es similar al del bioetanol, sin embargo, este es obtenido a través de



la fermentación con la levadura *Clostridium acetobutylicum* (Qi y col., 2018). El butanol es capaz de formar diferentes estructuras, ya sea lineal o ramificada, y por ello se forman diferentes isómeros de cadena dependiendo de donde se encuentre ubicado el grupo hidroxilo. El isómero utilizado como aditivo para la gasolina y que resulta después de la fermentación del material lignocelulósico es el n-butanol, por eso es el que se debe comparar frente al bioetanol y la gasolina, tal como se muestra en la Tabla 1.1 (Moreno y Cubillos Lobo, 2017).

**Tabla 1.1:** Características del biobutanol, bioetanol y gasolina.

	Biobutanol	Bioetanol	Gasolina
Densidad kg/m <sup>3</sup>	809.8	790	720-780
Número de octano	96	108	80-99
Temperatura de ebullición (°C)	117.7	78.4	25-215
Entalpía de vaporización (kJ/kg)	582	904	380-500
Temperatura de autoignición (°C)	343	434	300
Contenido de oxígeno (% peso)	21.6	34.8	-
Límite de inflamabilidad (% vol)	1.4-11.2	4.3-19	0.6-8
Densidad (mPa a 25°C)	2.544	1.08	0.4-0.8

De igual manera, la norma ASTM D7862 establece un estándar de calidad del biobutanol con el objeto de regular su producción y comercialización. Dicha norma está destinada a mezclas de biobutanol con gasolina de 1 a 12.5 volúmenes porcentuales, como combustible para motores de encendido por chispa. Como combustible alcanza el 90 % de energía que el mismo volumen de gasolina, mientras que el mismo volumen de bioetanol no excede del 65 %. Sin embargo, presenta diversas limitantes para el escalamiento a nivel industrial. Entre las principales limitantes se encuentran: el biobutanol generado es tóxico para las bacterias, ocasionando un lento crecimiento y baja densidad celular durante la fermentación solvatogénica, que conlleva a una baja productividad del mismo y bajos rendimientos. El uso de biobutanol en motores es recomendado en mezclas con gasolina de alrededor del 16 % (Zhang y col., 2016).

### 1.3. Productos de alto valor agregado: ácido levulínico y furfural

La producción industrial de bioetanol o biobutanol no es económicamente competitiva (Carrillo-Nieves y col., 2019). Por lo tanto, además de la producción de biocombustibles, la generación de productos de alto valor agregado en un esquema de biorrefinería es obligatoria



para mejorar el potencial económico de la industria basada en la biomasa. Entre los muchos productos potenciales de alto valor agregado se encuentra el ácido levulínico, esta es una elección interesante ya que es una molécula plataforma para una diversidad de productos como ésteres de levulinato, ácido succínico,  $\gamma$ -valerolactona y sus derivados, entre otros (Pileidis y Titirici, 2016). El ácido levulínico se produce mediante el tratamiento de la biomasa en presencia de ácidos minerales o catalizadores ácidos heterogéneos (Ya'aini y col., 2012). El Programa de Biomasa del Departamento de Energía de los Estados Unidos en 2004 consideró al ácido levulínico como uno de los 12 productos químicos para plataformas biológicas más prometedores (Signoretto y col., 2019). A pesar de su gran potencial como plataforma química básica, el ácido levulínico nunca se ha producido en un volumen significativo. Esto debido a que su rendimiento se reduce significativamente debido a la formación de subproductos no deseados (Galletti y col., 2012). El proceso Biofine representa una de las tecnologías más famosas actualmente reivindicadas para la producción industrial de ácido levulínico (Hayes y col., 2006). El proceso Biofine implica el uso de ácido sulfúrico diluido como catalizador, pero se diferencia de otras tecnologías de fraccionamiento lignocelulósico de ácido diluido en que los azúcares monoméricos libres no son el producto (Kamm y col., 2006).

Otro producto de alto valor agregado es el furfural, que es una plataforma para otros productos de importancia industrial, como el alcohol furfurílico, tetrahydrofurano, anhídrido maleico, entre otros (Dalvand y col., 2018; Bhogeswararao y Srinivas, 2015). El furfural puede obtenerse mediante la hidrólisis de hemicelulosas y la deshidratación de los azúcares resultantes (Mamman y col., 2008; Dutta y col., 2012). En un estudio realizado por el Departamento de Energías Renovables de Estados Unidos, el furfural fue seleccionado como uno de los 30 principales químicos que se pueden fabricar a partir de biomasa (Cai y col., 2014). El proceso Quaker Oats es la forma comercial más antigua de producir furfural industrialmente (Romero-García y col., 2019). El proceso consta de dos pasos, primero la zona de reacción en la que la biomasa reacciona con una solución de ácido sulfúrico para convertir la fracción de xilano en furfural, luego se introduce una alta corriente de vapor en el reactor para eliminar el furfural lo más rápido posible con el fin de evitar la polimerización del furfural. La corriente de vapor del reactor se condensa para alimentar las secuencias de destilación azeotrópica con el fin de eliminar el exceso de agua y algunos subproductos como metanol y ácido acético (Zeitsch, 2000).



## 1.4. Optimización de la cadena de suministro

Como se mencionó anteriormente, la producción de combustibles renovables puede no ser rentable por sí misma, el uso de materiales lignocelulósicos para producir biocombustibles y bioproductos puede mejorar la economía de la industria de los biocombustibles. Sin embargo, entre los diferentes biocombustibles y bioproductos que se pueden obtener de la biomasa lignocelulósica, una combinación dada de productos debe tener la mayor rentabilidad, utilizando la mayor cantidad de residuos posible y satisfaciendo parte o toda la demanda. Para ello, una cadena de suministro óptima se debe de definir para encontrar el mejor equilibrio entre la escala de producción y el costo de transporte (de Jong y col., 2017). Para lograr este objetivo, se plantea el uso de un modelo de optimización matemática, dicho modelo consiste en una o más funciones objetivo y un conjunto de restricciones en la forma de un sistema de ecuaciones (Arsham, 1994). A su vez, un problema de optimización matemática es aquel en el que alguna función se maximiza o minimiza en relación con un conjunto dado de alternativas, esta es la llamada función objetivo y las alternativas están delimitadas por un conjunto de restricciones. El objetivo de la optimización es encontrar la mejor solución de modelos de decisiones, donde el modelo de optimización puede ser lineal (LP, por sus siglas en inglés), no lineal (NLP, por sus siglas en inglés), mixto entero lineal (MILP, por sus siglas en inglés) o mixto entero no lineal (MINLP, por sus siglas en inglés); dependiendo del tipo de función objetivo, restricciones y/o variables de decisión. Dada la toma de decisiones implicada en la optimización de cadenas de suministro, lo cual implica un manejo de variables binarias, este tipo de problemas se presentan como MILP o MINLP.

La programación disyuntiva generalizada (GDP, por sus siglas en inglés) se ha propuesto como un modelo alternativo al problema MINLP que utiliza disyunciones y proposiciones (Raman y Grossmann, 1994). El modelo GDP permite una combinación de ecuaciones algebraicas y lógicas, lo que facilita la representación de decisiones discretas. Türkay y Grossmann (1996) propusieron un algoritmo de aproximación externa basado en lógica para resolver problemas de GDP no lineales para redes de procesos que involucran dos términos en cada disyunción. En general, el modelo GDP incluye variables booleanas, disyunciones y proposiciones lógicas, como se muestra en el Apéndice A.

A veces la optimización de un objetivo no da la mejor solución. En estos casos, lo mejor es utilizar la optimización multiobjetivo, es decir, optimizar para varios objetivos al mismo tiempo. La optimización multiobjetivo (también conocida como programación multiobjetivo u optimización de Pareto) es un área de toma de decisiones multicriterio, relativa a problemas de optimización matemática que involucran a más de un funciones objetivas para ser optimizadas



simultáneamente (Chang, 2014). Normalmente todos los problemas de la cadena de suministro se caracterizan por decisiones que son conflictivas por naturaleza. El modelado de estos problemas utilizando múltiples objetivos da a quien toma las decisiones un conjunto de soluciones óptimas de Pareto entre las que elegir (Pinto, 2004).

## **1.5. Hipótesis, objetivos y justificación**

### **1.5.1. Hipótesis**

La materia prima lignocelulósica disponible en México tiene el potencial para obtener biocombustibles y bioproductos que satisfagan parte de la demanda, generando ganancia e impacto social, reduciendo a su vez el impacto ambiental y la huella hídrica, a través de la optimización multiobjetivo de la cadena de suministro por medio de modelos matemáticos de programación disyuntiva generalizada.

### **1.5.2. Objetivo general**

Desarrollar un modelo matemático que represente la cadena de suministro asociada a la instalación de biorrefinerías para la producción de biocombustibles y productos de alto valor agregado, con la finalidad de establecer un esquema de producción sostenible y con alto impacto social, reduciendo a su vez el impacto ambiental debido al uso de combustibles fósiles, contemplando las variaciones en la disponibilidad de materia prima y la demanda de los productos.

### **1.5.3. Objetivos específicos**

1. Generar una base de los datos involucrados en el proceso de producción de biocombustibles y productos de alto valor agregado a partir de materia prima renovable con alto potencial de producción en México.
2. Generar un modelo GDP y su equivalente MILP que represente la cadena de suministro.
3. Diseñar el algoritmo que permita la evaluación de los objetivos planteados para la elección de solución óptima, mediante la optimización multiobjetivo en el software GAMS.



4. Analizar las posibles incertidumbres debido a la variación de disponibilidad de materia prima y demanda de productos.

#### **1.5.4. Justificación**

El bioetanol y biobutanol son combustibles renovables, tienen el potencial de reducir el impacto ambiental en el sector transporte. Sin embargo, su costo es alto en comparación con el de la gasolina. Por lo tanto, se requiere encontrar alternativas para reducir su costo de producción y generar ganancias. Por otra parte, México es un país con alta producción agrícola, no obstante, debido al exceso del mismo, suele quemarse por los agricultores, generando gases de efecto invernadero. Por ello, en este proyecto se analizarán algunas de las alternativas que México ofrece en términos de biomasa lignocelulósica, ya que dichos residuos tienen el potencial de utilizarse para producir biocombustibles así como bioproductos simultáneamente, fortaleciendo el esquema de producción. Estableciendo una cadena de producción, a través de la definición de una cadena de suministro óptima y sostenible. Es importante mencionar que, comparado con los estudios previos en el aspecto de cadenas de suministro, este proyecto se enfoca en la producción no solo de biocombustibles, sino de productos de alto valor agregado. Así mismo, incluye el análisis de objetivos sociales e hídricos, que no se han tomado en cuenta y resultan importantes en el país.



## Capítulo 2

### Antecedentes

Con el aumento del consumo de energía en el mundo, se ha puesto especial atención en el desarrollo de energía neutra en carbono y fuentes sostenibles para satisfacer las necesidades futuras. Los biocombustibles son un sustituto atractivo de los actuales combustibles basados en el petróleo porque pueden ser utilizados como combustibles para el transporte con cambios menores en las tecnologías actuales; también tienen un potencial significativo para mejorar la sostenibilidad y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Dahman y col., 2019). En este capítulo se mostrarán los antecedentes que se tienen en este aspecto, así como en cadenas de suministro para el abastecimiento de los mismos. Finalmente, se puntualizará la importancia de la economía y sostenibilidad en el desarrollo de las cadenas de suministro y procesos.

#### 2.1. Biocombustibles a partir de biomasa

La producción de biocombustibles comprende la obtención de combustibles a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos. La mayor parte de los esfuerzos se han enfocado en producir los biocombustibles a partir de biomasa, que es una fuente abundante y renovable de materiales ricos en energía que, si se utiliza de manera eficiente, puede ser convertida por vías químico-biológicas en biocombustibles limpios para proporcionar servicios energéticos adicionales y como una opción importante en la política de mitigación del cambio climático (Prasad y col., 2012). Dentro de los combustibles producidos a partir de biomasa se encuentran el biobutanol y bioetanol. El bioetanol tiene un mayor índice de octano y, en relación con la gasolina sola, su uso mezclado con la gasolina reduce la emisión de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e hidrocarburos después de la combustión. El uso de bioetanol



muestra una alta relación de compresión y una mayor producción de energía en el motor de combustión (Shah y Rehan, 2014). La producción de bioetanol incluye tres procesos: 1) pretratamiento para separar la hemicelulosa y la lignina de la celulosa; 2) hidrólisis de la celulosa para obtener azúcares fermentables; y 3) fermentación para convertir los azúcares en bioetanol, seguida de destilación para separar y purificar el bioetanol (Rocha-Meneses y col., 2017). Se puede obtener generalmente de tres fuentes: a) materiales a base de almidón (trigo, maíz y cebada), b) materiales que contienen sacarosa (sorgo dulce, caña de azúcar) y c) biomasa lignocelulósica (paja de madera, rastrojo, etc.) (Balat y Balat, 2009).

El desafío de procesamiento más importante en la producción de biocombustibles es el pretratamiento de la biomasa. La biomasa lignocelulósica está compuesta por tres componentes principales: hemicelulosa, lignina y celulosa. Los métodos de pretratamiento se refieren a la solubilización y separación de uno o más de estos componentes de la biomasa. Los métodos de pretratamiento químico implican el uso de ácido diluido, amoníaco, disolvente orgánico,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  u otros productos químicos. Estos métodos son fáciles de operar y tienen un buen rendimiento de conversión en un corto período de tiempo, tal como se muestran en la Tabla 2.1 (Sarkar y col., 2012).

**Tabla 2.1:** Bioetanol a partir de biomasa.

Materia Prima	Pretratamiento utilizado	Rendimiento	Referencia
Rastrojo de maíz	Ácido diluido	289 l/Mg	(Kazi y col., 2010)
Paja de cebada	Continuo con NaOH	46 g/l	(Han y col., 2013)
Rastrojo de maíz	Vapor catalizado por $\text{SO}_2$	215 L/ton	(Sassner y col., 2008)

Por otra parte, el biobutanol, también producido por biomasa, es un biocombustible que posee mejores atributos con respecto al bioetanol, como una mayor densidad energética, mayor miscibilidad con el gasóleo y una menor presión de vapor, lo que favorece su compatibilidad con los combustibles convencionales (Rocha-Meneses y col., 2017). A pesar de contar con varias ventajas, existen algunos problemas en la producción de biobutanol, como lo es el bajo rendimiento de la producción y la alta tasa de sustrato. Por ello, se han realizado diversos pretratamientos para la optimización del proceso, por ejemplo, biobutanol producido a partir de paja de trigo en cultivos por lotes con *Clostridium beijerinckii*, obteniendo 47.6 g/L (Qureshi y col., 2007). Por otra parte, estudios con ácido sulfúrico diluido para la producción de biobutanol, mostraron la capacidad para producir alrededor de 113.4 millones de L/año (Baral y Shah, 2016).

Los precios actuales de los combustibles fósiles son el principal factor limitante para la comercialización de los biocombustibles. Sin embargo, en general, los sistemas de producción



de biocombustibles de segunda generación requieren un equipo de procesamiento más sofisticado, una mayor inversión por unidad de capacidad de producción e instalaciones de mayor escala (Larson, 2008). Por consiguiente, los costos de producción de los biocombustibles deben reducirse considerablemente para crear un mercado sostenible. Las biorrefinerías han aparecido como enfoques prometedores para reducir estos costos de producción. Las biorrefinerías son análogas a las refinerías de petróleo, en las que tanto los productos de alto valor agregado (por ejemplo, alimentos, productos químicos y materiales) como los biocombustibles pueden obtenerse simultáneamente a partir de recursos de biomasa dentro de un enfoque integrado eficiente (Susmozas y col., 2020).

## 2.2. Bioproductos producidos por biomasa

El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) ha identificado varios productos químicos básicos prometedores desde el punto de vista tecnológico y económico, entre ellos el glicerol, ácido láctico, furfural, ácido fumárico, furfural, entre otros (Werpy y Petersen, 2004; Signoretto y col., 2019). De manera general, en la Tabla 2.2, se muestran los principales bioproductos producidos a partir de biomasa y su aplicación.

**Tabla 2.2:** Productos de alto valor agregado a partir de biomasa. Modificado de (Susmozas y col., 2020).

Producto	Proceso de producción	Aplicación
Ácido Láctico	Fermentación láctica principalmente con bacterias	Cosméticos, solvente, regulador de acidez
Ácido succínico	Fermentación de levadura con bajo pH	Plastificantes, poliuretanos, resinas
Ácido levulínico	Isomerización de glucosa a fructosa	Pesticida, lubricante, aditivo alimentario
Furfural	Deshidratación de xilosa o arabinosa	Producción de alcohol furfurílico, solvente

Dentro de este tema, es importante mencionar la producción de furfural, la cuál es una prometedora plataforma química renovable para producción de bioquímicos y biocombustibles de bajo costo y abundante biomasa lignocelulósica. El furfural es un precursor natural a productos químicos basados en el furano y se fabrica principalmente a partir de la hidrólisis catalizada por el ácido y la deshidratación de la lignocelulosa a temperaturas moderadas (Cai y col., 2014). Debido a sus pocos avances en la optimización de los procesos de producción de furfural, se debe buscar la co-producción de otros productos de valor agregado. Ejemplo de ello, es el ácido levulínico, el cuál se puede obtener mediante la hidratación y la



hidrólisis rápida catalizada por ácido diluido de la materia prima lignocelulósica (Tacchini y col., 2020). El ácido levulínico se propone para un gran número de aplicaciones y gracias a su versatilidad, está clasificado como uno de los doce principales productos químicos de alto valor agregado a partir de materias primas de biomasa (Lanziano y col., 2018).

Teniendo en cuenta todos los diferentes productos que pueden obtenerse, el enfoque de biorrefinería avanzada abre muchas oportunidades para la producción de biocombustibles en conjunto con cientos de productos químicos de base biológica y materiales a partir de azúcares y lignina en un enfoque integrado muy eficiente. En este sentido, varios estudios tecno-económicos han demostrado la viabilidad de la coproducción de biocombustibles y bioproductos (Mozaffarian, 2018). No obstante, aunque la coproducción de productos químicos y materiales de base biológica podría contribuir a resolver los problemas económicos de los biocombustibles avanzados, la plena integración de la producción de bioproductos y biocombustibles en el contexto de la biorrefinería sigue requiriendo diferentes apoyos en lo que respecta a la disponibilidad de materias primas, la logística y el suministro, la tecnología, el diseño de procesos, la aceptación financiera, normativa y social.

### **2.3. Cadenas de suministro para la producción de biocombustibles**

Se ha observado que un obstáculo importante para la producción sostenible de biocombustibles es la complejidad de las decisiones a las que se enfrentan las diversas partes interesadas. Es en esta parte donde entra el concepto de cadena de suministro, la cual se define como una red entre una empresa y sus proveedores para producir y distribuir un producto específico al comprador final. Esta red incluye diferentes actividades, personas, entidades, información y recursos (Kenton, 2020).

Las biorrefinerías parecen ser una solución viable para sustituir a las refinerías tradicionales de combustibles fósiles, pero su puesta en práctica requiere la exploración de varios aspectos, como la selección de la materia prima y las rutas de procesamiento, productos, los lugares de recolección, la elaboración y los mercados, así como muchos otros criterios de sostenibilidad. Por ello, la mejor opción no es fácilmente visible. Dentro del área de investigación referente a este tema, se han propuesto una serie de opciones. Por ejemplo, Kim y col. (2011) propusieron un modelo para el diseño óptimo de las redes de la cadena de suministro de biomasa en condiciones de incertidumbre, esto debido a la variación de precios del mercado, demanda del producto y tecnologías de procesamiento. Este proyecto se basó en la región sudeste de



Estados Unidos para la producción de gasolina y diésel, cuya función objetivo es maximizar la ganancia. Como resultado del mismo, se obtuvo un modelo capaz de tomar decisiones para la infraestructura de procesamiento de conversión de biocombustibles, incluidos los lugares de procesamiento, los volúmenes, redes de suministro y la logística de transporte desde recursos forestales a la conversión y de la conversión a los mercados finales. Por otra parte, Marvin y col. (2013) propusieron un programa lineal mixto entero para determinar la ubicación y la capacidad de las instalaciones de procesamiento de biomasa, para evaluar la cadena de suministro de biocombustibles del medio oeste de Estados Unidos. Se consideraron 8 tipos de biomasa, 7 tecnologías de procesamiento para producir biocombustibles. Se tomó como función objetivo el valor neto presente, satisfaciendo la demanda de los mercados.

Es importante mencionar que, dependiendo de la región, las cadenas de suministro varían y se tienen soluciones completamente diferentes. Referente a los trabajos en el país, Rendon-Sagardi y col. (2014) desarrollaron una cadena de suministro para la producción de bioetanol y combustible a partir de caña de azúcar y granos de sorgo, mezclando en 10 % volumen. De dicho análisis se concluyeron varios aspectos, en primer lugar, México no es autosuficiente en la producción de combustible, requiere importación de otros países para satisfacer la demanda del mismo. Por otra parte, si se mezcla la gasolina con bioetanol, solo se cubriría el 0.8 % de la demanda interna, sin embargo, se reduciría la cantidad de CO<sub>2</sub> en 1282.95 millones de toneladas entre 2014 y 2030.

La mayoría de los trabajos mencionados anteriormente optimizan el aspecto económico de la cadena de suministro como un objetivo único. Sin embargo, en el análisis pueden considerarse varios objetivos (Beamon, 1998). La optimización multiobjetivo es muy adecuada para los problemas de diseño de la cadena de suministro en los que se debe considerar más de un objetivo. Ejemplo de ello, es el trabajo realizado por Murillo-Alvarado y col. (2013), los cuales desarrollaron un modelo de programación disyuntiva generalizada que tiene en cuenta la selección simultánea de productos, materias primas y pasos de procesamiento. La solución óptima puede consistir en biorefinerías de múltiples productos y materias primas. Tomando en cuenta dos objetivos, la maximización de la ganancia y la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero, considerando al mismo tiempo el número de etapas de procesamiento. Teniendo como productos principales: bioetanol, el biodiésel y el hidrógeno, mientras que la caña de azúcar, la jatrofa y las microalgas aparecen como materia prima en las vías óptimas. Estudios posteriores, bajo un caso de estudio similar, incluyendo como función objetivo el aspecto social fue desarrollado por Santibañez-Aguilar y col. (2014). Dicho estudio concluyó que se pueden tener soluciones que satisfagan el aspecto económico y ambiental, eligiendo materias primas que estén disponibles en todo el año y no tengan un



impacto negativo en el medio ambiente. Generando, de igual manera, un alto impacto social.

Los modelos mencionados previamente asumen valores de parámetros nominales y, por lo tanto, conducen a soluciones que funcionan bien en la hipótesis más probable, pero mal en otras condiciones. Por lo tanto, la incertidumbre es un aspecto importante que debe tenerse en cuenta en el problema del diseño de la cadena de suministro, ya que varias fuentes de incertidumbre afectan a la conversión de la biomasa. Trabajos referentes al tema, han sido desarrollado por Santibañez-Aguilar y col. (2016), analizando la incertidumbre de una cadena de suministro de biorrefinerías que considera explícitamente la incertidumbre asociada con el funcionamiento de la cadena de suministro, así como el riesgo asociado. Según los resultados obtenidos, la distribución de los datos inciertos puede afectar significativamente a la selección de las materias primas, los productos y las interconexiones entre la oferta y la demanda.

De los antecedentes podemos observar que, ninguno evalúa la incertidumbre en las cadenas de suministro multiobjetivo. Por ello, es que en el presente se propone una cadena de suministro para la producción de biocombustibles y bioproductos que satisfaga los aspectos sociales, económicos, hídricos y ambientales y que, a su vez, pueda ser factible bajo incertidumbre de disponibilidad de materia prima y variabilidad de demanda en el mercado.

## 2.4. Economía y sostenibilidad

Como se ha mencionado en el capítulo pasado, existen diversas problemáticas en el entorno ambiental que han sido provocados por el ser humano. Por ello, son muchas las personas y empresas que trabajan por un nuevo modelo económico basado en una fuerte preocupación social y del medio ambiente. El concepto de sostenibilidad es el potencial para el mantenimiento a largo plazo del bienestar, que tiene tres dimensiones clave: ambiental, económica y social, tal como se muestra en la Figura 2.1 (Liu, 2020). En este contexto, se están desarrollando biorrefinerías como medios tecnológicos para la transición a este enfoque económico, abriendo la posibilidad de añadir valor a la biomasa mediante una producción más sostenible.

Dentro del aspecto de sostenibilidad entra el agua, la cuál es vital para el desarrollo humano. En México se usan actualmente 13 000 m<sup>3</sup> en promedio por persona, sin embargo, se espera que en el año 2030 el país vea frenado su desarrollo económico y social, poniendo en riesgo la propia supervivencia de los habitantes (Naum, 2017). Dentro de este aspecto, es bien sabido que los procesos para producir biocombustibles a partir de biomasa requieren una gran cantidad de agua (Gerbens-Leenes y col., 2009), por ello es que resulta tan importante cuidar



**Figura 2.1:** Las tres dimensiones de la sostenibilidad.

el factor hídrico en el aspecto de biorrefinerías. Por ello, se han desarrollado la implementación de cadenas de suministro, teniendo en cuenta la huella hídrica (Bernardi y col., 2012; Trujillo-Mata y col., 2016).

Las evaluaciones del rendimiento en relación con la sostenibilidad pueden utilizarse como instrumento para diseñar o evaluar proyectos de biorrefinería. Esas evaluaciones suelen basarse en la utilización de indicadores que representan la gravedad de los efectos del proyecto en un aspecto específico de la sostenibilidad según el método de evaluación (Parada y col., 2017). Ejemplo de ello es el Eco-indicador 99, el cuál realiza un análisis del ciclo de vida (Consultants, 2000). Sin embargo, la mayoría de las publicaciones consideran los impactos en la economía y el medio ambiente, mientras que la social se omite a menudo. Dicho aspecto social se puede medir como el número de trabajos generados (Murillo-Alvarado y col., 2013). Es por ello, que la unión de aspectos económicos, sociales y ambientales, traen consigo el desarrollo de una biorrefinería sostenible.



# Capítulo 3

## Metodología

Para llevar a cabo esta investigación, se plantea seguir la metodología descrita en este capítulo, que incluye el desarrollo de los modelos matemáticos para la cadena de suministro para la producción de biocombustibles y productos de alto valor agregado, la relajación de los modelos y la solución de los modelos mixto-entero resultantes, así como la definición de los escenarios de estudio.

### 3.1. Modelado de la cadena de suministro

#### 3.1.1. Superestructura

En el modelo propuesto, se pueden seleccionar como materias primas uno o más de los cuatro tipos de desechos agrícolas con mayor disponibilidad en el país ( $i$ ) distribuidos en los 32 estados de México ( $j$ ). Si se selecciona una materia prima generada en una ubicación dada, se transportan a uno de los cinco estados con mayor infraestructura industrial ( $k$ ), donde se pueden ubicar las instalaciones. Cada instalación puede producir uno o varios productos ( $m$ ) entre cuatro alternativas: bioetanol, biobutanol, ácido levulínico y furfural. Los productos obtenidos en cada biorrefinería se distribuyen a diez mercados ( $n$ ). Estos mercados potenciales se seleccionan porque son los que tienen mayor demanda de gasolina, y el objetivo principal de este modelo es satisfacer en la medida de lo posible la demanda de este combustible a través de alternativas renovables. Toda la superestructura se presenta en la Figura 3.1.

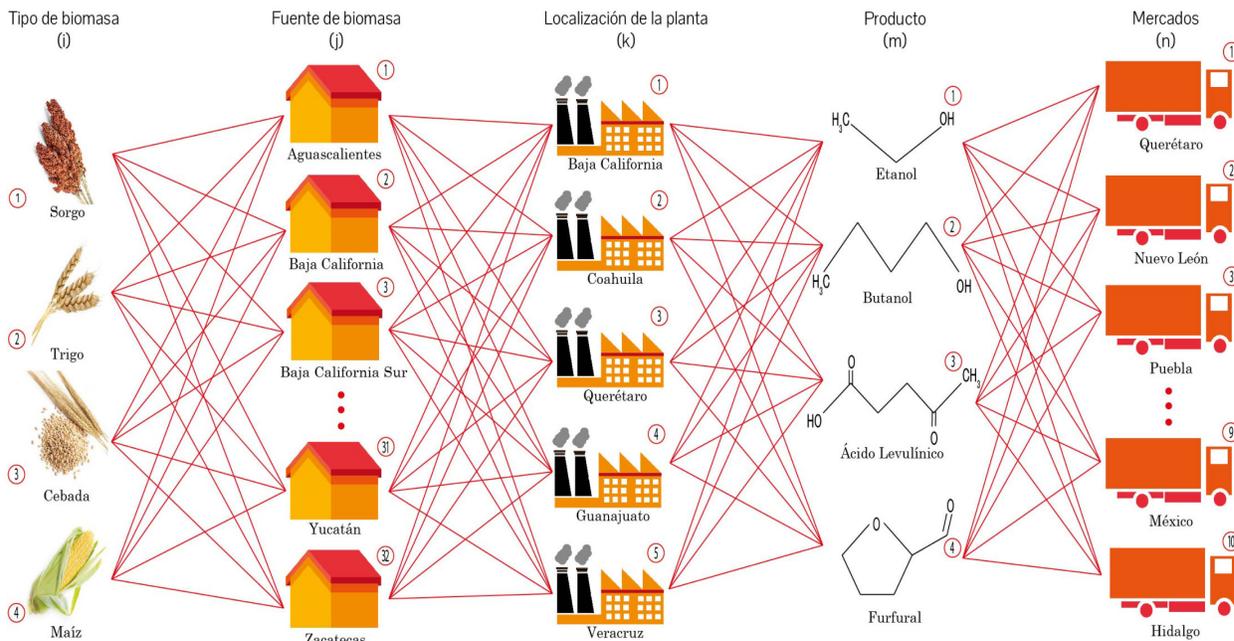
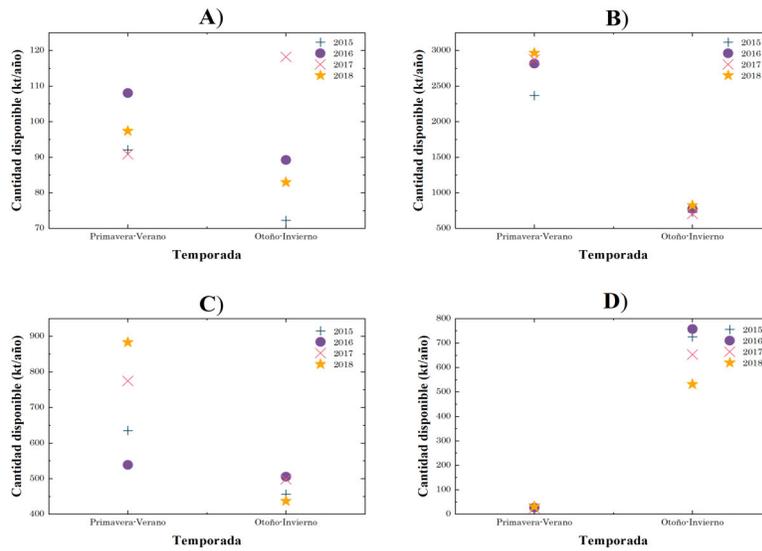


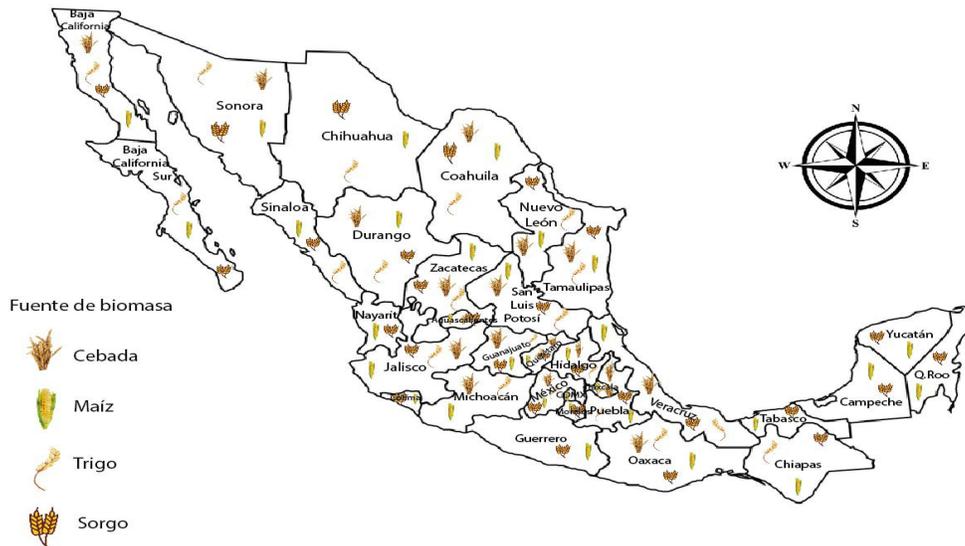
Figura 3.1: Superestructura de la cadena de suministro.

### 3.1.2. Generación de información

En este estudio se incluyen los residuos agrícolas de cuatro cultivos de alta producción en México como posibles fuentes de azúcares para obtener biocombustibles y productos de alto valor agregado. Estos cultivos son maíz, sorgo, trigo y cebada. Se ha obtenido información sobre la distribución de los residuos a lo largo de los 32 estados de México para dos temporadas, primavera-verano y otoño-invierno, a lo largo de los años 2015, 2016, 2017 y 2018 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020). Esta información se presenta en la Figura 3.2, de manera más detallada se muestran en el Apéndice B. Los datos corresponden a los municipios con mayor producción de residuos de cada estado de México. En la Figura 3.3 se muestra la ubicación geográfica de los estados y una representación de la distribución de los cultivos. Es evidente que los residuos de maíz son los que más contribuyen a la disponibilidad de materias primas lignocelulósicas en la temporada primavera-verano, seguidos del sorgo. Sin embargo, en la temporada otoño-invierno la disponibilidad de residuos de maíz se reduce drásticamente, siendo comparable a la disponibilidad de residuos de trigo.



**Figura 3.2:** Disponibilidad total de materia prima lignocelulósica por año: a)cebada, b)maíz, c)sorgo, d)trigo.



**Figura 3.3:** Representación pictórica de la distribución de los cultivos en México.

Se espera que los materiales lignocelulósicos se procesen para producir bioetanol, biobutanol o incluso ambos biocombustibles, con el objetivo de satisfacer parcialmente la demanda de gasolina en el país. Además, para mejorar la economía de todo el esquema de producción, se desea obtener ácido levulínico y furfural como productos de alto valor agregado a partir de la biomasa lignocelulósica. Se proponen cinco posibles ubicaciones para las biorefinerías: Baja California, Coahuila, Querétaro, Guanajuato y Veracruz. Los estados se establecen como ubicaciones factibles ya que tienen la mayor infraestructura industrial del país. A través

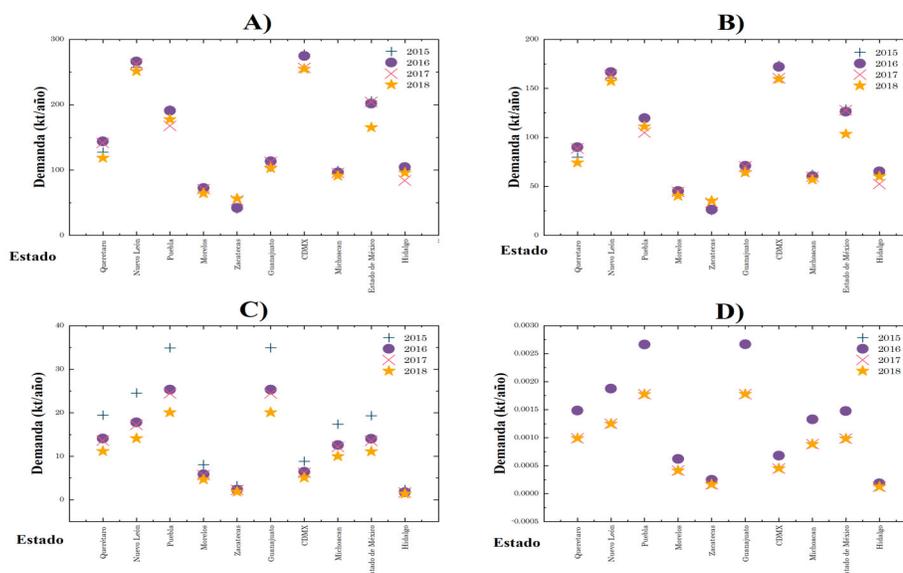


de esas instalaciones se desea producir bioetanol, biobutanol, ácido levulínico o furfural para satisfacer los principales mercados nacionales. En el caso de los bioalcoholes, se espera que satisfagan una fracción de la demanda de gasolina (Sistema de Información Energética, 2019). Esa fracción viene dada por la concentración máxima recomendada de cada alcohol en las mezclas con gasolina, que es del 10% en el caso del bioetanol (Costagliola y col., 2016) y del 16% en el caso del biobutanol (Zhang y col., 2016). Por otra parte, la demanda de ácido levulínico se determina en función de sus necesidades como disolvente (Petróleos Mexicanos, 2018). Por último, la demanda de furfural se estima suponiendo que su uso final es como lubricante (Petróleos Mexicanos, 2018). La demanda anual para cada uno de los productos estudiados se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1:** Demanda nacional de biocombustibles y productos de alto valor agregado en México (kt/año).

Año	Bioetanol	Biobutanol	Ácido Levulínico	Furfural
2015	3728.96	5958.96	2646.18	0.202
2016	3879.45	6199.45	1918.48	0.202
2017	3748.86	5990.77	1852.32	0.135
2018	3592.11	5740.28	1521.55	0.135

La distribución de la demanda en los mercados potenciales se muestra en la Figura 3.4 (Sistema de Información Energética, 2019; Petróleos Mexicanos, 2018).



**Figura 3.4:** Demanda anual de los productos estudiados: a) biobutanol, b) bioetanol, c) ácido levulínico, d) furfural.



### 3.1.3. Modelo matemático: Programación Disyuntiva Generalizada

Para el modelo matemático, la demanda total de un producto  $m$  en el mercado  $n$ ,  $TD(m, n)$  vienen dado por la Ecuación 3.1:

$$TD(m, n) = PD(m, n) \cdot \rho(m), \forall m, n \quad (3.1)$$

donde  $PD(m, n)$  es la demanda del producto  $m$  en el mercado  $n$ , y  $\rho(m)$  es la densidad del producto  $m$ . La producción en masa de cada producto  $m$  en la instalación  $k$  para cada mercado  $n$ ,  $FP(m, k, n)$ , no debe ser mayor que la demanda total de ese producto en ese mercado, viene dado por la Ecuación 3.2:

$$\sum_k FP(m, k, n) \leq TD(m, n), \forall m, n \quad (3.2)$$

La cantidad de materia prima  $i$  obtenida de la fuente  $j$  que ingresa a la biorrefinería  $k$  para producir  $m$ ,  $RMAF(i, j, k, m)$ , no puede ser mayor que la disponibilidad de materia prima  $i$  en el estado  $j$ ,  $RMA(i, j)$ . Esto se representa en la Ecuación 3.3:

$$\sum_k \sum_m RMAF(i, j, k, m) \leq RMA(i, j), \forall i, j \quad (3.3)$$

El costo del transporte de la biomasa  $i$  desde la fuente  $j$  hasta la planta  $k$ ,  $TSP(i, j, k)$ , se representa en la Ecuación 3.4:

$$TSP(i, j, k) = \sum_m RMAF(i, j, k, m) \cdot D_1(i, j, k) \cdot TCSB, \forall i, j, k \quad (3.4)$$

donde  $D_1(i, j, k)$  representa la distancia desde la fuente  $j$  de biomasa  $i$  hasta la biorrefinería  $k$ . Por otro lado,  $TCSB$  es el costo de transporte de la biomasa lignocelulósica sólida. En este trabajo,  $TCSB$  se toma como 0.00508 kUSD/km·kt, según los datos reportados para el transporte de biomasa sólida (OAS, 1999). Cada instalación  $k$  puede existir o no. Se asigna una variable lógica  $Y(k)$  a cada instalación; si la variable  $Y(k)$  es verdadera, entonces la biorrefinería debe construirse en la ubicación  $k$ . Además, cada biorrefinería puede producir biobutanol, bioetanol, ácido levulínico o furfural, o una variedad de combinaciones entre esos productos. Por tanto, se asigna una variable lógica  $S(m, k)$  a cada producto. Si el producto  $m$  se obtiene de hecho en la instalación  $k$ , entonces  $S(m, k)$  es verdadero. Estas consideraciones



se pueden representar en términos de una disyunción anidada, como sigue en la Ecuación 3.5:

$$\left[ \begin{array}{c} Y(k) \\ TCP(k) = \sum_m \sum_n FP(m, k, n) \cdot CP(m) \\ TCRM(k) = \sum_m \sum_n \frac{FP(m, k, n)}{Yld(i, m)} \cdot RMUC(i) \\ TCL(k) = \sum_m \sum_n \frac{FP(m, k, n)}{\rho(m)} \cdot LS(m, k) \cdot LC \\ \left[ \begin{array}{c} S(m, k) \\ \sum_n FP(m, k, n) = A \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg S(m, k) \\ \sum_n FP(m, k, n) = 0 \end{array} \right], \forall m \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg Y(k) \\ TCP(k) = 0 \\ TCRM(k) = 0 \\ TCL(k) = 0 \end{array} \right], \forall k \quad (3.5)$$

donde:

$$A = \sum_i \sum_j RMAF(i, j, k, m) \cdot Yld(i, m)$$

$TCP(k)$  es el costo de producción total de la biorrefinería  $k$ ,  $CP(m)$  es el costo de producción unitario para el producto  $m$ ,  $TCRM(k)$  es el costo debido a la materia prima que ingresa a la instalación  $k$ ,  $Yld(i, m)$  es el rendimiento del producto  $m$  obtenido de la materia prima  $i$ ,  $RMUC(i)$  es el unitario costo de la materia prima  $i$ ,  $TCL(k)$  es el costo de adquisición de la tierra para la instalación  $k$ ,  $LS(m, k)$  es la superficie de tierra requerida por litro de producto,  $LC$  es el costo de la tierra por metro cuadrado. En este trabajo,  $RMUC(i)$  se ha tomado como 87.5 kUSD/kt, que es un precio de venta estimado para residuos agrícolas para alimentación animal (Mercado Libre, 2020).  $LC$  se toma como 0.4048 kUSD/m<sup>2</sup>, mientras que  $LS(m, k)$  se define como 0.66 m<sup>2</sup>/L. Los valores de  $LC$  y  $LS(m, k)$  se estiman a partir de costo de producción, superficie y tierra reportados para la refinería “Francisco I. Madero”, ubicado en Ciudad Madero, Tamaulipas, México (El Informador, 2019). Los valores de  $CP(m)$  y  $Yld(i, m)$  se estiman a partir de los datos reportados, como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2:** Costos de producción y rendimientos.

Producto	Costo de Producción (kUSD/kt)	Rendimiento (kt producto/kt de biomasa)	Referencia
Bioetanol	832.83	0.1741	(Sassner y col., 2008)
Biobutanol	741.66	0.1253	(Baral y Shah, 2016)
Ácido Levulínico	2 148.23	0.1940	(Gozan y col., 2018)
Furfural	1 000	0.46	(Cai y col., 2014)

Si una biorrefinería se construye en un lugar  $k$ , puede producir un solo producto o una variedad de productos. Por otro lado, si no hay ninguna instalación en el lugar  $k$ , no



se obtendrá ninguno de los productos allí. Esto se representa mediante la implicación en la Ecuación 3.6:

$$Y(k) \Leftrightarrow S(BE, k) \vee S(BB, k) \vee S(LA, k) \vee S(F, k) \quad (3.6)$$

En la Ecuación 3.6,  $BE$  es bioetanol,  $BB$  representa biobutanol,  $LA$  es ácido levulínico y  $F$  representa furfural. El costo de transportar el producto  $m$  desde la instalación  $k$  hasta el mercado  $n$ ,  $CTP(m, k, n)$ , viene dado por la Ecuación 3.7:

$$CTP(m, k, n) = FP(m, k, n) \cdot D_2(k, n) \cdot TCLP, \forall m, k, n \quad (3.7)$$

donde  $D_2(k, n)$  es la distancia desde la instalación  $k$  al mercado  $n$ , y  $TCLP$  es el costo de transporte del producto líquido. En este trabajo,  $TCLP$  se toma como 0.00671 kUSD/km·kt, según los datos reportados para el transporte de productos líquidos (OAS, 1999). El modelo matemático desarrollado toma en cuenta los diferentes biocombustibles y bioproductos que se pueden obtener a partir de residuos lignocelulósicos distribuidos alrededor del país. De igual manera toma en cuenta la logística del transporte de la materia prima hacia la planta y de la planta hacia los posibles mercados. Dicho modelo se puede extender a un mayor número de productos y de materia prima, sin embargo, no toma en cuenta las posibles tecnologías que se pueden utilizar, ya que utiliza como base la tecnología convencional. Se puede extender a diferentes tecnologías, pero involucraría el diseño del proceso, ya que los trabajos analizados hay poca información sobre costos de procesamiento y rendimientos, dichos datos son vitales para el desarrollo del mismo.

Para que la cadena de suministro sea factible, se debe garantizar la obtención de ganancia. Asimismo, es necesario promover que el impacto ambiental e hídrico sean los menores posibles y, de ser factible, tener un gran impacto social para beneficiar a la sociedad. Para asegurar que esto se cumpla, se ha formulado un problema de optimización multi-objetivo, que se representa por la Ecuación 3.8:

$$FOBJ = \min(-GN, -SI, EI, AH) \quad (3.8)$$

Por lo que la solución al problema de optimización multiobjetivo permitirá determinar la cadena de suministro con el mejor compromiso entre los cuatro objetivos.

## **FUNCIÓN OBJETIVO: GANANCIA**



Una de las funciones objetivo es la ganancia, que viene dada por la Ecuación 3.9:

$$GN = \sum_m \sum_k \sum_n FP(m, k, n) \cdot SP(m) - \sum_k TCRM(k) - \sum_k TCP(k) - \sum_k TCL(k) - \sum_i \sum_j \sum_k TSP(i, j, k) - \sum_m \sum_k \sum_n CTP(m, k, n) \quad (3.9)$$

donde  $SP(m)$  es el precio de venta del producto  $m$ . Para el bioetanol, se ha tomado el precio de venta como 1049.38 kUSD/kt (Arena República, 2019). En el caso del biobutanol, el precio de venta se establece 1226.28 kUSD/kt (Appropedia, 2012). Para el ácido levulínico, se tomo el precio de venta como 9120 kUSD/kt (Marketwatch, 2019). Finalmente, para furfural un valor de 1200 kUSD/kt es asumido para el precio de venta (Dalinyebo, 2014).

## FUNCIÓN OBJETIVO: IMPACTO AMBIENTAL

El impacto ambiental fue medido a través del Eco-Indicador 99 (Consultants, 2000), el cual es una metodología para la medición de impactos dentro de un análisis de ciclo de vida. De manera general la función objetivo ambiental puede ser descrita por la Ecuación 3.10:

$$EI = ECOT1 \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m RMAF(i, j, k, m) \cdot D_1(i, j, k, m) + ECOT2 \cdot \sum_m \sum_k \sum_n FP(m, k, n) \cdot D_2(k, n) + ECOH \cdot \sum_m \sum_k \sum_n heat(m) \cdot FP(m, k, n) + ECOE \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m RMAF(i, j, k, m) \cdot electricity(m) \quad (3.10)$$

Donde  $ECOT1$ ,  $ECOT2$ ,  $ECOH$  y  $ECOE$  son los eco-indicadores utilizados, los dos primeros son por transporte para sólidos y líquidos, respectivamente. Los últimos dos eco-indicadores se refieren al uso de calor y electricidad para los procesos de producción. Dichos valores son mostrados en la Tabla 3.3. De igual manera, se utilizaron datos referentes al procesamiento de cada producto, esto viene definido como  $heat(m)$  que es la carga de calor utilizada en cada proceso de obtención del producto  $m$  y  $electricity(m)$  que es referente a la electricidad utilizada por dichos procesos, la información se encuentra recopilada en la Tabla 3.4.



**Tabla 3.3:** Ecoindicadores unitarios usados.

Categoría	Eco-Indicador	Unidad
Transporte 40 t	15	puntos/km·kt
Transporte 28 t	22	puntos/km·kt
Calor	0.0053	puntos/mJ
Electricidad	0.047	puntos/kWh

**Tabla 3.4:** Requerimientos energéticos para el procesamiento de productos.

Producto ( $m$ )	Electricidad	Calor	Referencia
Bioetanol	180 000	18 024 691.3	(Sassner y col., 2008)
Biobutanol	48 647.5875	50 729 295.43	(Baral y Shah, 2016)
Ácido Levulínico	115 200	2 254 807.129	(Kamm y col., 2006)
Furfural	15 151.5151	95 040 000	(Schöppe y col., 2020)

## FUNCIÓN OBJETIVO: IMPACTO HÍDRICO

El análisis de la huella hídrica viene dada por la Ecuación 3.11:

$$AH = \sum_m \sum_k \frac{\sum_n FP(m, k, n) \cdot AW(m)}{WAP(k)} \quad (3.11)$$

Donde  $WAP(k)$  es la cantidad de agua disponible para procesos industriales en la ubicación  $k$ , que vienen dados por la Tabla 3.5 (Comisión Nacional del Agua, 2018).

**Tabla 3.5:** Agua disponible en cada planta.

Ubicación ( $k$ )	Agua disponible ( $\text{hm}^3/\text{año}$ )
Baja California	83.1
Coahuila	74.9
Querétaro	5.7
Guanajuato	20.5
Veracruz	407.8

Por otra parte, el parámetro  $AW(m)$  es la cantidad de agua requerida para el procesamiento del producto  $m$ , dichos valores se muestran en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6:** Requerimientos hídricos para el procesamiento de productos.

Producto ( $m$ )	Agua requerida ( $\text{hm}^3/\text{kt}$ producto)	Referencia
Bioetanol	0.0982	(Wingren y col., 2003)
Biobutanol	0.02567	(Baral y Shah, 2016)
Ácido Levulínico	0.0140	(Tacchini y col., 2020)
Furfural	0.03	(Zeitsch, 2000)

## FUNCIÓN OBJETIVO: IMPACTO SOCIAL

Para el caso del impacto social, se tomaron en cuenta los trabajos generados por transporte y procesamiento del producto, dicho objetivo viene dada por la Ecuación 3.12:

$$\begin{aligned}
 SI = & \sum_i JG1(i) \cdot \sum_j \sum_k \sum_m RMAF(i, j, k, m) + \\
 & JG21 \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m RMAF(i, j, k, m) \cdot D_1(i, j, k) + \\
 & JG22 \cdot \sum_m \sum_k \sum_n FP(m, k, n) \cdot D_2(k, n) + \\
 & \sum_i \sum_m JG3(i, m) \cdot \sum_j \sum_k RMAF(i, j, k, m)
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Donde el parámetro  $JG1(i)$  son los trabajos generados por cada kt de materia prima procesada  $i$ , dicho valor fue tomado como  $1.90 \cdot 10^{-7}$  para el caso del sorgo y  $6.3356 \cdot 10^{-4}$  para los demás residuos agrícolas (Santibañez-Aguilar y col., 2014). Los parámetros  $JG21$  y  $JG22$  son los trabajos generados por kmkt, para el caso de sólidos se estableció como  $4.9793 \cdot 10^{-9}$  y para líquidos como  $5.7461 \cdot 10^{-9}$  (IMPLAN, 2020). Finalmente para el caso de  $JG3(i, m)$  son los trabajos generados por kt de materia prima  $i$  procesada para el producto  $m$ , tales valores se muestran en la Tabla 3.7.

**Tabla 3.7:** Trabajos generados por kt de cada materia prima considerada hacia cada producto.

Materia Prima $i$	Producto $m$			
	Bioetanol	Biobutanol	Ácido Levulínico	Furfural
Sorgo	0.5927	1.0372	1.1854	1.3335
Trigo	0.00641	0.0112	0.0128	0.0144
Maíz	0.00641	0.0112	0.0128	0.0144
Cebada	0.00641	0.0112	0.0128	0.0144



## SOLUCIÓN DEL PROBLEMA MULTIOBJETIVO

Las disyunciones representadas por la Ecuación 3.5 se relajan utilizando el enfoque Big-M (Trespalcios y Grossmann, 2015). Una vez que se relajan las disyunciones, las variables binarias  $Y(k) \in \{0, 1\}$  y  $S(m, k) \in \{0, 1\}$  son obtenidas, para los cuales se deben cumplir las restricciones 3.13 y 3.14:

$$\sum_k Y(k) \geq 1 \quad (3.13)$$

$$\sum_m \sum_k S(m, k) \geq 1 \quad (3.14)$$

La Ecuación 3.13 implica que al menos una de las biorrefinerías debe existir, mientras que la Ecuación 3.14 establece que al menos uno de los productos debe obtenerse en alguna de las instalaciones. Las disyunciones relajadas se incorporan al resto del modelo, siendo codificadas en el software GAMS para alcanzar el máximo o mínimo de cada función objetivo de la Ecuación 3.9 a la 3.12, es decir, se resuelven los problemas de manera individual, utilizando el método de restricción  $\varepsilon$ , se genera el frente de pareto con alrededor de 100 puntos con la técnica de Hammersley para una completa visualización de los datos, dicho método y técnica se presenta en el Apéndice C (Fu y Diwekar, 2004; Diwekar y Ulas, 2000). El problema MILP resultante consta de 889 igualdades y 456 desigualdades, el modelo final se muestra en el Apéndice D. El problema de optimización se soluciona con el resolvidor BARON, en un equipo HP con CPU Inter Core i5-8300H, 12.00 GB de RAM.

## 3.2. Definición de escenarios para los modelos propuestos

La optimización se realiza para cinco escenarios diferentes, que se describen a continuación:

### 3.2.1. Escenario de estudio I

Se ha estudiado el efecto de la variación de la disponibilidad de materias primas y la demanda de productos a lo largo de los años en la cadena de suministro. En un primer paso, se determina la cadena óptima para cada conjunto de datos disponibles: primavera-verano de



2015, otoño-invierno de 2015, primavera-verano de 2016, otoño-invierno de 2016, primavera-verano de 2017 y otoño-invierno de 2017, primavera-verano de 2019 y otoño-invierno de 2019, correspondiendo la demanda al año estudiado. Se analizan las cadenas de suministro obtenidas. De este análisis surgen dos alternativas:

- Si la ubicación de las instalaciones es la misma para todos los conjuntos de datos, se toma como la mejor solución para cualquier caso, y se determina una calendarización de la producción.
- Si la ubicación de las instalaciones varía de una estación a otra, se toma la distribución de las instalaciones que permite la máxima ganancia, y se estiman las variaciones la ganancia para los diferentes conjuntos de datos con la ubicación de tales biorefinerías fijas. Por ejemplo, si dicha instalación corresponde al estado de Baja California, la igualdad vendría dada por la Ecuación 3.15:

$$Y('BC') = 1 \quad (3.15)$$

mientras que el resto de las variables binarias se fijarían como cero, de manera que el problema se reduce a determinar las cantidades de materia prima que ingresan a la planta, así como los productos obtenidos y su distribución a los mercados.

Para este escenario solo se toma en cuenta como función objetivo la ecuación 3.9, generándose un problema mono-objetivo. De igual manera, no hay restricciones para la producción mínima de ningún producto, es decir, el límite inferior para la producción de cualquiera de los productos es cero. La producción máxima se mantiene como la demanda nacional.

### 3.2.2. Escenario de estudio II

En este caso, la producción mínima de bioetanol se fija como la fracción de su demanda que permite obtener una ganancia, es decir, se obliga a satisfacer una parte de la demanda nacional de bioetanol. Se realiza la optimización hasta que un cambio de signo en la ganancia es observado. Dicha restricción se muestra en la Ecuación 3.16:

$$\sum_k \sum_n FP(BE, k, n) = \sum_n PD(BE, n) \cdot \rho(BE) \cdot x \quad (3.16)$$

Donde  $x$  es la fracción a encontrar.



### 3.2.3. Escenario de estudio III

La producción mínima de biobutanol se fija como la fracción de su demanda que permite obtener una ganancia, es decir, se obliga a satisfacer una parte de la demanda nacional de biobutanol. La restricción resulta similar a la Ecuación 3.16, solo se sustituye el término  $BE$  por  $BB$ .

### 3.2.4. Escenario de estudio IV

Este escenario constituye el frente de Pareto. El conjunto de Pareto se define como el conjunto de puntos en el espacio de búsqueda que se corresponden con las mejores soluciones al problema de optimización; y la frontera de Pareto como el conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo. Este conjunto de soluciones se integra con aquellos puntos encontrados en el espacio objetivo que se corresponden con las soluciones no dominadas, de acuerdo con el criterio de dominancia de Pareto.

Por lo anterior se determina la cadena de suministro para la producción de biocombustibles y productos de alto valor agregado que maximice la ganancia e impacto social y minimice el impacto ambiental e hídrico; dado que son cuatro objetivos el resultado será un conjunto de soluciones óptimas conocidas como la Curva Pareto. Dicho frente está restringido a satisfacer una fracción de la demanda de bioetanol, que para fines prácticos se establece como el 10%.

### 3.2.5. Escenario de estudio V

El escenario V, constituye otro frente de Pareto, cuya finalidad es la misma que el escenario anterior. Sin embargo, este frente estará restringido a satisfacer el 10% de la demanda de biobutanol.



## Capítulo 4

# Análisis de resultados

En este capítulo se presentarán y analizarán los resultados obtenidos para cada escenario.

### 4.1. Escenario I: Análisis de incertidumbre

Como se mencionó anteriormente, en este escenario se requiere la cadena de suministro que permita la mayor ganancia así como analizar el efecto de la incertidumbre en la disponibilidad de residuos agrícolas y variación de demanda de los productos. De acuerdo con los resultados obtenidos, para alcanzar la mayor rentabilidad sólo se debe producir ácido levulínico. Se determina que una sola instalación se encuentra en Guanajuato. Este resultado tiene sentido ya que la mayoría de los mercados se encuentran en la zona centro de México, por lo que el estado de Guanajuato tiene una ubicación estratégica.

La Figura 4.1 muestra la demanda anual satisfecha por estado bajo esta situación. En este escenario, la demanda de ácido levulínico para todos los mercados está completamente satisfecha. En la Tabla 4.1 se presenta el total de materia prima utilizada por año. Se observa que la materia prima utilizada es dependiente de la demanda a satisfacer, ya que, sin importar las temporadas estacionales, sigue siendo la misma cantidad.

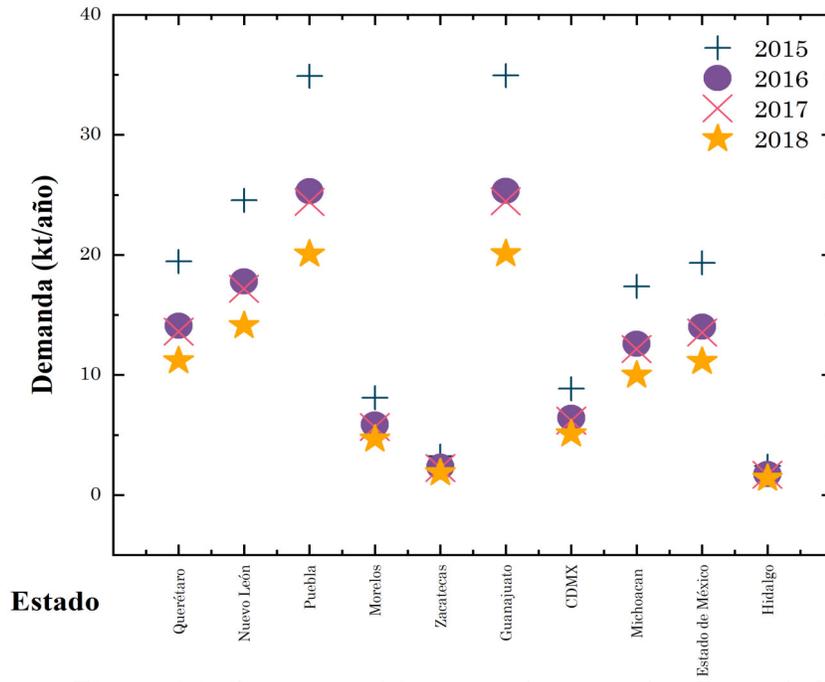


Figura 4.1: Demanda satisfecha de ácido levulínico, Escenario I.

Tabla 4.1: Uso total de materia prima, Escenario I.

Año	Temporada	
	Primavera-Verano	Otoño-Invierno
2015	892.714	892.716
2016	647.22	647.218
2017	624.901	624.9
2018	513.311	513.311

Por otra parte, las Figuras 4.2 y 4.3 muestran los porcentajes de materia prima utilizados de las diferentes fuentes en primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente. A lo largo de los años se pueden observar algunas variaciones, pero en todos los casos el mayor contribuyente de materia prima para la temporada primavera-verano es el estado de Querétaro, con los residuos de maíz como principal materia prima. Para la temporada otoño-invierno, el estado de Tamaulipas es el que más aporta, con una alta proporción de residuos de sorgo. Los demás estados también contribuyen con materia prima, aunque en una proporción considerablemente baja.

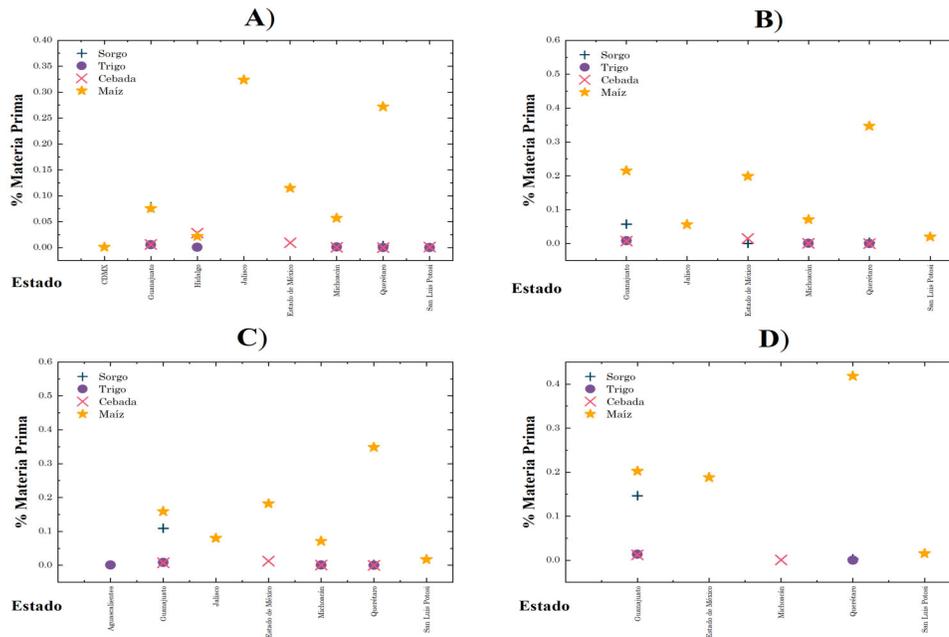


Figura 4.2: Contribución para cada materia prima de las diferentes fuentes, Escenario I, a)2015, b)2016, c)2017, d)2018, primavera-verano.

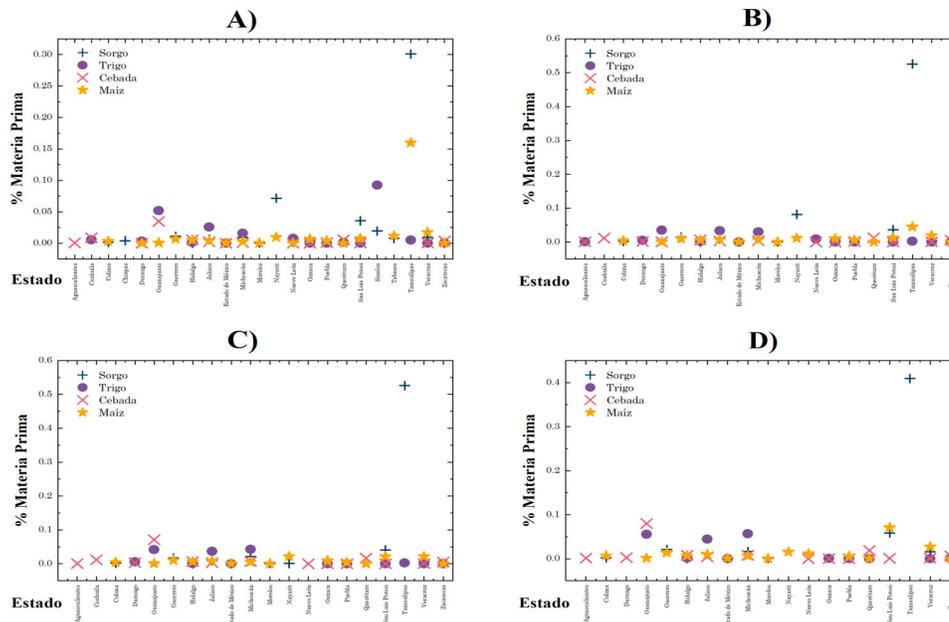
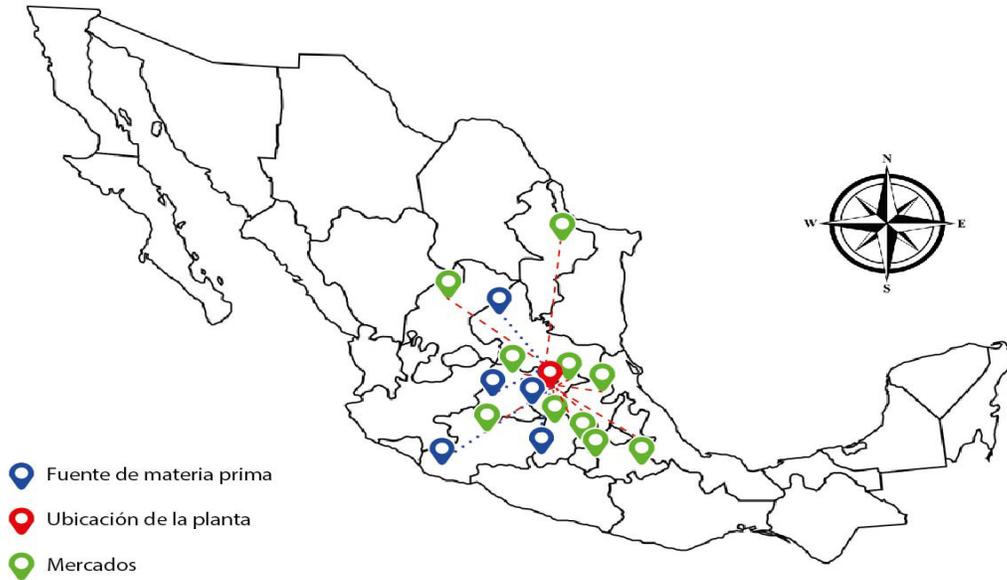


Figura 4.3: Contribución para cada materia prima de las diferentes fuentes, Escenario I, a)2015, b)2016, c)2017, d)2018, otoño-invierno.

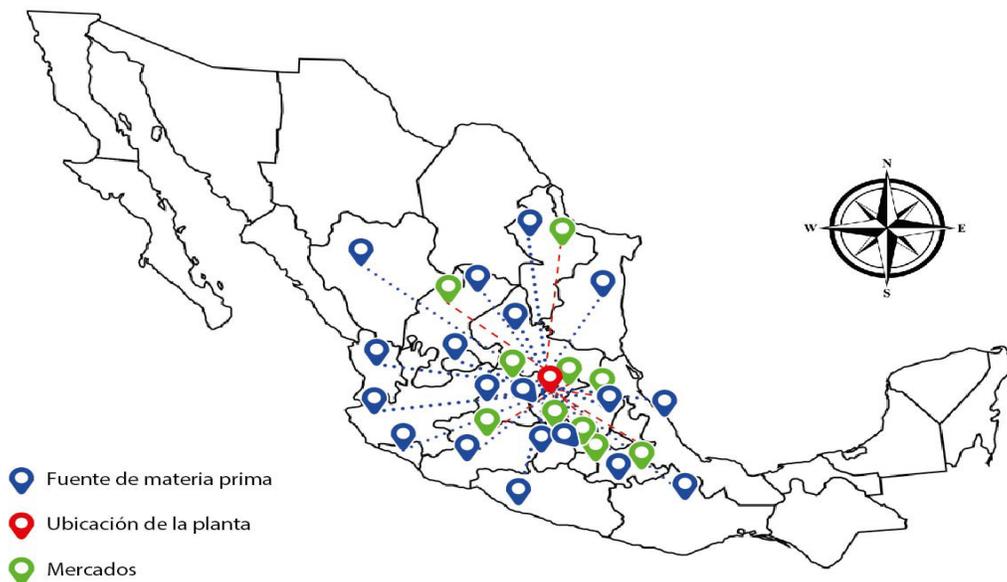
De manera general se muestra en las Figuras 4.4 y 4.5 la distribución de la cadena de suministro en el año 2018, para primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente. Como se menciona anteriormente, se observa que en otoño-invierno se requiere una mayor cantidad de



estados que contribuyan con materia prima.



**Figura 4.4:** Cadena de suministro final, Escenario I, 2018, primavera-verano.



**Figura 4.5:** Cadena de suministro final, Escenario I, 2018, otoño-invierno.

La Figura 4.6 muestra la máxima ganancia obtenida a lo largo de los años. Se observa que el cambio de estación no afecta considerablemente la rentabilidad, disminuyendo entre 1000 a 2000 miles de dólares, ya que la cantidad total de materia prima es la misma para las



dos estaciones y las toneladas producidas de ácido levulínico se mantienen constantes a lo largo del año. Se observa que la máxima ganancia se da en el año 2015 con un aproximado de 1 087 769.39 kUSD/año para primavera-verano y 1 085 249.26 kUSD/año para otoño-invierno, se observa que con el paso de los años, se reduce la ganancia máxima, lo que se debe a la reducción de la demanda de ácido levulínico.

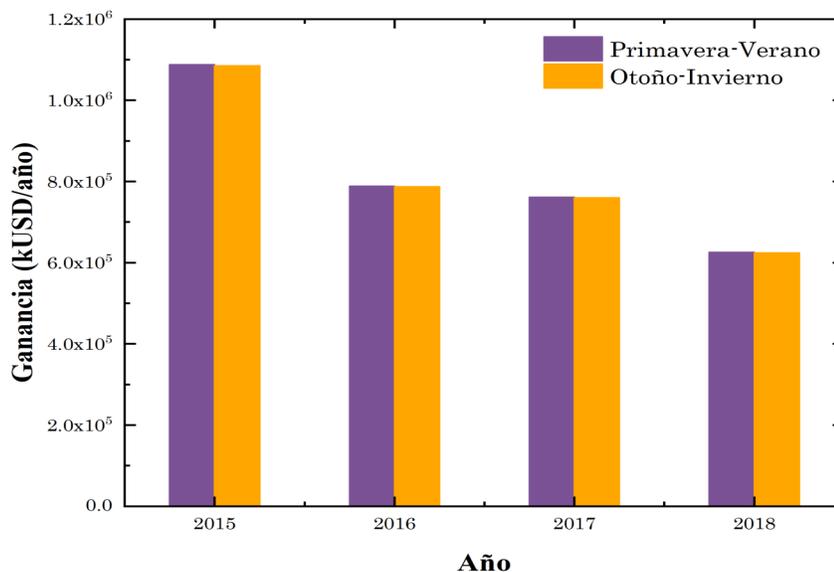


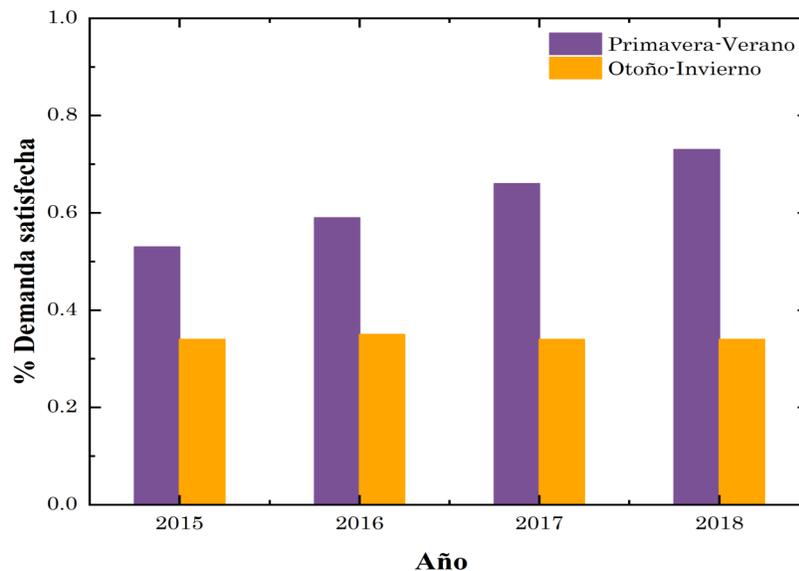
Figura 4.6: Variación de la ganancia máxima, Escenario I.

## 4.2. Escenario II: Máxima producción de bioetanol

En este escenario, se requiere una solución que permita obtener la mayor ganancia pero que al mismo tiempo satisfaga una fracción de la demanda de bioetanol. El valor del porcentaje de cobertura de la demanda se determina mediante simulación recursiva, hasta que se detecta un cambio en el signo de la función objetivo. De acuerdo con los resultados obtenidos, se debe ubicar una instalación de bioetanol en Guanajuato así como una segunda instalación en Veracruz, donde se obtiene ácido levulínico. La máxima demanda de bioetanol que se puede satisfacer bajo las condiciones analizadas se muestra en la Figura 4.7. Se observa que una fracción relativamente alta de la demanda puede cubrirse en la temporada de primavera-verano, pero la cobertura potencial se reduce en la temporada de otoño-invierno. De igual manera, se observa que en el año 2018 en primavera-verano es cuando se puede cubrir la mayor parte de la demanda con un 73 % de la misma, sin embargo, para la temporada otoño invierno la máxima se da en el año 2016 con el 34 % de la misma. Esta cobertura podría ser



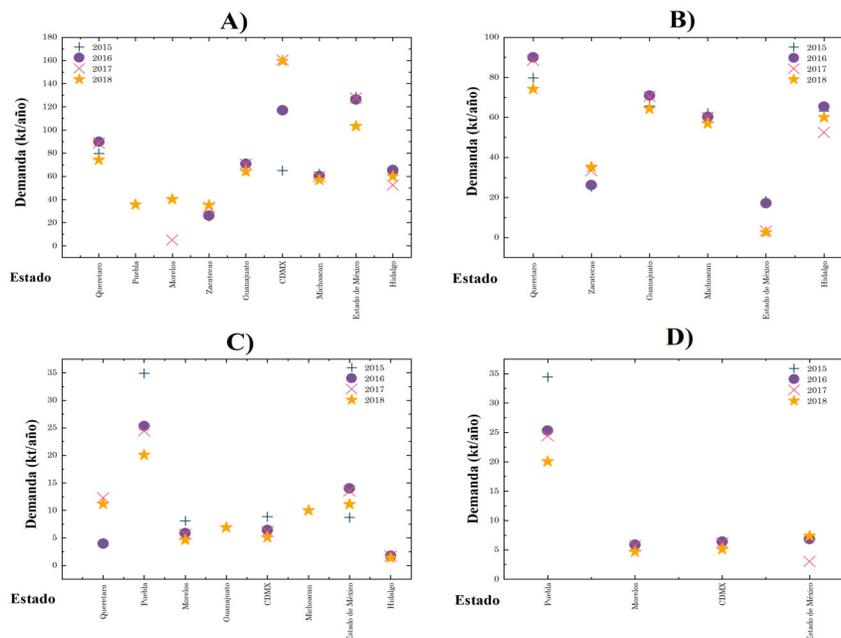
mayor si se consideran los residuos en todos los municipios de cada estado. Otra alternativa implica el uso de materias primas adicionales que permitan mantener la demanda satisfecha a lo largo de los años, por ejemplo, residuos de frutas y verduras, residuos de confitería, entre otros (Çalışkan Eleren y col., 2018).



**Figura 4.7:** Cobertura máxima de la demanda de bioetanol, Escenario II.

La Figura 4.8 muestra la demanda satisfecha de bioetanol y ácido levulínico por temporada y por año. Se observa que en la temporada primavera-verano, la demanda de bioetanol puede ser parcialmente satisfecha en 9 estados, mientras que para la temporada otoño-invierno el combustible sólo puede ser suministrado a 6 estados. Se observa una tendencia similar en el caso del ácido levulínico, en el que la demanda de 8 estados se cubre en la estación primavera-verano, mientras que en otoño-invierno sólo se puede abastecer a 4 estados. La cantidad total de materia prima que entra en cada instalación se muestra en la Tabla 4.2.

De igual manera, en la Figura 4.9, se observa que en la temporada primavera-verano la mayor parte del bioetanol producido en la planta de Guanajuato se obtiene a partir de residuos de maíz y sorgo, proporcionados por los estados cercanos a la ubicación de la planta pero también por los estados ubicados en el norte del país. Para la misma temporada, en la Figura 4.10, indica que la mayor parte de la materia prima utilizada para producir ácido levulínico en la instalación de Veracruz son residuos de maíz, proporcionados por los estados del sur de México como Campeche y Chiapas, junto con otros estados de los alrededores de Veracruz, como Puebla y Tlaxcala.



**Figura 4.8:** Demanda satisfecha de bioetanol y ácido levulínico, Escenario II, a)bioetanol, primavera-verano, b)bioetanol, otoño-invierno, c)ácido levulínico, primavera-verano, d)ácido levulínico, otoño-invierno.

**Tabla 4.2:** Uso total de materia prima, Escenario II (kt/año).

Año	Localización de la planta	Primavera-Verano	Otoño-Invierno
2015	Guanajuato	2810.91	1808.20
	Veracruz	312.32	173.76
2016	Guanajuato	3192.86	1931.21
	Veracruz	295.64	191.81
2017	Guanajuato	3435.80	1767.68
	Veracruz	329.09	200.86
2018	Guanajuato	3624.52	1702.57
	Veracruz	351.68	172.06

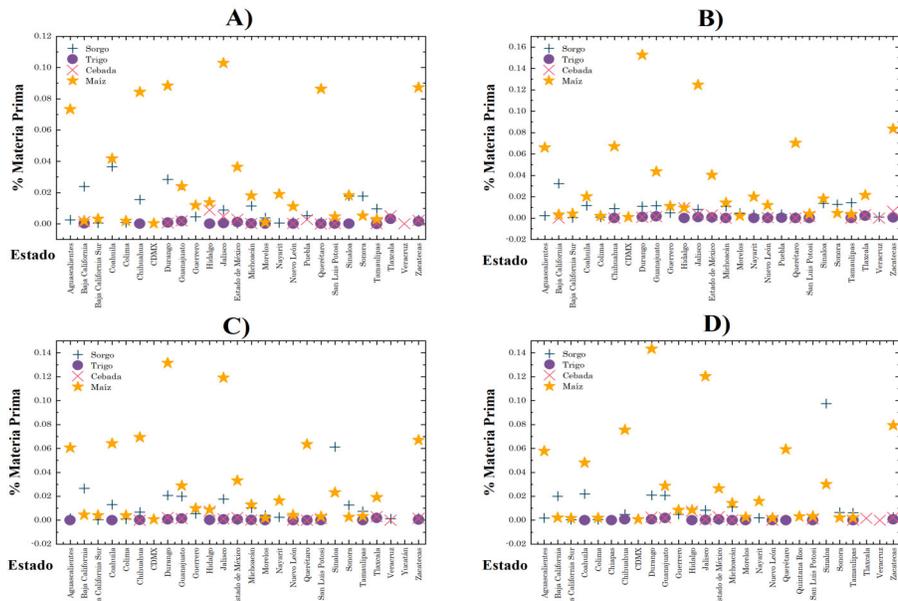


Figura 4.9: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guanajuato en la temporada primavera-verano, Escenario II, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

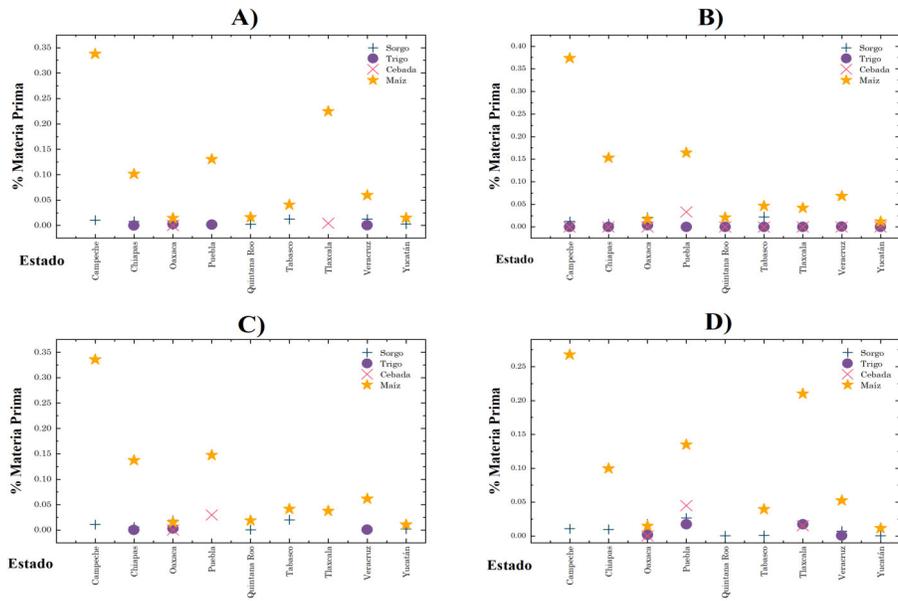


Figura 4.10: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Veracruz en la temporada primavera-verano, Escenario II, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.



Para la temporada otoño-invierno, el bioetanol se obtiene en la planta de Guanajuato utilizando residuos de trigo, maíz o sorgo de los estados ubicados al norte, como Sinaloa y Sonora, tal como se muestra en la Figura 4.11. En el caso de la instalación de Veracruz, Figura 4.12, para la temporada mencionada recibe principalmente residuos de maíz y sorgo de diversas fuentes, principalmente Tamaulipas y San Luis Potosí. Como se observa en ambas temporadas para la instalación en Guanajuato son mayores las fuentes de materia prima requeridas para satisfacer la demanda, esto se puede atribuir al bajo rendimiento hacia la producción de bioetanol. Por otra parte, para la instalación ubicada en Veracruz se requiere menor cantidad de materia prima, que se llega a satisfacer con alrededor de 9 estados para la temporada primavera-verano, mientras que para otoño-invierno requiere mayor cantidad de municipios que contribuyan, esto debido a la baja generación de residuos agrícolas en esta temporada.

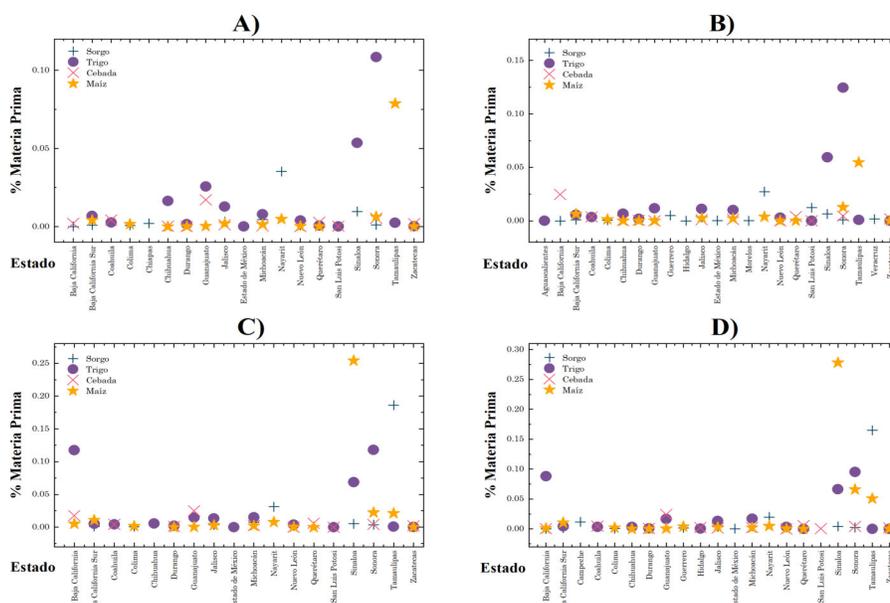


Figura 4.11: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guanajuato en la temporada otoño-invierno, Escenario II, a)2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

De manera general se muestra en las Figuras 4.13 y 4.14 la distribución de la cadena de suministro en el año 2018, para primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente.

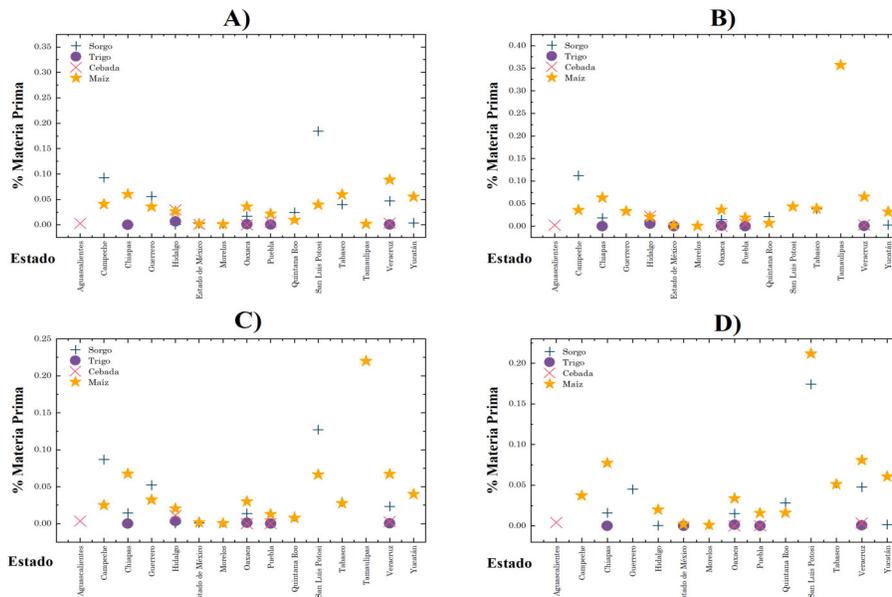


Figura 4.12: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Veracruz en la temporada otoño-invierno, Escenario II, a) 2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

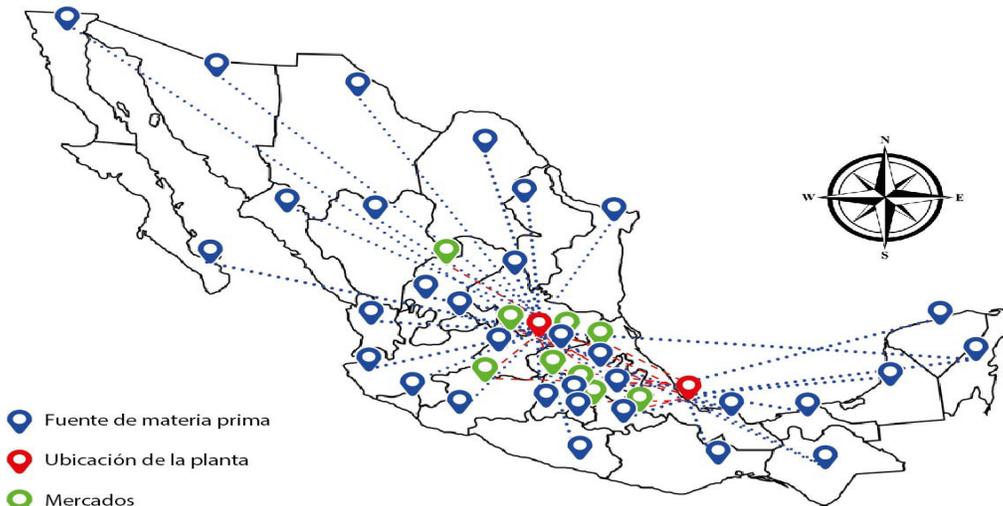


Figura 4.13: Cadena de suministro final, Escenario II, 2018, primavera-verano.

Finalmente la Figura 4.15 muestra la variación de la ganancia a lo largo de los años. Se observa que en 2015 la ganancia es alta en la temporada primavera-verano, con un total de 69756 kUSD/año. Cuando el porcentaje de demanda de bioetanol satisfecha aumenta, la rentabilidad resultante es menor que el de 2015. La magnitud de la reducción está directamente asociada a la distancia de las fuentes de biomasa. Por ejemplo, la contribución

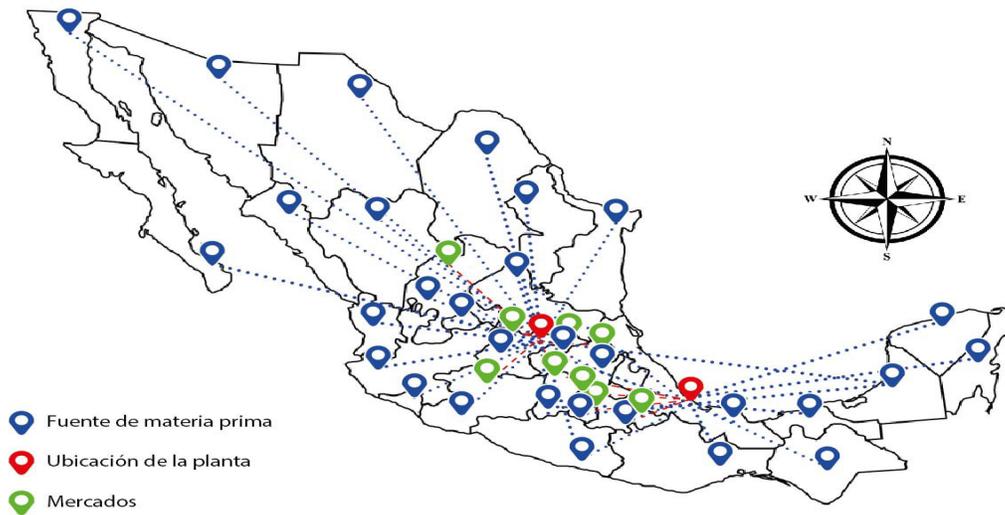


Figura 4.14: Cadena de suministro final, Escenario II, 2018, otoño-invierno.

de la biomasa de Durango a Guanajuato aumentó del 9% en 2015 a casi el 16% en 2016, mientras que la cantidad de materia prima que entra en la instalación también aumentó, lo que implica la necesidad de transportar mayor cantidad de biomasa de una fuente más lejana. Por otra parte, se observa que en la temporada otoño-invierno la ganancia es mayor, esto debido a que satisface una menor cantidad de demanda, logrando así mayor rentabilidad.

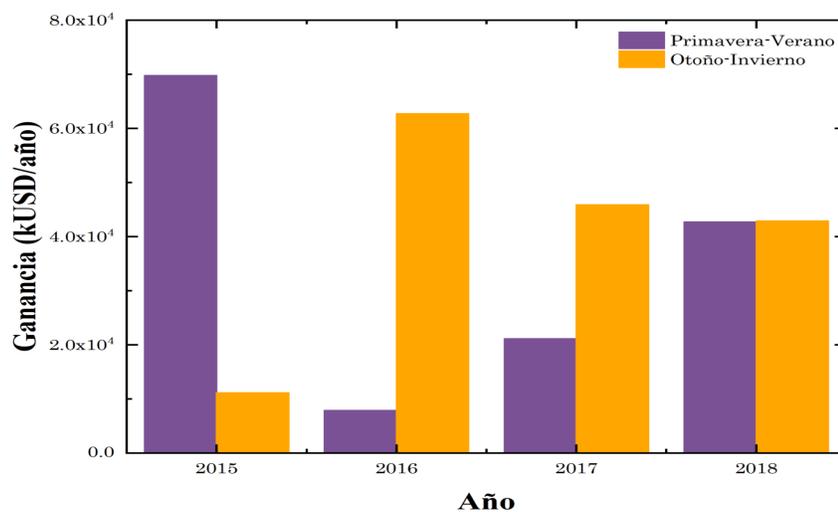
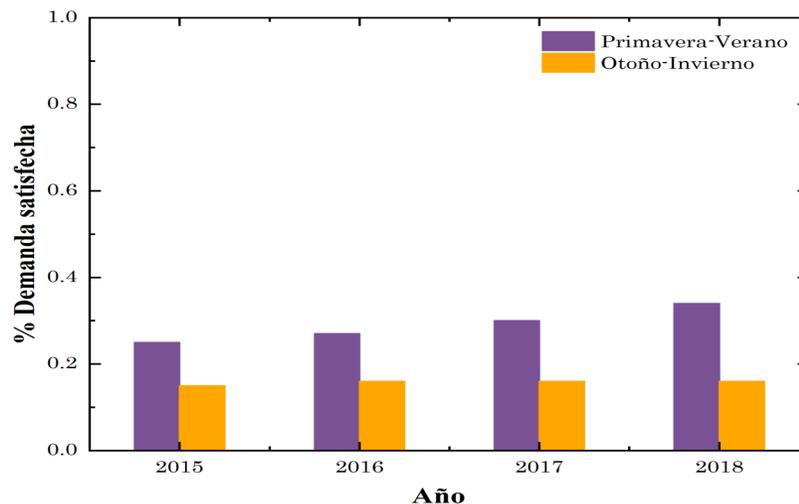


Figura 4.15: Variación de la ganancia máxima, Escenario II.



### 4.3. Escenario III: Máxima producción de biobutanol

En este escenario, se requiere una solución que permita obtener la ganancia máxima pero que al mismo tiempo satisfaga una fracción de la demanda de biobutanol. El porcentaje de cobertura de la demanda se estima mediante simulación recursiva, deteniéndose cuando se detecta un cambio en el signo de la función objetivo. De acuerdo con los resultados obtenidos, una instalación productora de biobutanol y ácido levulínico debe estar ubicada en Guanajuato, por otra parte, se encuentra una instalación productora de biobutanol en Baja California. La cobertura máxima de la demanda de biobutanol se presenta en la Figura 4.16. La demanda satisfecha es inferior a la del escenario II para el bioetanol, ya que el rendimiento para el biobutanol es menor y la demanda de biobutanol es mayor. Una vez más, el potencial para satisfacer la demanda es menor en la temporada de otoño-invierno. Cubriéndose la mayor cantidad de demanda en 2018 en primavera-verano con un 34 %, mientras que en otoño-invierno todos los años satisfacen el 16 % de la demanda, excepto el 2015 con un 15 %.

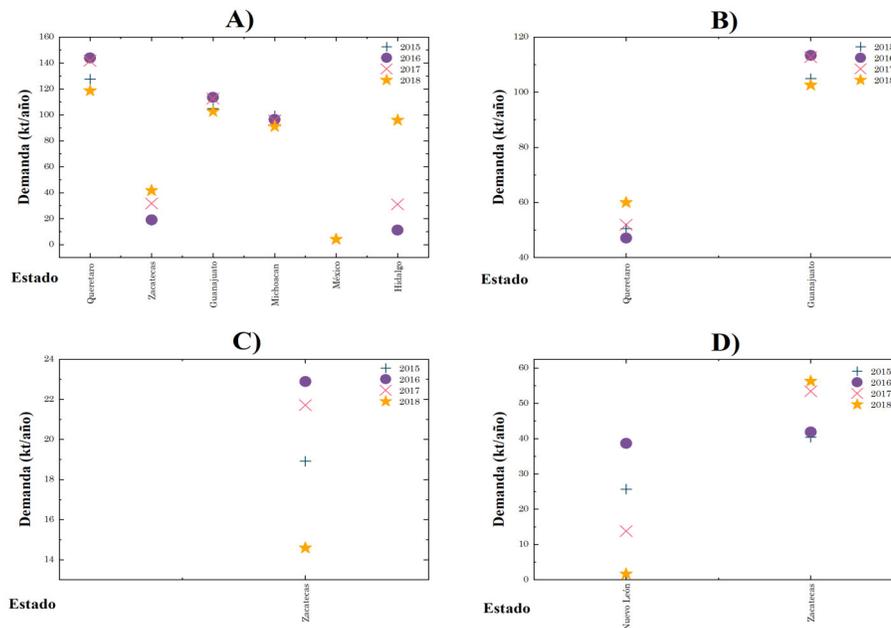


**Figura 4.16:** Cobertura máxima de la demanda de biobutanol, Escenario III.

La demanda satisfecha de biobutanol por temporada y por año se presenta en la Figura 4.17. Análogamente, la demanda satisfecha de ácido levulínico se muestra en la Figura 4.18. En la estación primavera-verano, la demanda de biobutanol puede ser parcialmente satisfecha en 5 estados para todos los años analizados. Sólo en un solo año, 2018, se suministra una baja cantidad de biobutanol al Estado de México. La mayor parte de la demanda de biobutanol se cubre con la producción en Guanajuato, pero la demanda de Zacatecas se satisface con la producción de ambas instalaciones.



Para la temporada otoño-invierno, las instalaciones de Guanajuato se abastecen en el propio Guanajuato y Querétaro, mientras que la instalación de Baja California envía su producto a Nuevo León y Zacatecas. En el caso del ácido levulínico, la demanda de 8 estados está cubierta en la temporada primavera-verano, mientras que sólo 2 estados se pueden proporcionar en la temporada otoño-invierno: Guanajuato, donde se encuentra la instalación, y Querétaro.



**Figura 4.17:** Demanda satisfecha de butanol, Escenario III, a)biobutanol de Guanajuato, primavera-verano, b)biobutanol de Guanajuato, otoño-invierno, c)biobutanol de Baja California, primavera-verano, d)biobutanol de Baja California, otoño-invierno.

La cantidad total de materia prima que entra en cada instalación se muestra en la Tabla 4.3. Tal como se ha observado en casos anteriores, la mayor cantidad de materia prima usada se da en la temporada primavera-verano, manteniéndose en alrededor de 3000 kt/año. Por otra parte, para la temporada otoño-invierno, se mantuvo en 1000 kt/año, notándose la reducción de producción en esta estación. Dicha distribución de materia prima hacia las plantas se muestra de la Figura 4.19 a la 4.22.

En la Figura 4.19 se muestra la planta ubicada en Guanajuato, referente a la temporada primavera-verano, como se observa requiere principalmente de residuos de maíz de casi todas las fuentes, con una pequeña proporción de residuos de sorgo, mientras que la cebada y el trigo tienen poca contribución. Una vez más, los estados con mayor aporte a esa instalación

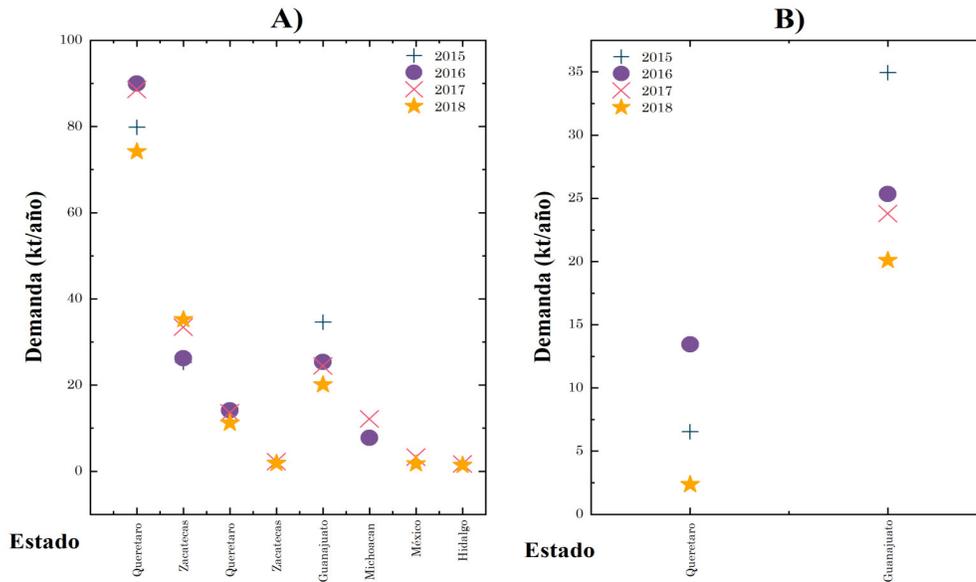


Figura 4.18: Demanda satisfecha de ácido levulínico, Escenario III, a) primavera-verano, b) otoño-invierno.

Tabla 4.3: Uso total de materia prima, Escenario III (kt/año).

Año	Localización de la planta	Primavera-Verano	Otoño-Invierno
2015	Guanajuato	2974.305	1454.487
	Baja California	150.932	527.476
2016	Guanajuato	3305.795	1480.756
	Baja California	182.644	642.272
2017	Guanajuato	3591.574	1435.8805
	Baja California	173.316	536.724
2018	Guanajuato	3859.774	1412.428
	Baja California	119.428	462.115

están en las cercanías, pero también hay contribución de los estados del norte del país. En el caso de la instalación de Baja California, la Figura 4.20 muestra que, casi toda la materia prima son residuos de sorgo de la propia Baja California y de Sonora, mientras que solo hay un pequeño aporte de residuos de maíz, no superior al 10 %.

Para la temporada otoño-invierno, Figura 4.21, la instalación de Guanajuato opera con residuos de los estados del norte, principalmente Sinaloa y Tamaulipas, con una combinación de residuos de maíz, trigo y sorgo. En el caso de la instalación de Baja California, para la tem-



porada mencionada opera principalmente con residuos de trigo, obtenidos de Baja California y Sonora

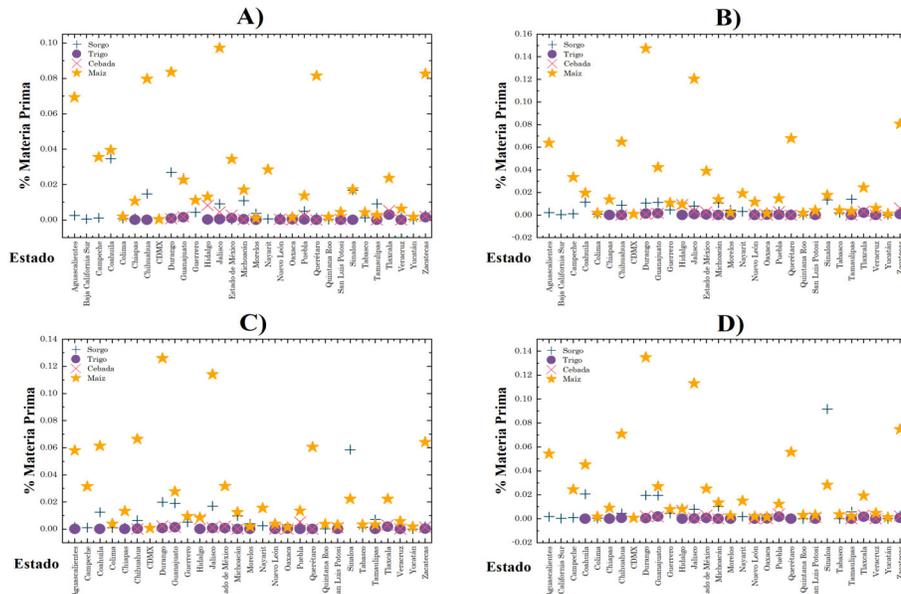


Figura 4.19: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guanajuato en la temporada primavera-verano, Escenario III, a) 2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

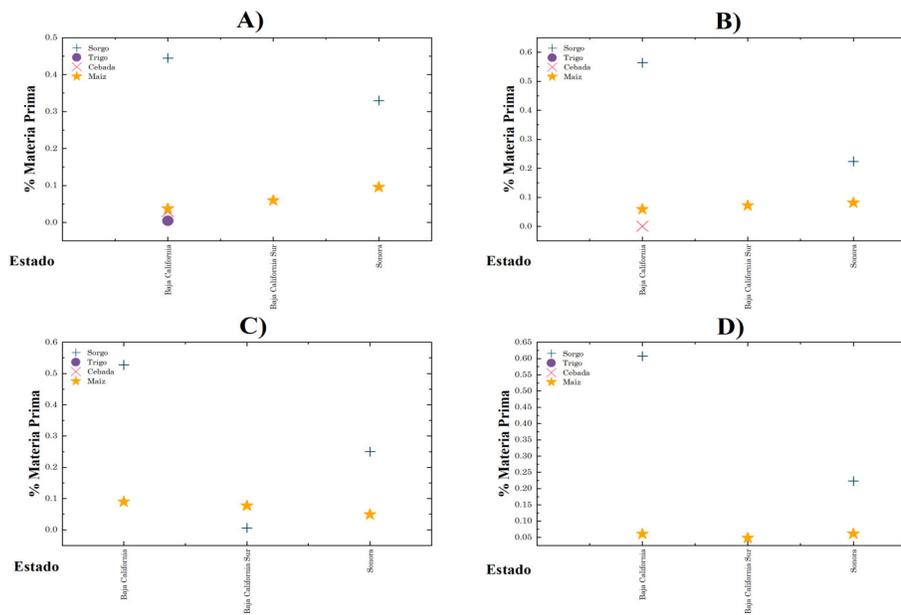


Figura 4.20: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Baja California en la temporada primavera-verano, Escenario III, a) 2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

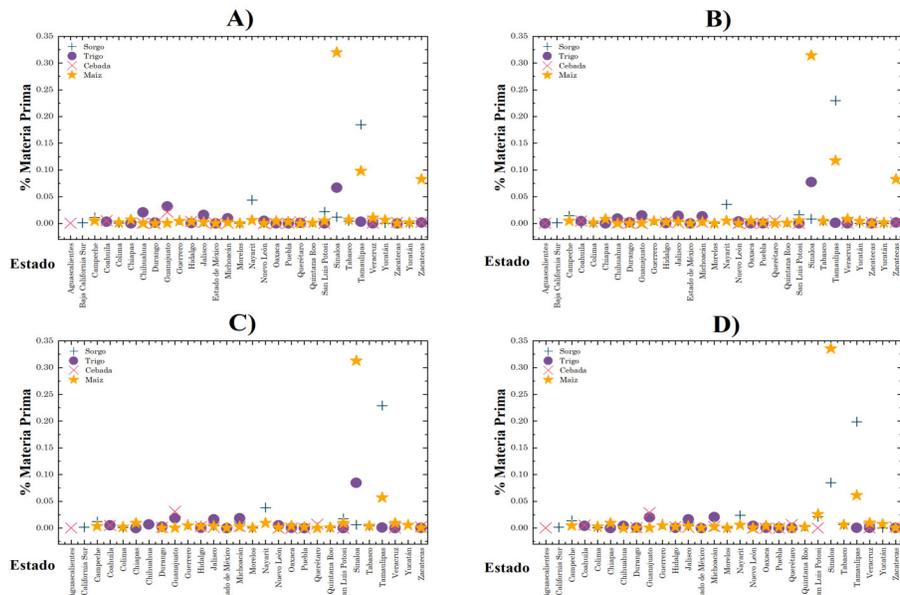


Figura 4.21: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Guanajuato en la temporada otoño-invierno, Escenario III, a) 2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

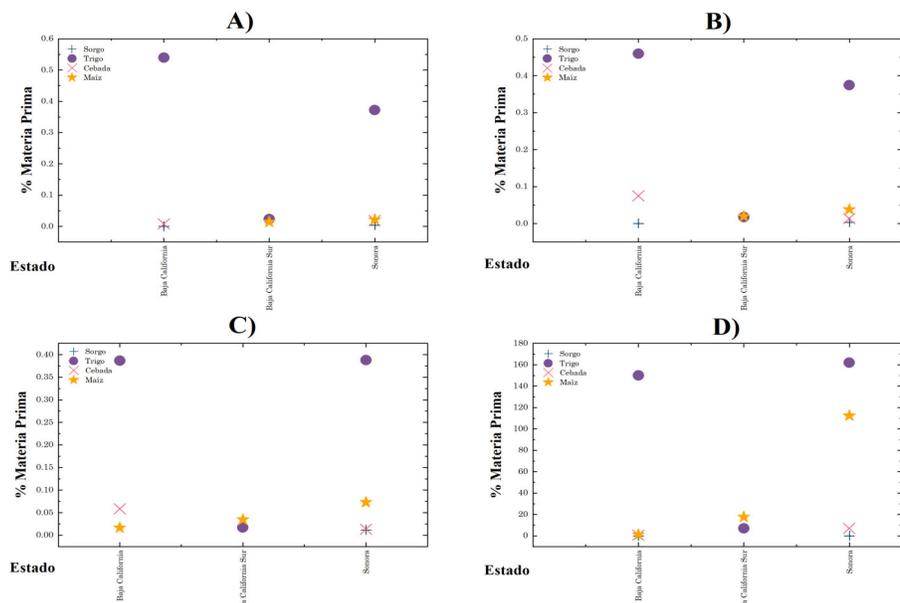


Figura 4.22: Distribución de las materias primas que ingresan a la instalación de Baja California en la temporada otoño-invierno, Escenario III, a) 2015, b) 2016, c) 2017, d) 2018.

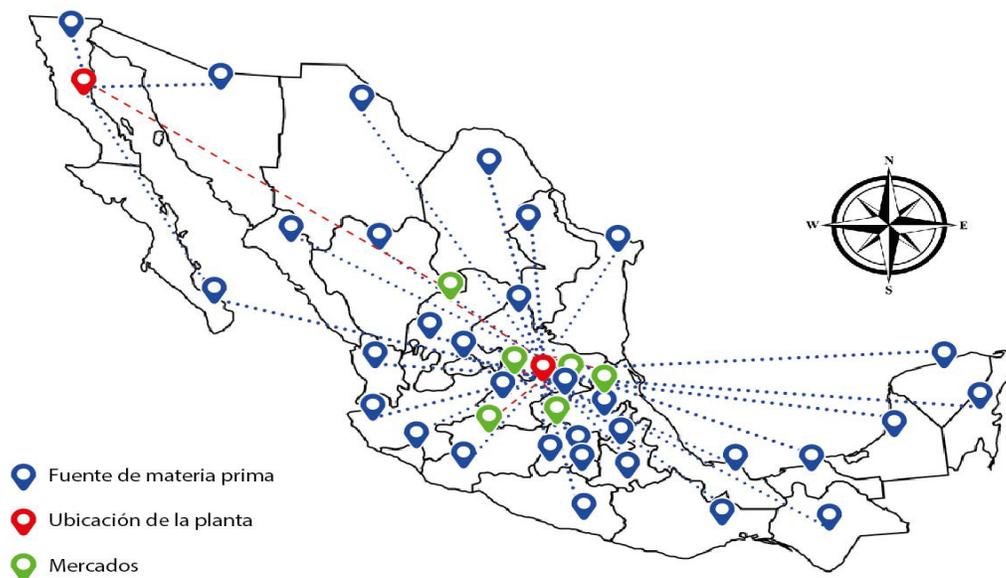


De la Tabla 4.4, se puede ver que la mayor parte de la biomasa que entra a la planta de Guanajuato se dedica a la producción de biobutanol, debido a su alta demanda y bajo rendimiento.

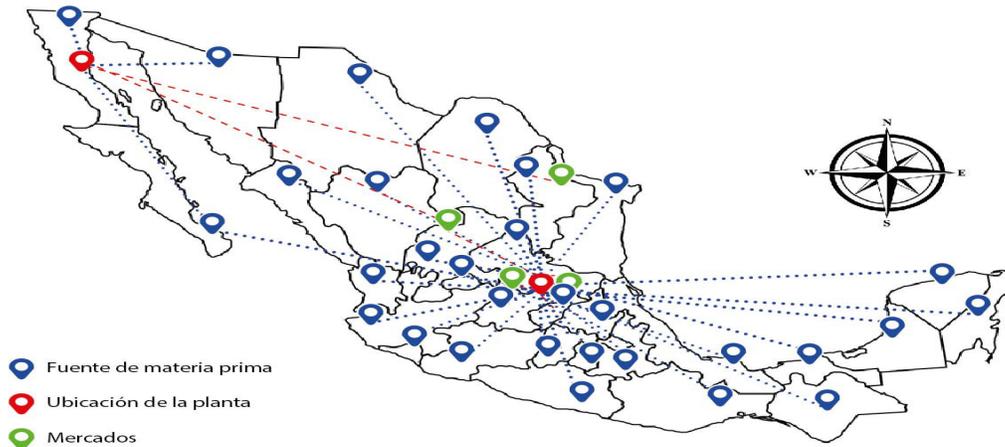
**Tabla 4.4:** Uso de la materia prima en la instalación de Guanajuato, Escenario III.

Año	Temporada	% hacia biobutanol	% hacia ácido levulínico
2015	Primavera-Verano	94.01	5.99
	Otoño-Invierno	85.30	14.70
2016	Primavera-Verano	92.64	7.36
	Otoño-Invierno	86.50	13.50
2017	Primavera-Verano	91.75	8.25
	Otoño-Invierno	91.46	8.54
2018	Primavera-Verano	93.82	6.18
	Otoño-Invierno	91.81	8.19

De manera general se muestra en las Figuras 4.23 y 4.24 la distribución de la cadena de suministro en el año 2018, para primavera-verano y otoño-invierno, respectivamente.

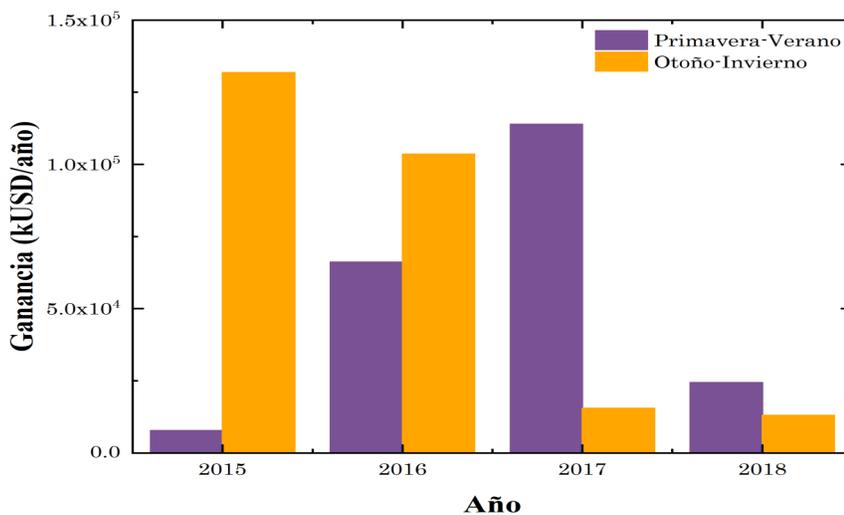


**Figura 4.23:** Cadena de suministro final, Escenario III, 2018, primavera-verano.



**Figura 4.24:** Cadena de suministro final, Escenario III, 2018, otoño-invierno.

Finalmente, la variación de la ganancia se muestra en la Figura 4.25. Se observa que en 2015 y 2016 la ganancia es alta en la temporada otoño-invierno, con un total de 131 785.87 kUSD/año y 103 599.33 kUSD/año, respectivamente. Esto puede deberse a la mayor demanda de ácido levulínico en esos años, así como a la baja producción de biobutanol. Para 2017 la mayor ganancia se obtiene en la estación primavera-verano con un total de 113 914.64 kUSD/año. En 2018, las ganancias caen dramáticamente en ambas estaciones, lo que puede estar relacionado con la caída de la demanda de ácido levulínico, ya que como se ha observado, la mayor rentabilidad se da al producir dicho producto.



**Figura 4.25:** Variación de la ganancia máxima, Escenario III.



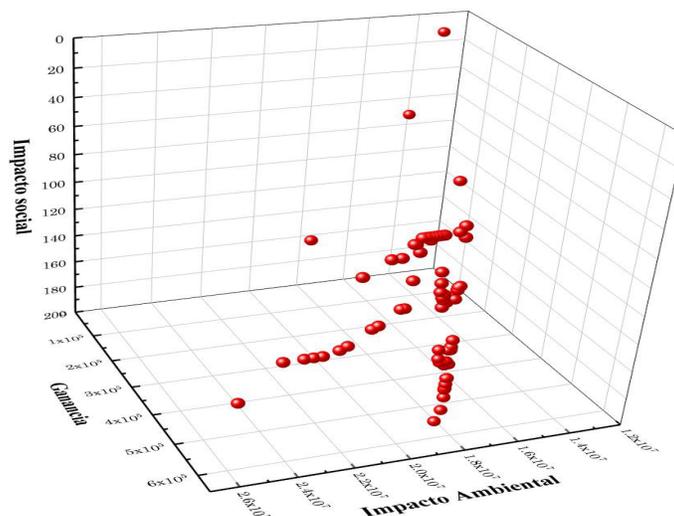
## 4.4. Escenario IV. Frente de Pareto: Enfoque en bioetanol

Para este escenario, se tomaron en cuenta los cuatro objetivos previamente establecidos, generando los frentes de Pareto para su análisis, forzando al código a satisfacer el 10% de la demanda de bioetanol. Como primer paso, se establecieron los límites de las funciones objetivos a través de su solución de manera individual, tal como se muestra en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5:** Límites de funciones objetivo, Escenario IV.

Objetivo	Ganancia	Huella hídrica	Impacto ambiental	Impacto social
Max GN	572,360.69	0.58	18,138,000	98.28
Min AH	0	0.02	18,001,000	39.51
Min EI	0	0.89	13,700,000	5.26
Max SI	525,090	0.12	160,830,000	1 265.86

Teniendo ya los límites establecidos, se realizó la toma de puntos del frente de Pareto, teniendo 100 puntos. Analizando los resultados mostrados en la Figura 4.26, se observa una estrecha relación entre el impacto social y ganancia, ya que cuando la ganancia es mayor de igual manera lo es impacto social. Sin embargo, no se alcanza a tocar el punto máximo del impacto social, aunque se mantiene en puntos aceptables. De igual manera, el impacto ambiental sigue manteniéndose en valores altos, teniendo una disminución de ganancia e impacto social al disminuir dicho impacto.

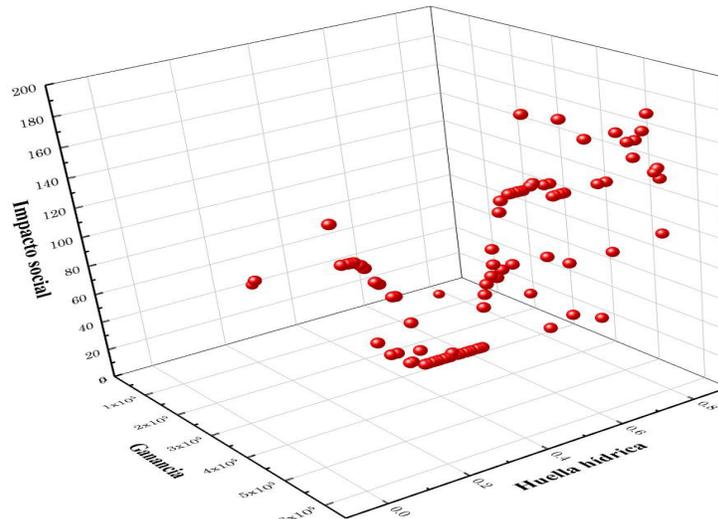


**Figura 4.26:** Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Impacto Ambiental, Escenario IV.

Por otra parte, analizando el efecto ahora contra la huella hídrica, Figura 4.27, se observa que el impacto hídrico tiende a aumentar al tener ganancias altas, esto debido a la

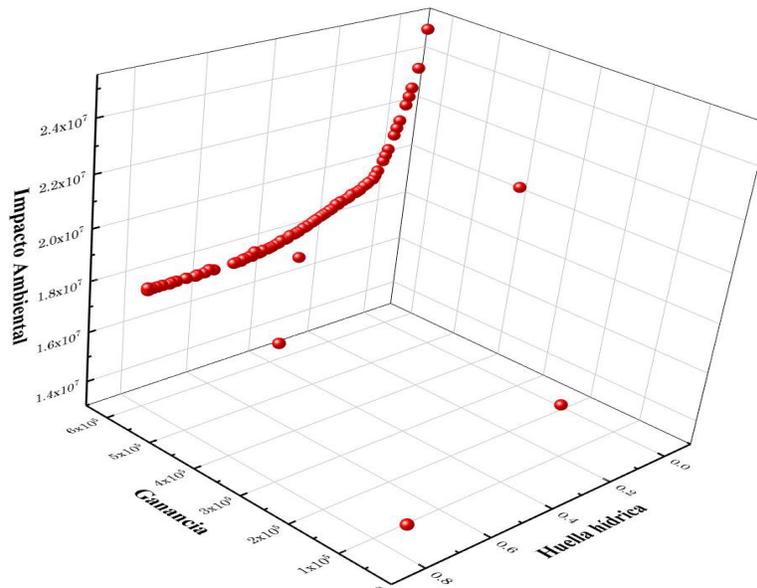


cantidad de agua requerida para los procesos de tratamiento de biomasa (Baral y Shah, 2016).

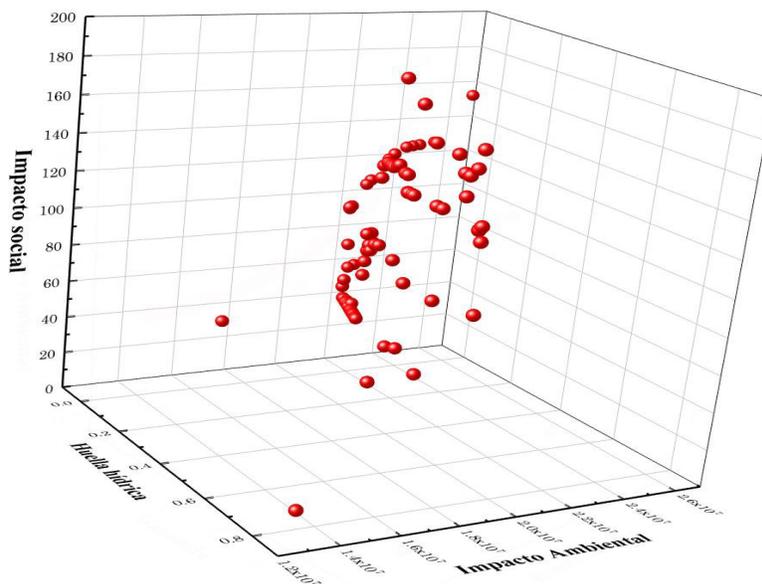


**Figura 4.27:** Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario IV.

De igual manera, analizando los otros aspectos generados, en la Figura 4.28, se observa un aumento casi exponencial del impacto ambiental al incrementarse la huella hídrica, lo que tiene sentido ya que ambos objetivos están estrechamente relacionados, manteniéndose la ganancia en valores aceptables. Por otra parte, la Figura 4.29 muestra que el impacto ambiental y la huella hídrica tienden a tener valores similares al tener un impacto ambiental ligeramente mayor.



**Figura 4.28:** Impacto Ambiental Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario IV.



**Figura 4.29:** Impacto Social Vs. Huella hídrica Vs. Impacto Ambiental, Escenario IV.

De manera general, la mejor solución se obtuvo normalizando las funciones objetivo con la Ecuación 4.1 (Koski y Silvennoinen, 1987):

$$f_i(x) = \frac{F_i(x) - \min F_i(x)}{\max F_i(x) - \min F_i(x)} \tag{4.1}$$

Donde  $i$  es la función objetivo. Posteriormente se aplicó el teorema pitagórico de la distancia euclidiana, calculada de forma general como muestra la Ecuación 4.2:

$$Distancia = \sqrt{\sum_{i=1}^l i = NF f_i^2} \tag{4.2}$$

Donde  $NF$  es el número de funciones objetivo. Con base en estos cálculos, se obtiene la Figura 4.30. Tal como se observa, se puede lograr un equilibrio entre las cuatro funciones objetivo, logrando la sostenibilidad del proceso. Es importante mencionar que, a pesar de que el resultado que se denomina como el peor muestra un mejor comportamiento en el impacto ambiental, en los otros tres aspectos tiene considerables diferencias negativas. El mejor resultado consta de una huella hídrica de 0.048, ganancia de 570,420.57 kUSD/año, teniendo un impacto ambiental de 24,041,000 puntos/año y generando alrededor de 135 trabajos al



año. El 0.048 de huella hídrica representa que del total de agua disponible para uso industrial en las plantas, sólo se utiliza esa fracción.

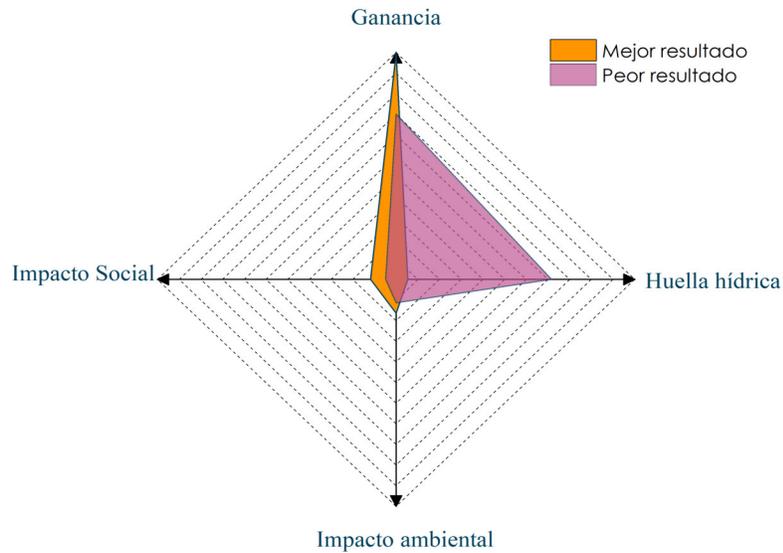


Figura 4.30: Frente de pareto final, Escenario IV.

Dicho resultado consiste en la colocación de tres plantas, las cuales producen bioetanol y ácido levulínico. Tal como se muestra en la Figura 4.31, se satisface por completo la demanda de ácido levulínico, mientras que alcanza a cubrir el 10 % de la demanda de bioetanol. Dicho bioetanol, se va por completo al estado de Puebla.

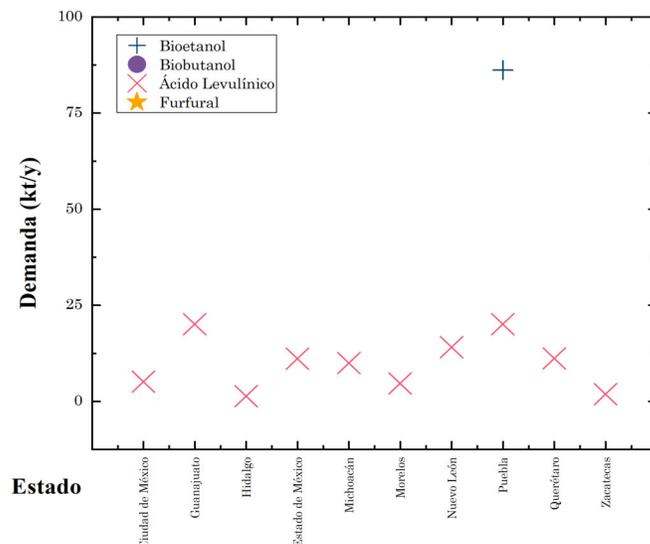


Figura 4.31: Demanda satisfecha por mercado, Escenario IV.

Por otra parte, Veracruz es el único productor de bioetanol. Mientras que Coahuila y Guanajuato, se encargan de la producción de ácido levulínico, tal como se observa en la Figura 4.32.

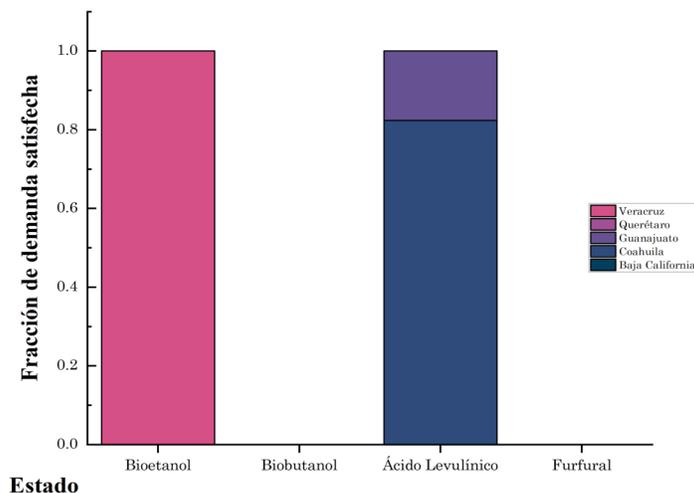


Figura 4.32: Fracción de la demanda satisfecha por planta, Escenario IV.

Finalmente, la distribución de la materia prima utilizada se muestra en la siguiente Figura 4.33. Se observa que se utiliza principalmente residuos de plantas aledañas, esto contribuye a disminuir el impacto ambiental. Asimismo, se observa que no se utiliza toda la materia prima disponible, ya que sólo se debe satisfacer una demanda pequeña de bioetanol. De igual manera, se observa que se utiliza en mayores cantidades los residuos de maíz, esto debido a su mayor disponibilidad.

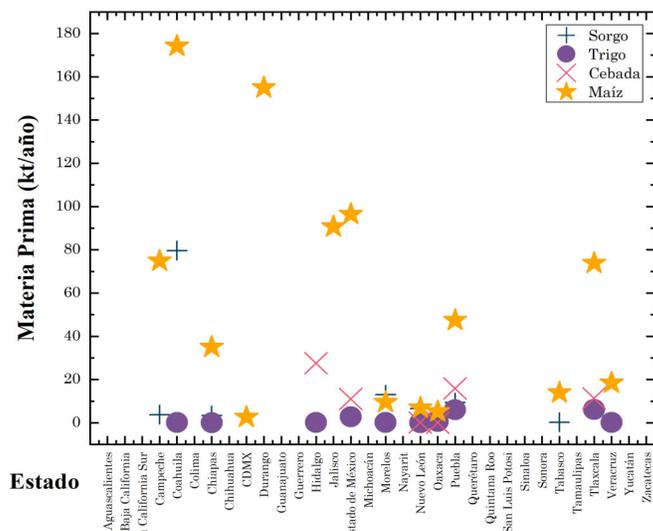


Figura 4.33: Materia prima utilizada, Escenario IV.

En cantidades totales, se utilizan 422.65 kt/año de materia prima en Coahuila, 90.66 kt/año en Guanajuato y 494.95 kt/año en Veracruz, esta última por su alta cantidad de producción



de ácido levulínico. La fracción de cada materia prima utilizada por cada planta, se muestra en la Figura 4.34. Por ejemplo, todo el sorgo y maíz de Campeche se va hacia la planta ubicada en Veracruz.

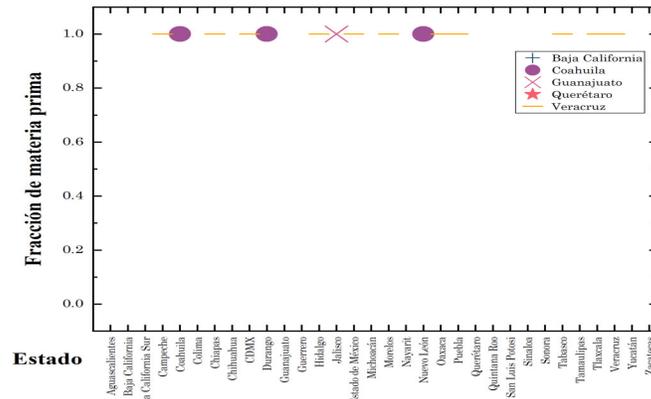


Figura 4.34: Fracción de materia prima utilizada por planta, Escenario IV.

De manera general se muestra en la Figura 4.35 la distribución de la cadena de suministro óptima. Analizando los valores de las funciones objetivo con su respectiva cadena de suministro, el impacto ambiental de 24,041,00 puntos/año resulta factible en términos de sostenibilidad ya que se tienen ganancias altas. La huella hídrica resulta aceptable, ya que la ubicación de las plantas corresponden a zonas donde el uso de agua no se vería afectado dramáticamente.. Finalmente, el alto impacto social resulta favorable, ya que en zonas como Veracruz se tiene alto índice de desempleo, por lo que el ubicar la planta en ese estado traería consigo un impacto positivo en la comunidad.

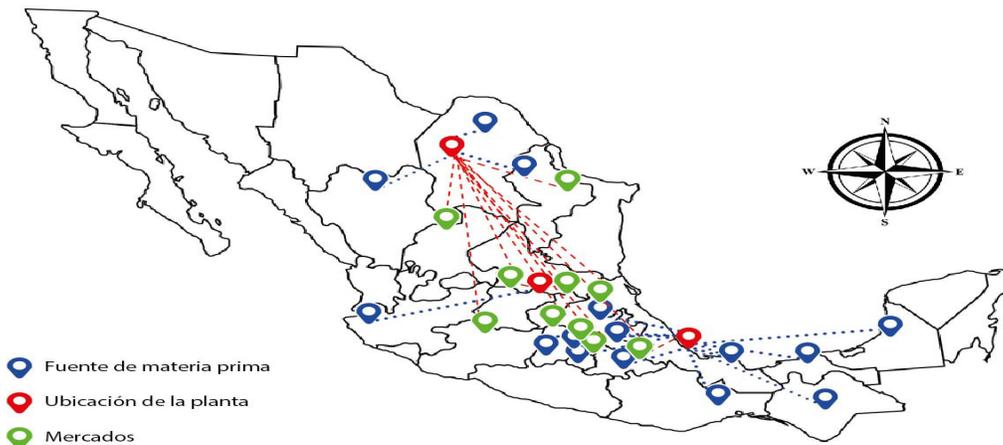


Figura 4.35: Cadena de suministro final, Escenario IV.



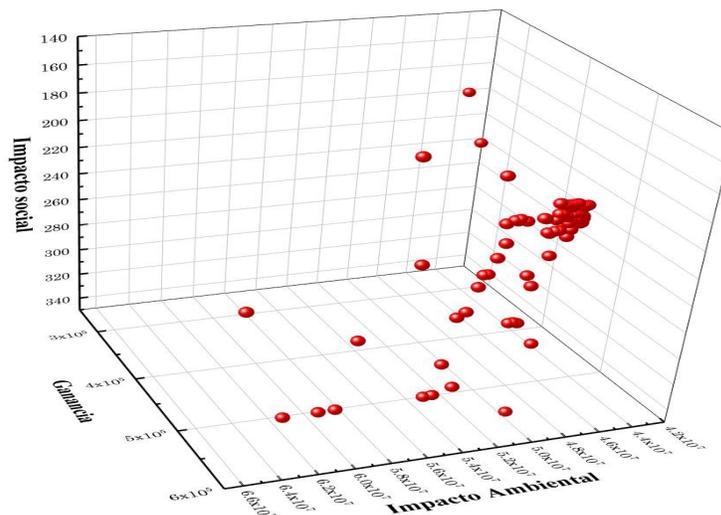
## 4.5. Escenario V. Frente de Pareto: Enfoque en biobutanol

Para este escenario, se tomaron en cuenta los cuatro objetivos previamente establecidos, generando los frentes de Pareto para su análisis, forzando al código a satisfacer el 10% de la demanda de biobutanol. Se establecieron los límites de las funciones objetivos, tal como se muestra en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6:** Límites de funciones objetivo, Escenario V.

Objetivo	Ganancia	Huella hídrica	Impacto ambiental	Impacto social
Max GN	549,856.45	0.35	47,197,000	196.83
Min AH	0	0.01	54,224,000	220.62
Min EI	0	0.34	41,582,651.38	99.78
Max SI	502,300	0.06	190,610,000	1 267.11

Teniendo ya los límites establecidos, se realizó la toma de puntos del frente de Pareto, teniendo 100 puntos. Analizando los resultados mostrados en la Figura 4.26, se observa que en general se tienen altos impactos ambientales, asociados a los procesos. Al disminuir el impacto ambiental se tiene como consecuencia una reducción en la ganancia.

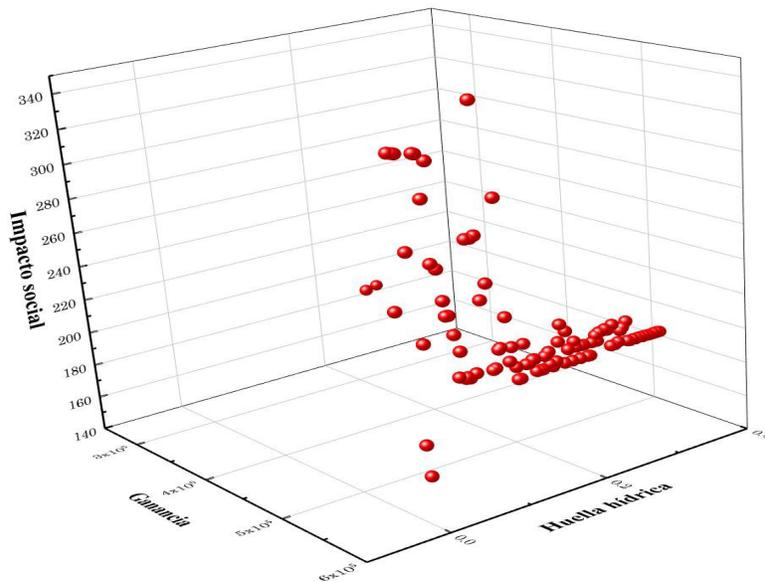


**Figura 4.36:** Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Impacto Ambiental, Escenario V.

Por otra parte, analizando el efecto ahora contra la huella hídrica, Figura 4.37, se observa que el aspecto hídrico no es mayor a 0.4. Comparado con el caso de bioetanol, existe una notoria disminución en dicho impacto, esto se puede asociar a la menor cantidad que requiere el proceso de producción de biobutanol (Baral y Shah, 2016). Así mismo, se observan variaciones en la ganancia e impacto social, sin embargo, la ganancia se logran mantener en

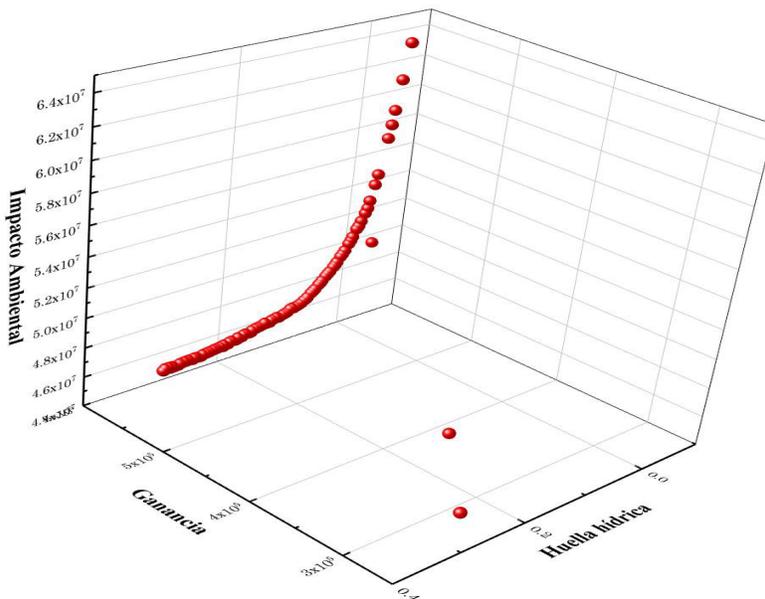


un rango de 549,892-543,968 kUSD/año.



**Figura 4.37:** Impacto Social Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario V.

De igual manera, se pueden analizar los otros impactos, como se muestra en las Figuras 4.38 y 4.39. En el caso de la Figura 4.38, se observa el crecimiento exponencial de la huella hídrica al aumentar el impacto ambiental, tal como se observaba en el escenario IV. No obstante, la huella hídrica logra mantenerse entre 0.4 y 0.6, mientras que la ganancia sigue siendo positiva.



**Figura 4.38:** Impacto Ambiental Vs. Ganancia Vs. Huella hídrica, Escenario V.

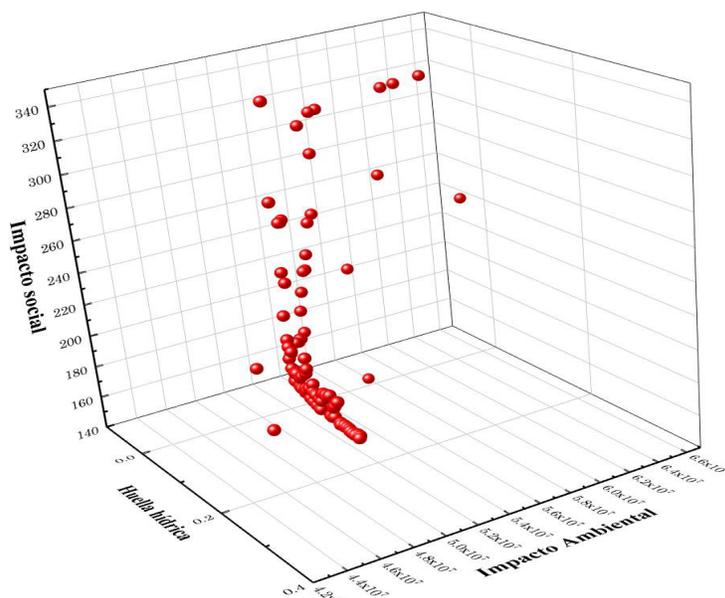


Figura 4.39: Impacto Social Vs. Huella hídrica Vs. Impacto Ambiental, Escenario V.

Finalmente, utilizando la misma metodología que en el caso anterior, con uso de las Ecuaciones 4.1 y 4.2, se obtuvieron los resultados que mantiene en equilibrio los cuatro aspectos. Tal como se muestra en la Figura 4.40, se tiene la posibilidad de satisfacer las demandas de los cuatro objetivos. El mejor resultado consta de una ganancia de 543,968.76 kUSD/año, teniendo una huella hídrica de 0.014, generandose 64,821,000 puntos/año y teniendo alrededor de 237 trabajos generados al año.

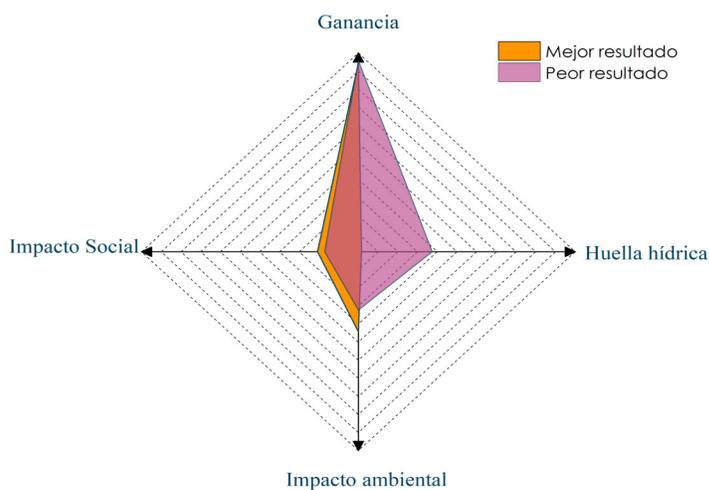


Figura 4.40: Frente de pareto final, Escenario V.

Dicho resultado se basa en la existencia de dos plantas: Veracruz y Coahuila, cuyo trabajo es satisfacer toda la demanda de ácido levulínico y el 10% de la de biobutanol. Tal como se



muestra en la Figura 4.41, todo el biobutanol producido se va hacia Puebla.

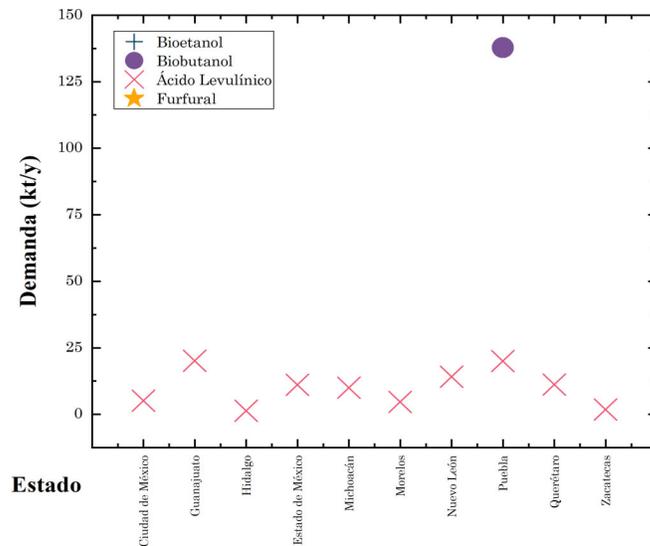


Figura 4.41: Demanda satisfecha por mercado, Escenario V.

Por otra parte, Veracruz es el único productor de biobutanol. Mientras que Coahuila y Veracruz, se encargan de la producción de ácido levulínico, tal como se observa en la Figura 4.42.

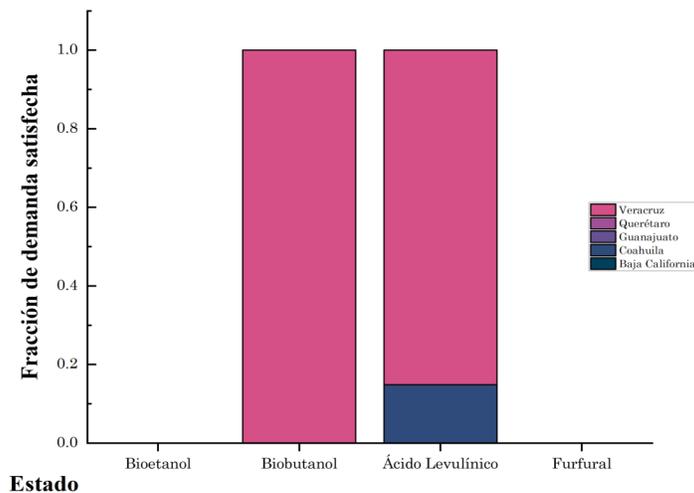


Figura 4.42: Fracción de la demanda satisfecha por planta, Escenario V.

Finalmente, la distribución de la materia prima utilizada se muestra en la Figura 4.43. Se observa que se utiliza principalmente residuos de plantas aledañas e igual que el caso anterior, se utilizan principalmente residuos de maíz. No se utiliza toda la materia prima disponible, ya que lejos de solo querer tener ganancias, se busca también un equilibrio entre las otras funciones objetivo.

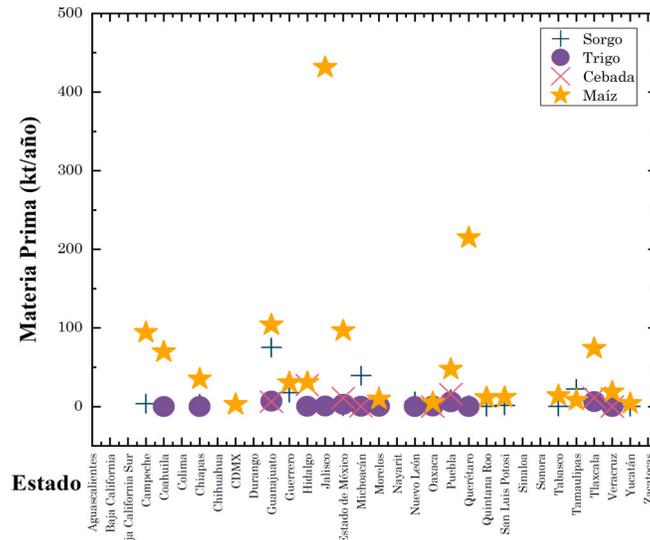


Figura 4.43: Materia prima utilizada, Escenario V.

En cantidades totales, se utilizan 76.28 kt/año de materia prima en Coahuila y 1536.30 kt/año en Veracruz. Cabe mencionar que Veracruz requiere una gran cantidad debido a su producción de biobutanol, ya que como se ha mencionado, tiene bajos rendimientos. La fracción de cada materia prima utilizada por cada planta, se muestra en la Figura 4.44. Tal como se observa, Coahuila solo obtiene residuos del mismo estado y de Nuevo León.

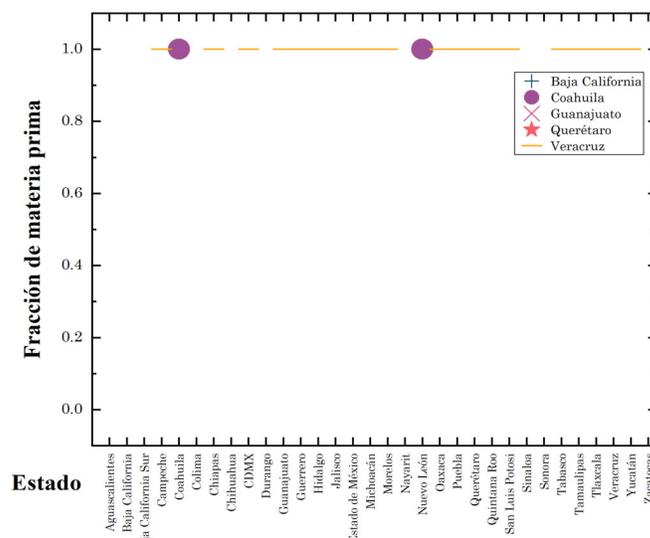
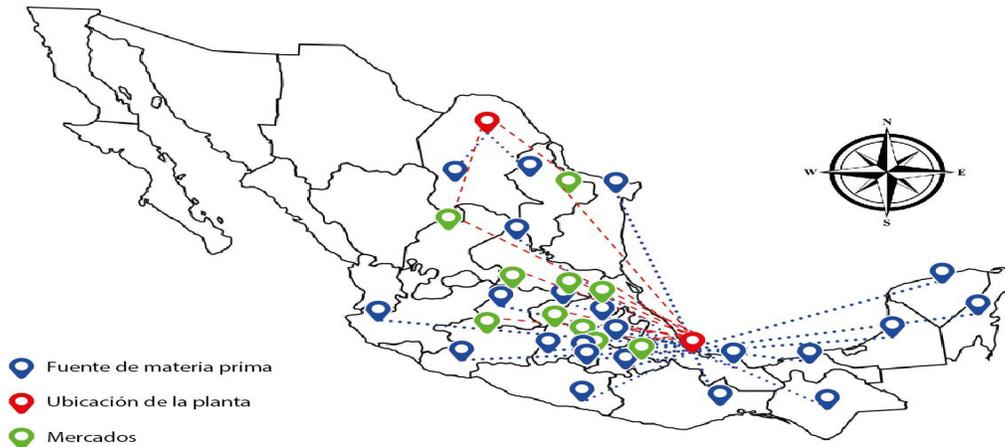


Figura 4.44: Fracción de materia prima utilizada por planta, Escenario V.

De manera general se muestra en la Figura 4.45 la distribución de la cadena de suministro óptima. Analizando los valores de las funciones objetivo con su respectiva cadena de suministro, la huella hídrica resulta muy baja, ya que la ubicación de las plantas correspon-



den a zonas donde el uso de agua no se vería afectado dramáticamente. Por otra parte, el alto impacto social obtenido es favorable, ya que en las zonas donde se ubican las plantas, requieren la generación de empleos para poder sostenerse.



**Figura 4.45:** Cadena de suministro final, Escenario V.

Realizando una comparación entre los escenarios IV y V, tal como se muestra en la Tabla 4.7, se pueden observar ciertas diferencias entre las funciones objetivo analizadas. En términos de ganancia, es más rentable la producción de bioetanol, esto se atribuye a mejor rendimiento frente al biobutanol. Por otra parte, es importante destacar que utilizando bioetanol se logra satisfacer mayor parte de la demanda, sin embargo, es menor la sustitución del combustible fósil. Analizando la huella hídrica, la producción de ambos biocombustibles muestran valores aceptables, por lo cuál dicho aspecto no resulta considerable. En el caso del impacto ambiental, es tres veces mayor al producir biobutanol que bioetanol, dicho caso se atribuye a que el calor requerido para llevar a cabo la producción de biobutanol es casi dos veces mayor que el del bioetanol. Finalmente, hablando en términos de trabajos generados, resulta más factible producir biobutanol, debido a que se producen el doble de trabajos que en el caso del bioetanol. Sin embargo, comparando los 4 objetivos de manera general, se puede deducir que más factible la producción de biobutanol, ya que es el biocombustible que muestra mejor compromiso con la mayoría de las funciones objetivo.

**Tabla 4.7:** Comparación de funciones objetivo entre Escenario IV y V.

Biocombustible	Ganancia (kUSD/año)	Huella hídrica	Impacto ambiental (puntos/año)	Impacto social (trabajos/año)
Bioetanol	570,420.57	0.048	24,041,000	135
Biobutanol	543,968.76	0.014	64,821,000	237



# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo a futuro

### 5.1. Conclusiones

Se ha elaborado un modelo matemático para determinar la cadena de suministro óptima sostenible para el uso de la biomasa lignocelulósica con el fin de obtener potencialmente una variedad de productos renovables en México. Dicho modelo se puede utilizar para la selección de la materia prima más apropiada, la localización de las plantas así como tipos de productos y su distribución. En primer lugar, se estudia el efecto de las variaciones en la disponibilidad de materias primas y la demanda de productos. Se ha determinado que, para obtener la mayor ganancia, la biomasa debe utilizarse para producir productos de alto valor añadido, como el ácido levulínico. Sin embargo, si se desea cumplir con los requisitos de los biocombustibles, se puede hacer parcialmente pero la ganancia se reduciría. Una mayor proporción de la demanda de combustible puede satisfacerse con bioetanol, en comparación con el biobutanol. La ganancia depende en gran medida de la demanda de ácido levulínico, por lo que se debe considerar la posibilidad de utilizar productos de alto valor agregado para aumentar o mantener la ganancia.

Por otra parte, se formuló matemáticamente como un problema MILP de múltiples objetivos, que busca maximizar la ganancia, minimizar el impacto ambiental, maximizar el impacto social y minimizar la huella hídrica. Del análisis satisfaciendo bioetanol y biobutanol, se concluye que se pueden satisfacer ambas proporciones (10%); sin embargo, el producir bioetanol produce mayor ganancia e impacto social, caso contrario con el biobutanol. Esto se puede atribuir a las tecnologías utilizadas para el desarrollo del modelo matemático. Aunado a esto, es importante destacar que las soluciones obtenidos por el presente enfoque indican que el modelo puede proporcionar curvas de Pareto para evaluar las compensaciones entre objetivos



económicos, ambientales y sociales considerados. Las soluciones de Pareto pueden proporcionar conocimiento para la selección de la solución que muestre el mejor compromiso entre los objetivos considerados.

Los resultados del presente estudio muestra que se pueden obtener soluciones rentables en México, seleccionando material lignocelulósico, dicho material esta disponible todo el año y al utilizar dicha materia prima se contribuye al cuidado del medio ambiente. La producción de biocombustibles contribuye al cuidado del medio ambiente, así mismo la producción de productos de alto valor agregado ofrece una solución rentable en el enfoque de biorrefinerías. De igual manera, dicho enfoque contribuye a la generación de empleos, creando más de 100 empleos. Finalmente, el desarrollo de tecnologías más eficientes es obligatorio para obtener un mejor rendimiento económico y ambiental, aumentando el rendimiento y reduciendo los costos de producción. Además, las materias primas adicionales deben ser considerado, en particular para la temporada de otoño-invierno, en la que la disponibilidad de los residuos lignocelulósicos tienden a reducirse.

## 5.2. Trabajo a futuro

- Desarrollar tecnologías que aprovechen de manera más eficiente los residuos agrícolas hacia biocombustibles. En términos de rendimiento así como eficiencia energética.
- Considerar mayor cantidad de residuos agrícolas, ya que los considerados en este trabajo fueron de un solo municipio por cada uno de los 32 estados del país. Siendo así mayor la cantidad de materia prima disponible.
- Tener en cuenta otros productos de alto valor agregado, ya que aparte de los utilizados en este trabajo, existe una amplia gama de opciones que pueden ser rentables.
- Analizar la incertidumbre al existir una variación en los precios de venta, ya que la cadena de suministro es esencialmente sensible a dichos parámetros utilizados.
- Realizar una optimización estocástica para que, analizando las incertidumbres, se dé una propuesta general sin tener que forzar al algoritmo a incidir en una solución determinada.



# Nomenclatura

## Conjuntos

$i$	Tipo de residuo agrícola
$j$	Estado fuente de biomasa
$k$	Localización de la planta
$m$	Producto
$n$	Mercado

## Funciones objetivo

$AH$	Huella hídrica	
$EI$	Impacto Ambiental	[puntos/año]
$GN$	Ganancia	[kUSD/año]
$SI$	Impacto Social	[trabajos/año]

## Modelo matemático

$Demand(m, n)$	Demanda del producto $m$ en el mercado $n$	[kton/año]
$FP(m, k, n)$	Producto $m$ producido en planta $k$ para el mercado $n$	[kt/año]
$RMAF(i, j, k, m)$	Materia prima $i$ del lugar $j$ para la planta $k$ produciendo $m$	[kton/año]
$Y(k)$	Variable binaria, define existencia de planta $k$	
$S(m, k)$	Variable binaria, define existencia de producto $m$ en mercado $k$	
$TCP(k)$	Costo total de producción en planta $k$	[kUSD/año]
$TCRM(k)$	Costo total de materia prima en planta $k$	[kUSD/año]
$TCT(k)$	Costo total del terreno en planta $k$	[kUSD/año]
$TSP(i, j, k)$	Costo total de transporte de residuo $i$ de la fuente $j$ hacia $k$	[kUSD/año]



---

$TPM(m, k, n)$  Costo total de transporte de producto  $m$  de la planta  $k$  hacia  $n$  [kUSD/año]

$UDemand(m)$  Demanda no satisfecha del producto  $m$  [kton/año]

### Parámetros

$AW(m)$  Agua necesaria para producir  $m$  [hm<sup>3</sup>/kt]

$CP(m)$  Costo de producción de  $m$  [kUSD/kt]

$D_1(i, j, k)$  Distancia de  $i$  del residuo  $j$  hacia  $k$  [km]

$D_2(k, n)$  Distancia de la planta  $k$  hacia el mercado  $n$  [km]

$ECO_E$  Ecoindicador de electricidad [puntos/kWh]

$ECO_H$  Ecoindicador de gas térmico [puntos/MJ]

$ECOT_1$  Ecoindicador de transporte de sólidos [puntos/km·kton]

$ECOT_2$  Ecoindicador de transporte de líquidos [puntos/km·kton]

$electricity(m)$  Electricidad requerida para producir  $m$  [kWh/kt]

$heat(m)$  Calor requerido para producir  $m$  [MJ/kt]

$JG_1(i)$  Trabajo generado para procesamiento de  $i$  [trabajo/kt]

$JG_{21}$  Trabajo generado por transporte de sólidos [trabajo/km·kt]

$JG_{22}$  Trabajo generado por transporte de líquidos [trabajo/km·kt]

$JG_3(i, m)$  Trabajo generado para procesamiento de  $i$  hacia  $m$  [trabajo/kt]

$PD(m, n)$  Demanda del producto  $m$  en el mercado  $n$  [kL/año]

$RMA(i, j)$  Materia prima  $i$  disponible del lugar  $j$  [kt/año]

$SP(m)$  Precio de venta del producto  $m$  [kUSD/kt]

$UPLT$  Precio unitario para el transporte de líquidos [kUSD/km·kt]

$UPST$  Precio unitario para el transporte de sólidos [kUSD/km·kt]

$WAP(k)$  Agua disponible en la planta  $k$  [hm<sup>3</sup>/año]

### Productos

$BE$  Bioetanol

$BB$  Biobutanol

$LA$  Ácido Levulínico

$F$  Furfural



# Bibliografía

- Agencia Internacional de Energía (2019). Emisiones de CO<sub>2</sub> originadas por el transporte. Recuperado de: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.CO2.TRAN.ZS?end=2014&locations=MX&start=1971&view=chart>.
- Appropedia (2012). Biobutanol as fuel. Recuperado de: [https://www.appropedia.org/Biobutanol\\_-\\_as\\_fuel](https://www.appropedia.org/Biobutanol_-_as_fuel).
- Arena República (2019). Etanol, a 17 pesos el litro, una alternativa ante el desabasto de gasolinas. Recuperado de: <https://www.arenapublica.com/negocios/etanol-17-pesos-el-litro-una-alternativa-ante-el-desabasto-de-gasolinas>.
- Arsham, H. (1994). Modelos Deterministas: Optimización Lineal. Recuperado de: <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishD.htm>.
- Balat, M. y Balat, H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, 86(11), 2273–2282.
- Baral, N. R. y Shah, A. (2016). Techno-economic analysis of cellulosic butanol production from corn stover through acetone–butanol–ethanol fermentation. *Energy & Fuels*, 30(7), 5779–5790.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis:: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281–294.
- Bernardi, A., Giarola, S., y Bezzo, F. (2012). Optimizing the economics and the carbon and water footprints of bioethanol supply chains. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(6), 656–672.
- Bhogeswararao, S. y Srinivas, D. (2015). Catalytic conversion of furfural to industrial chemicals over supported pt and pd catalysts. *Journal of Catalysis*, 327, 65–77.



- Cai, C. M., Zhang, T., Kumar, R., y Wyman, C. E. (2014). Integrated furfural production as a renewable fuel and chemical platform from lignocellulosic biomass. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 89(1), 2–10.
- Çalışkan Eleren, S., Öziş Altınçekiç, Ş., y Altınçekiç, E. (2018). Biofuel potential of fruit juice industry waste. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(4).
- Carrillo-Nieves, D., Alanís, M. J. R., de la Cruz Quiroz, R., Ruiz, H. A., Iqbal, H. M., y Parra-Saldívar, R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 63–74.
- Chang, K.-H. (2014). *Design theory and methods using CAD/CAE: The Computer Aided Engineering Design Series*. Academic Press.
- Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E., Heredia-Olea, E., y Serna-Saldívar, S. O. (2011). Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(3), 529–549.
- Comisión Nacional del Agua (2018). *Estadísticas del agua en México*. Technical report, CONAGUA, México. Recuperado de: <http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM{-}2018.pdf>.
- Consultants, P. (2000). Eco-indicator 99 manual for designers. *Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment*.
- Costagliola, M. A., Prati, M. V., Florio, S., Scorletti, P., Terna, D., Iodice, P., Buono, D., y Senatore, A. (2016). Performances and emissions of a 4-stroke motorcycle fuelled with ethanol/gasoline blends. *Fuel*, 183, 470–477.
- Dahman, Y., Dignan, C., Fiayaz, A., y Chaudhry, A. (2019). An introduction to biofuels, foods, livestock, and the environment. In *Biomass, Biopolymer-Based Materials, and Bioenergy* (pp. 241–276). Elsevier.
- DalinYebo (2014). Furfural Market Prices. Recuperado de: <https://dalinyebo.com/furfural-market-prices-2014/>.
- Dalvand, K., Rubin, J., Gunukula, S., Wheeler, M. C., y Hunt, G. (2018). Economics of biofuels: Market potential of furfural and its derivatives. *Biomass and Bioenergy*, 115, 56–63.



- Damián-Huato, M. A., Cruz-Leon, A., Ramirez-Valverde, B., Romero-Arenas, O., Moreno-Limón, S., y Reyes-Muro, L. (2013). Maíz, Alimentación Y Productividad: Modelo Tecnológico Para Productores De Temporal De México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 10(2), 157–176.
- de Jong, S., Hoefnagels, R., Wetterlund, E., Pettersson, K., Faaij, A., y Junginger, M. (2017). Cost optimization of biofuel production—the impact of scale, integration, transport and supply chain configurations. *Applied Energy*, 195, 1055–1070.
- Demirbas, A. (2017). Tomorrow’s biofuels: Goals and hopes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(7), 673–679.
- Diario Oficial de la Federación (2018). *LINEAMIENTOS POR LOS QUE SE ESTABLECEN LAS ESPECIFICACIONES DE CALIDAD Y CARACTERÍSTICAS PARA ETANOL ANHIDRO (BIOETANOL), BIODIÉSEL Y BIOTURBOSINA PUROS*. Technical report. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_{\\_}detalle.php?codigo=5541659{&}fecha=22/10/2018](https://www.dof.gob.mx/nota_{_}detalle.php?codigo=5541659{&}fecha=22/10/2018).
- Diwekar, U. M. y Ulas, S. (2000). Sampling techniques. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
- Dutta, S., De, S., Saha, B., y Alam, M. I. (2012). Advances in conversion of hemicellulosic biomass to furfural and upgrading to biofuels. *Catalysis Science & Technology*, 2(10), 2025–2036.
- El Informador (2019). Serán siete las refinerías de México en 2022. Recuperado de: <https://www.informador.mx/Seran-siete-las-refinerias-de-Mexico-en-2022-t201905090003.html>.
- Fu, Y. y Diwekar, U. M. (2004). An efficient sampling approach to multiobjective optimization. *Annals of Operations Research*, 132(1-4), 109–134.
- Galletti, A. M. R., Antonetti, C., De Luise, V., Licursi, D., y Nassi, N. (2012). Levulinic acid production from waste biomass. *BioResources*, 7(2), 1824–1835.
- García, C. y Masera, O. (2016). *Estado del Arte de la Bioenergía en México*. Recuperado de: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Reservas-probadas-de-hidrocarburos-enMexico-duraran-8-5-anos-al-ritmo-de-produccion-actual-20190417-0068.html>.
- García, K. (2019). Reservas probadas de hidrocarburos en México durarán 8.5 años al ritmo de producción actual. Recuperado de: <https://www.eleconomista.com>.



---

[com.mx/empresas/Reservas-probadas-de-hidrocarburos-en-Mexico-duraran-8-5-anos-al-ritmo-de-produccion-actual-20190417-0068.html](http://com.mx/empresas/Reservas-probadas-de-hidrocarburos-en-Mexico-duraran-8-5-anos-al-ritmo-de-produccion-actual-20190417-0068.html).

- Gerbens-Leenes, W., Hoekstra, A. Y., y van der Meer, T. H. (2009). The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10219–10223.
- Gozan, M., Ryan, B., y Krisnandi, Y. (2018). Techno-economic assessment of levulinic acid plant from sorghum bicolor in indonesia. In *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, volume 345.
- Hahn-Hägerdal, B., Galbe, M., Gorwa-Grauslund, M.-F., Lidén, G., y Zacchi, G. (2006). Bio-ethanol—the fuel of tomorrow from the residues of today. *Trends in Biotechnology*, 24(12), 549–556.
- Han, M., Kang, K. E., Kim, Y., y Choi, G.-W. (2013). High efficiency bioethanol production from barley straw using a continuous pretreatment reactor. *Process Biochemistry*, 48(3), 488–495.
- Hayes, D. J., Fitzpatrick, S., Hayes, M. H., y Ross, J. R. (2006). The biofine process—production of levulinic acid, furfural, and formic acid from lignocellulosic feedstocks. *Biorefineries—Industrial Processes and Product*, 1, 139–164.
- Hiloidhari, M., Das, D., y Baruah, D. (2014). Bioenergy potential from crop residue biomass in india. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 504–512.
- IMPLAN (2020). Economic Impact Analysis. Recuperado de: [www.implan.com/](http://www.implan.com/).
- Jaramillo, A. (2019). Datos para entender el consumo de gasolina en México. Recuperado de: <https://www.merca20.com/datos-para-entender-el-consumo-de-gasolina-en-mexico/>.
- Kamm, B., Gruber, P. R., y Kamm, M. (2006). *Biorefineries-industrial processes and products*. Number 1. Wiley-VCH Weinheim.
- Kazi, F. K., Fortman, J. A., Anex, R. P., Hsu, D. D., Aden, A., Dutta, A., y Kothandaraman, G. (2010). Techno-economic comparison of process technologies for biochemical ethanol production from corn stover. *Fuel*, 89, S20–S28.
- Kenton, W. (2020). Supply Chain. Recuperado de: <https://www.investopedia.com/terms/s/supplychain.asp#:~:text=Asupplychainisanelworkbetweena,vendors%2Cwarehouses%2Ctransportationcompanies%2Cdistributioncenters%2Candretailers.>



- Kim, J., Realff, M. J., y Lee, J. H. (2011). Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 35(9), 1738–1751.
- Koski, J. y Silvennoinen, R. (1987). Norm methods and partial weighting in multicriterion optimization of structures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 24(6), 1101–1121.
- Lanziano, C., Costa, M., Moya, S., Barrett, D., Rodella, C., y Guirardello, R. (2018). Ni/tio<sub>2</sub> catalysts for liquid-phase hydrogenation of levulinic acid to  $\gamma$ -valerolactone. *Chemical Engineering Transactions*, 65, 139–144.
- Larson, E. D. (2008). : United Nations Conference on Trade and Development New York and Geneva.
- Lee, S. y Grossmann, I. E. (2000). New algorithms for nonlinear generalized disjunctive programming. *Computers & Chemical Engineering*, 24(9-10), 2125–2141.
- Lee, Y.-G., Jin, Y.-S., Cha, Y.-L., y Seo, J.-H. (2017). Bioethanol production from cellulosic hydrolysates by engineered industrial *saccharomyces cerevisiae*. *Bioresource Technology*, 228, 355–361.
- Levine, J. S. (1991). *Global biomass burning: atmospheric, climatic, and biospheric implications*. MIT press.
- Liu, S. (2020). *Bioprocess engineering: kinetics, sustainability, and reactor design*. Elsevier.
- Mamman, A. S., Lee, J.-M., Kim, Y.-C., Hwang, I. T., Park, N.-J., Hwang, Y. K., Chang, J.-S., y Hwang, J.-S. (2008). Furfural: Hemicellulose/xylo-derived biochemical. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy*, 2(5), 438–454.
- Marketwatch (2019). *Mercado de ácido levulínico 2019*. Technical report. Recuperado de: <https://www.marketwatch.com/press-release/levulinic-acid-market-2019-global-industry-company-profile-brief-analysis-by-regions-growth-prospects-future-scope-and-trends-by-forecast-2024-2019-04-10>.
- Marvin, W. A., Schmidt, L. D., y Daoutidis, P. (2013). Biorefinery location and technology selection through supply chain optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(9), 3192–3208.



- Mercado Libre (2020). 3000 pacas de rastrojo de sorgo y de maíz. Recuperado de: <https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-776767869-3000-pacas-de-rastrojo-de-sorgo-y-de-maiz{-}JM{#}position=1{&}type=item{&}tracking{-}id=373cabcd-850e-4e4d-97e3-e39d2a33c3f1>.
- Moreno, J. A. y Cubillos Lobo, J. A. (2017). Biobutanol como combustible: una alternativa sustentable. *Investigación Joven*, 4.
- Mozaffarian, M. (2018). Development of advanced biorefinery schemes to be integrated into existing industrial fuel producing complexes. final report. *Policy Studies*, 2017, 2016.
- Murillo-Alvarado, P. E., Ponce-Ortega, J. M., Serna-Gonzalez, M., Castro-Montoya, A. J., y El-Halwagi, M. M. (2013). Optimization of pathways for biorefineries involving the selection of feedstocks, products, and processing steps. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(14), 5177–5190.
- Naum, U. (2017). 2030: el año de la catástrofe del agua en México. Recuperado de: <https://www.forbes.com.mx/2030-ano-la-catastrofe-del-agua-mexico/>.
- OAS (1999). *Estudio de Integración Regional en el Transporte de Carga*. Technical report, Fondo Financiero para el Desarrollo de la Cuenca del Plata, Uruguay. Recuperado de: <http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea75s/begin.htm{#}Contents>.
- Parada, M. P., Osseweijer, P., y Duque, J. A. P. (2017). Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. *Industrial Crops and Products*, 106, 105–123.
- Petróleos Mexicanos (2018). *Anuario Estadístico*. Technical report, PEMEX. Recuperado de: <https://www.pemex.com/ri/Publicaciones/AnuarioEstadisticoArchivos/anuario-estadistico{-}2018.pdf>.
- Pileidis, F. D. y Titirici, M.-M. (2016). Levulinic acid biorefineries: new challenges for efficient utilization of biomass. *ChemSusChem*, 9(6), 562–582.
- Pinto, E. G. (2004). Supply chain optimization using multi-objective evolutionary algorithms.
- Popa, V. I. (2018). *Biomass for Fuels and Biomaterials*. Elsevier B.V. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63774-1.00001-6>.
- Prasad, S., Dhanya, M., Gupta, N., Kumar, A., y others (2012). Biofuels from biomass: a sustainable alternative to energy and environment. *Biochem Cell Arch*, 12(2), 255–260.



- Qi, F., Thakker, C., Zhu, F., Pena, M., San, K.-Y., y Bennett, G. N. (2018). Improvement of butanol production in *Clostridium acetobutylicum* through enhancement of nad (p) h availability. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 45(11), 993–1002.
- Qureshi, N., Saha, B. C., y Cotta, M. A. (2007). Butanol production from wheat straw hydrolysate using *Clostridium beijerinckii*. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 30(6), 419–427.
- Raman, R. y Grossmann, I. E. (1994). Modelling and computational techniques for logic based integer programming. *Computers & Chemical Engineering*, 18(7), 563–578.
- Rendon-Sagardi, M. A., Sanchez-Ramirez, C., Cortes-Robles, G., Alor-Hernandez, G., y Cedillo-Campos, M. G. (2014). Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico. *Applied Energy*, 123, 358–367.
- Reyes, O., Escalante, R., y Matas, A. (2010). La demanda de gasolinas en México: Efectos y alternativas ante el cambio climático. *Economía: Teoría y Práctica*, (32), 83–111.
- Rocha-Meneses, L., Raud, M., Orupöld, K., y Kikas, T. (2017). Second-generation bioethanol production: A review of strategies for waste valorisation. *Agronomy Research*, 15(3), 830–847.
- Romero-García, A. G., Prado-Rúbio, O. A., Contreras-Zarazúa, G., Ramírez-Márquez, C., y Segovia-Hernández, J. (2019). Simultaneous design and controllability optimization for the reaction zone for furfural bioproduction. In *Computer Aided Chemical Engineering*, volume 46 (pp. 133–138). Elsevier.
- Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., y El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal planning and site selection for distributed multi-product biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*, 65, 270–294.
- Santibañez-Aguilar, J. E., Guillen-Gosálbez, G., Morales-Rodríguez, R., Jiménez-Esteller, L., Castro-Montoya, A. J., y Ponce-Ortega, J. M. (2016). Financial risk assessment and optimal planning of biofuels supply chains under uncertainty. *Bioenergy Research*, 9(4), 1053–1069.
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., y Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renewable Energy*, 37(1), 19–27.



- Sassner, P., Galbe, M., y Zacchi, G. (2008). Techno-economic evaluation of bioethanol production from three different lignocellulosic materials. *Biomass and Bioenergy*, 32(5), 422–430.
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14–46.
- Schöppe, H., Kleine-Möllhoff, P., y Epple, R. (2020). Energy and material flows and carbon footprint assessment concerning the production of HMF and furfural from a cellulosic biomass. *Processes*, 8(1).
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Technical report, SIAP, México. Recuperado de: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.
- Shah, N. y Rehan, T. (2014). Bioethanol production from biomass. *Journal Chemistry and Biochemistry*, 2(2), 161–167.
- Signoretto, M., Taghavi, S., Ghedini, E., y Menegazzo, F. (2019). Catalytic production of levulinic acid (la) from actual biomass. *Molecules*, 24(15), 2760.
- Sistema de Información Energética (2019). Volumen de ventas internas de petrolíferos por entidad federativa. Recuperado de: <http://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=cuadro{&}cvequa=PMXE2C03>.
- Solís, J. C. y Sheinbaum, C. (2016). Consumo de energía y emisiones de  $\text{CO}_2$  del autotransporte en México y escenarios de mitigación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(1), 7–23.
- Susmozas, A., Mart, R., Ibarra, D., Eugenio, E., Iglesias, R., Manzanares, P., y Moreno, A. D. (2020). Process Strategies for the Transition of 1G to Advanced Bioethanol Production.
- Tacchini, E., Moreno, V. C., Tugnoli, A., y Cozzani, V. (2020). Technical-economic analysis of processes for the production of levulinic acid. *Chemical Engineering Transactions*, 80, 277–282.
- Trespalacios, F. y Grossmann, I. E. (2015). Improved big-m reformulation for generalized disjunctive programs. *Computers & Chemical Engineering*, 76, 98–103.
- Trujillo-Mata, A., Cortés-Robles, G., Sánchez-Ramírez, C., Alor-Hernández, G., y García-Alcaraz, J. (2016). A system dynamics approach for estimating the water footprint of the bioethanol supply chain in the region of Orizaba in the state of Veracruz, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 203, 171–182.



- 
- Werpy, T. y Petersen, G. (2004). *Top value added chemicals from biomass: volume I—results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas*. Technical report, National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US).
- Wingren, A., Galbe, M., y Zacchi, G. (2003). Techno-economic evaluation of producing ethanol from softwood: Comparison of SSF and SHF and identification of bottlenecks. *Biotechnology Progress*, 19(4), 1109–1117.
- Ya'aini, N., Amin, N. A. S., y Asmadi, M. (2012). Optimization of levulinic acid from lignocellulosic biomass using a new hybrid catalyst. *Bioresource Technology*, 116, 58–65.
- Zeitsch, K. J. (2000). *The chemistry and technology of furfural and its many by-products*. Elsevier.
- Zhang, Q., Dong, J., Liu, Y., Wang, Y., y Cao, Y. (2016). Towards a green bulk-scale biobutanol from bioethanol upgrading. *Journal of Energy Chemistry*, 25(6), 907–910.



## Apéndice A

# Programación Disyuntiva Generalizada GDP

El modelo GDP ejemplifica el problema ejemplificado en las Ecuaciones A.1 y A.2:

$$\min Z = \sum_{k \in K} c_k + f(x) \quad (\text{A.1})$$

s.t.

$$r(x) \leq 0 \quad (\text{A.2})$$

$$\bigvee_{j \in J_k} \begin{bmatrix} Y_{jk} \\ g_{jk}(x) \leq 0 \\ c_k = \gamma_{jk} \end{bmatrix}, k \in K$$

$$\Omega(Y) = True$$

$$x \geq 0, c_k \geq 0, Y_{jk} \in \{true, false\}$$

Una disyunción se compone de un operador OR ( $\bigvee$ ) y una serie de términos. En cada término, están las variables booleanas  $Y_{jk}$ , un conjunto de desigualdades no lineales convexas  $g_{jk}(x)$ ,  $g_{jk}^i : R^n \rightarrow R^1$ ,  $i \in I_{jk}$ ,  $k \in K$ , donde  $I_{jk}$  es un conjunto índice de desigualdades, y una variable de costo  $c_k$ . Si  $Y_{jk}$  es cierto, entonces  $g_{jk}(x) \leq 0$  y  $c_k = \gamma_{jk}$  se cumplen. De lo



contrario, se ignoran las restricciones correspondientes. Las proposiciones lógicas  $\Omega(Y)$  se expresan en forma normal conjuntiva (CNF), como se observa en la Ecuación A.3:

$$\Omega(Y) = \bigwedge_{s=1,2,\dots,S} \left[ \bigvee_{(j,k) \in P_s} (Y_{jk}) \bigvee_{(j,k) \in Q_s} (\neg Y_{jk}) \right] \quad (\text{A.3})$$

donde  $P_s$  es el conjunto de variables booleanas  $Y_{jk}$  que son verdaderas, y  $Q_s$  es el conjunto de variables booleanas  $Y_{jk}$  que son falsas en los apartados  $s, s = 1, 2, \dots, S$ . En CNF, cada apartado que se expresa en términos del operador 'OR' debe ser verdadera (Lee y Grossmann, 2000).

Para solucionar problemas de GDP que implican disyunciones con múltiples términos, se pueden llevar a cabo dos métodos de relajación:

- Big "M". Reformula el problema propuesto reemplazando las variables booleanas  $Y_{jk}$  por variables binarias  $y_{jk}$  y usando restricciones big "M". Las restricciones lógicas  $\Omega(Y)$  se convierten en desigualdades lineales, tal como se muestra en las Ecuaciones A.4 y A.5:

$$\min Z = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \gamma_{jk} y_{jk} + f(x) \quad (\text{A.4})$$

s.t.

$$r(x) \leq 0 \quad (\text{A.5})$$

$$g_{jk}(x) \leq M_{jk}(1 - y_{jk}), j \in J_k,$$

$$Ay \leq a, x \geq 0, y_{jk} \in \{0, 1\}, j \in J_k, k \in K$$

En este modelo,  $M_{jk}$  son parámetros de Big "M" que hacen que las desigualdades  $g_{jk}(x)$  sean redundantes cuando  $y_{jk} = 0$ . Se utiliza si las restricciones dentro de la disyunción son lineales, determinando el valor de M dependiendo del rango de las variables.

- Cascarón convexo. Utiliza una desegregación de variables  $v^j$ , es recomendable para sistemas de ecuaciones no lineales, similar a lo mostrado en las Ecuaciones A.4 y A.5.



## Apéndice B

### Disponibilidad de materia prima

A continuación se muestra de manera detallada la distribución de la materia prima por año y temporada; ya sea primavera-verano (PV) y otoño-invierno (OI).

**Tabla B.1:** Disponibilidad de residuos de sorgo (kt/año).

Estado	2015		2016		2017		2018	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
Aguascalientes	7.40	0	7.00	0	5.73	0	6.36	0
Baja California	67.12	0.16	102.98	0	91.41	0	72.53	0.05
Baja California Sur	1.44	1.71	1.36	1.92	1.04	2.04	1.19	2.13
Campeche	3.27	16.17	3.59	21.47	3.71	17.42	3.73	19.74
Coahuila	102.96	0	37.44	0	44.71	0	79.63	0
Colima	2.54	1.46	2.98	1.23	3.40	1.25	1.91	1.15
Chiapas	2.56	3.69	1.98	3.52	2.95	2.86	3.38	2.72
Chihuahua	43.81	0	28.88	0	23.25	0	17.62	0
CDMX	0	0	0	0	0	0	0	0
Durango	80.15	0	34.94	0	71.33	0	75.56	0
Guanajuato	70.08	0	37.06	0	68.27	0	75.16	0
Guerrero	12.88	9.74	15.51	9.77	18.60	10.48	17.65	10.72
Hidalgo	0.11	0.13	0.13	0.10	0.06	0.10	0.13	0.06
Jalisco	27.01	5.72	26.21	6.27	60.90	6.19	30.53	5.97
Edo. de México	0.87	0.43	0.39	0.38	0.78	0.21	0.55	0.47
Michoacán	32.24	8.15	35.21	7.68	34.96	13.12	39.42	8.28
Morelos	10.81	0.42	14.74	0.34	14.12	0.37	12.97	0.42
Nayarit	1.70	63.80	10.12	52.76	8.73	55.04	7.10	33.47



Nuevo León	3.48	1.58	4.77	3.12	5.99	3.64	6.58	4.64
Oaxaca	0.29	2.94	6.36	2.80	5.86	2.74	6.17	2.57
Puebla	14.84	0	10.96	0	9.65	0	9.34	0
Querétaro	3.58	0	2.43	0	1.43	0	1.78	0
Quintana Roo	0.85	4.25	0.24	4.10	0.38	1.91	0.06	4.88
SLP	1.86	32.02	4.07	23.73	2.25	25.54	1.59	29.97
Sinaloa	50.06	17.42	44.12	12.51	210.48	9.11	353.56	7.09
Sonora	49.80	2.10	40.81	2.04	43.35	6.49	23.65	4.08
Tabasco	3.86	6.96	6.64	7.35	5.14	5.95	0.22	9.07
Tamaulipas	27.27	268.61	45.97	340.25	25.22	328.77	22.38	280.85
Tlaxcala	0	0	0	0	0	0	0	0
Veracruz	3.90	8.17	3.39	3.20	4.02	4.66	2.51	8.22
Yucatán	0.87	0.65	0.71	0.53	0.06	0	0.06	0.26
Zacatecas	7.57	0.10	7.58	0.09	6.75	0.05	9.65	0.06

**Tabla B.2:** Disponibilidad de residuos de trigo (kt/año).

Estado	2015		2016		2017		2018	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
Aguascalientes	0	0	0	0.30	0.24	0	0	0
Baja California	0.62	284.52	0	295.30	0	207.35	0	150.06
Baja California Sur	0	12.15	0	11.07	0	9.36	0	7.13
Campeche	0	0	0	0	0	0	0	0
Coahuila	0	4.92	0	6.64	0	7.22	0.19	5.47
Colima	0	0	0	0	0	0	0	0
Chiapas	0.03	0.1	0.03	0	0.03	0	0.03	$4.72 \cdot 10^{-3}$
Chihuahua	0.31	29.77	0.11	13.09	0.85	9.83	2.15	5.46
CDMX	0	0	0	0	0	0	0	0
Durango	2.50	2.70	3.95	3.46	2.27	3.81	2.02	1.26
Guanajuato	4.67	46.39	5.39	22.43	5.06	25.97	6.81	28.36
Guerrero	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidalgo	0.52	1.14	0.22	1.11	0.61	0.69	0.21	0.60
Jalisco	1.32	23.04	2.54	21.52	2.49	23.20	0.79	22.76
Edo. de México	3.11	0.10	2.00	0.04	2.24	0.05	2.78	0.01
Michoacán	0.93	14.18	0.37	19.35	0.34	26.68	0.25	28.94
Morelos	0.30	0	0.26	0	0.05	0	0.21	0



Nayarit	0	0	0	0	0	0	0	0
Nuevo León	0.48	7.06	0.22	5.70	0.14	7.09	0.04	5.79
Oaxaca	0.90	0.22	1.03	0.22	1.08	0.22	0.64	0.21
Puebla	0.48	0.08	0.67	0.02	0.67	0.02	6.07	0.02
Querétaro	0.19	1.24	0.11	0	0.21	0	0.08	0
Quintana Roo	0	0	0	0	0	0	0	0
SLP	0.21	0.03	0.29	0.14	0.08	$5.83 \cdot 10^{-4}$	0.03	0
Sinaloa	0.19	96.97	0	114.67	0	121.41	0	112.79
Sonora	0	196.14	0	240.52	0	208.14	0	161.93
Tabasco	0	0	0	0	0	0	0	0
Tamaulipas	0.01	4.33	0.01	1.54	0.01	1.48	0.01	0.15
Tlaxcala	8.95	0	6.73	0	6.09	0	6.14	0
Veracruz	0.19	0.04	0.22	0.07	0.18	0.06	0.19	0.08
Yucatán	0	0	0	0	0	0	0	0
Zacatecas	4.50	0.38	2.16	0.19	1.31	0.48	2.78	0.23

**Tabla B.3:** Disponibilidad de residuos de cebada (kt/año).

Estado	2015		2016		2017		2018	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
Aguascalientes	0	0.52	0	0.50	0	0.72	0	0.74
Baja California	4.43	3.92	0.08	47.85	0	31.48	0	0.76
Baja California Sur	0	0	0	0	0	0	0	0
Campeche	0	0	0	0	0	0	0	0
Coahuila	0	7.65	0	7.49	0	7.27	0	8.31
Colima	0	0	0	0	0	0	0	0
Chiapas	0	0	0	0	0	0	0	0
Chihuahua	0	0.63	0.32	0.60	0.17	0	0	0
CDMX	0	0	0	0	0	0	0	0
Durango	2.01	0.05	2.61	1.23	8.22	2.31	8.98	1.41
Guanajuato	5.61	30.99	4.62	0.30	4.57	44.35	6.41	40.79
Guerrero	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidalgo	24.70	5.10	30.38	4.29	25.67	4.06	27.51	3.87
Jalisco	13.50	2.05	12.26	1.99	3.90	2.27	2.34	2.30
Edo. de México	8.24	0.17	9.49	0	7.99	0	11.03	0
Michoacán	0.55	0.85	0.50	2.90	0.54	4.08	0.31	4.00



Morelos	0	0	0	0	0	0	0	0
Nayarit	0	0	0	0	0	0	0	0
Nuevo León	1.04	0.28	1.50	0.17	0.15	0.05	0.17	0.05
Oaxaca	0.02	0.01	0.03	$4.10 \cdot 10^{-3}$	0.03	0.01	0.03	$4.98 \cdot 10^{-3}$
Puebla	8.15	0.98	9.81	1.02	19.08	0.01	15.85	0.03
Querétaro	0.03	4.95	0.01	7.85	0.01	10.52	0	9.46
Quintana Roo	0	0	0	0	0	0	0	0
SLP	0.98	0.39	5.39	0.17	4.36	0.07	4.47	0.45
Sinaloa	0	0	0	0	0	0	0	0
Sonora	0	9.70	0	8.69	0	7.12	0	6.93
Tabasco	0	0	0	0	0	0	0	0
Tamaulipas	0.07	0	0.01	0	0	0	0.04	0
Tlaxcala	16.04	0	10.57	0	10.47	0	11.34	0
Veracruz	0.14	0.60	0.13	0.57	0.13	0.56	0.12	0.60
Yucatán	0	0	0	0	0	0	0	0
Zacatecas	6.58	3.43	20.35	3.59	5.60	3.34	8.79	3.29

**Tabla B.4:** Disponibilidad de residuos de maíz (kt/año).

Estado	2015		2016		2017		2018	
	PV	OI	PV	OI	PV	OI	PV	OI
Aguascalientes	206.19	0	210.69	0	208.56	0	209.56	0
Baja California	5.60	0	10.74	0	15.62	8.80	7.21	1.24
Baja California Sur	8.94	7.50	13.17	12.34	13.37	18.76	5.74	17.55
Campeche	105.54	7.08	110.45	6.82	113.12	5.00	94.17	6.41
Coahuila	117.50	0	64.70	0	220.60	0	174.19	0
Colima	5.30	2.71	5.75	2.61	13.59	2.81	6.69	3.37
Chiapas	31.72	10.47	45.18	12.08	47.86	13.55	34.98	13.32
Chihuahua	237.08	0.01	213.73	0.01	237.98	0	273.69	0
CDMX	0.90	0	2.75	0	2.56	0	2.63	0
Durango	248.51	0.06	487.13	0.06	451.96	0.04	519.77	0.02
Guanajuato	67.46	0.54	139.10	0.30	99.46	0.28	103.84	0.60
Guerrero	33.18	6.21	35.39	6.34	33.88	6.43	30.35	6.77
Hidalgo	38.69	4.56	30.69	3.96	29.99	4.09	30.77	3.39
Jalisco	289.09	3.53	397.76	4.50	409.27	5.04	435.96	4.95
Edo. de México	102.34	0.30	128.63	0.40	113.75	0.33	96.42	0.37



---

Michoacán	50.75	2.36	45.70	4.21	44.46	3.32	51.54	3.30
Morelos	2.90	0.21	6.63	0.11	6.21	0.11	9.53	0.15
Nayarit	53.10	8.69	63.38	7.46	55.92	13.50	57.75	7.81
Nuevo León	31.24	0.40	38.31	0.27	14.18	0.91	6.89	0.60
Oaxaca	4.58	6.24	4.99	6.91	4.82	5.98	5.16	5.81
Puebla	40.72	3.79	48.52	3.60	48.38	2.51	47.40	2.69
Querétaro	242.55	0.22	224.26	0.20	217.64	0.05	214.64	0.03
Quintana Roo	4.98	1.60	6.15	1.29	13.33	1.53	11.34	2.78
SLP	13.23	6.92	12.93	8.25	10.83	13.35	11.77	36.43
Sinaloa	50.97	465.20	57.76	465.04	79.81	449.06	109.13	473.65
Sonora	14.43	11.29	14.86	24.41	8.51	39.23	7.30	112.37
Tabasco	12.70	10.34	13.71	7.39	11.59	5.51	13.87	8.82
Tamaulipas	8.46	142.60	11.99	173.87	11.40	81.63	7.88	86.63
Tlaxcala	70.18	0	80.77	0	79.55	0	73.86	0
Veracruz	18.58	15.39	20.17	12.52	20.41	13.51	18.42	13.87
Yucatán	4.72	9.59	3.47	6.16	6.66	7.97	4.08	10.40
Zacatecas	245.45	0.11	266.11	0.11	230.05	0.08	287.89	0.10

---



## Apéndice C

### Método de restricción $\varepsilon$

El método utiliza la técnica de Hammersley para generar combinaciones de los lados derechos  $\varepsilon_i (i = 1, \dots, k, i = l)$  del método tradicional de restricción. Los pasos para un problema multiobjetivo con objetivos  $k$  se muestra en la Figura C.1.



**Figura C.1:** Diagrama de flujo para solución de problema multiobjetivo.

El diseño de los puntos de Hammersley se muestra a continuación. Cualquier número entero  $n$  puede ser escrito en notación radix- $R$  ( $R$  es un número entero), tal como se muestran en las Ecuaciones C.1 y C.2:

$$n \equiv n_m n_{m-1} \dots n_2 n_1 n_0 \quad (C.1)$$

$$n = n_0 + n_1 R + n_2 R^2 + \dots + n_m R^m \quad (C.2)$$



donde  $m = \lceil \log_R n \rceil = \lceil \ln n / \ln R \rceil$  (los corchetes denotan la parte integral). Una fracción única entre 0 y 1 llamada el número de radix inverso puede construirse invirtiendo el orden de los dígitos de  $n$  alrededor del punto decimal, tal como se observa en la Ecuación C.3:

$$\varphi_R(n) = n_0 n_1 n_2 \dots n_m = n_0 R^{-1} + n_1 R^{-2} + \dots + n_m R^{-m-1} \quad (\text{C.3})$$

Los puntos de Hammersley en un cubo de dimensión  $k$  están dados por la Ecuación C.4:

$$\vec{z}_k(n) = \left( \frac{n}{N}, \varphi_{R_1}(n), \varphi_{R_2}(n), \dots, \varphi_{R_{k-1}}(n) \right) n = 1, 2, \dots, N \quad (\text{C.4})$$

donde  $R_1, R_2, \dots, R_{k-1}$  son los primeros números primos de  $k-1$ . Los puntos de Hammersley son  $\vec{x}_k(n) = 1 - \vec{z}_k(n)$ .



---

## Apéndice D

# Código del modelo matemático programado en GAMS

Se anexa el link hacía dicho apéndice.

<https://onedrive.live.com/?id=7A41006AA232C292%218978&cid=7A41006AA232C292>