

## **6. Anexos**

## A. Anexo: Productos de la tesis doctoral

### ▪ Artículos:

- A.01 Morales-Chavez, M. M., Costa, Y., & Sarache, W. (2021). *A three-objective stochastic location-inventory-routing model for agricultural waste-based biofuel supply chain*. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107759. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.cie.2021.107759>
- A.02 Morales-Chavez, M. M., Sarache, W., Costa, Y., & Soto, J. (2020). *Multiobjective stochastic scheduling of upstream operations in a sustainable sugarcane supply chain*. *Journal of Cleaner Production*, 123305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123305>
- A.03 Morales-Chavez, M. M., Sarache, W., & Costa, Y. (2018). *Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116 (May), 136–162. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.06.001>
- A.04 Morales-Chavez, M. M., Soto-Mejía, J. A., & Sarache, W. (2016). *A mixed-integer Linear Programming model for harvesting, loading and transporting sugarcane. A case study in Peru*. *DYNA (Colombia)*, 83(195), 173-79. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.49490>

### ▪ Libros:

- L.01 Sarache, W., & Morales Chávez, M. M. (2016). *Localización, transporte e inventarios: tres decisiones estructurales en el diseño de cadenas de abastecimiento*. (Editorial Universidad Nacional de Colombia, Ed.). Bogotá. ISBN: 978-958-775-798-9

### ▪ Capítulos de libro:

- CL.01 Morales-Chavez, M. M., Sarache, W., & Costa, Y. (2020). *A Location-inventory*

*Optimization Model Design for a Lignocellulosic Biomass Biofuel Supply Chain*. In Instituto Tecnológico Autónomo de México (Ed.), *Aplicaciones de la Investigación de Operaciones a la Mejora de Procesos* (pp. 73–79). VIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Investigación de Operaciones (CSMIO 2019). ISBN: 978-607-8242-20-7

- CL.02 Ramírez-Bedoya, N., Morales-Chavez, M. M., & Soto-Mejía, J. A. (2021). Análisis de eficiencia de las biorefinerías colombianas bajo un enfoque sostenible. In Universidad Nacional de Colombia (Ed.), *La sostenibilidad en las cadenas de abastecimiento* (pp. 211–237). ISBN: 978-958-794-441-9

▪ **Ponencias:**

- P.01 *Biofuel Supply Chain Design Using Coffee Crop Residues: The Effect of a Dynamic Capacity Strategy on Sustainable Performance*. *International conference on information system, Logistics & Supply Chain* (ILS 2020). Texas. USA.
- P.02 *A Location-inventory Optimization Model Design for a Lignocellulosic Biomass Biofuel Supply Chain*. VIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Investigación de Operaciones (CSMIO 2019). Ciudad de México. México.
- P.03 *A Three-Objective Stochastic Location-Inventory-Routing Model for Coffee Waste-Based Biofuel Supply Chain*. *Inform ALIO International Conference* (2019). Cancún. México.
- P.04 *Effect of a dynamic capacity strategy on sustainable Supply Chain Design*. I Conferencia Internacional de Ingeniería Industrial (CINDUS 2019). Villa Clara. Cuba.
- P.05 *An integrated model design for a lignocellulosic biomass biofuel supply chain*. *SCALE Latin America Conference* (2018). Massachusetts. USA.
- P.06 Diseño de cadenas de abastecimiento: decisiones estratégicas de transporte, instalaciones e inventarios. I Simposio Internacional de Transporte y V congreso Internacional de ciencias Empresariales (2018). Guayaquil. Ecuador.
- P.07 Diseño de cadena de abastecimiento sostenibles: Algunas experiencias en caña de azúcar y residuos agrícolas. Primer Congreso de Ambiente, Ciencia y Territorio (2018). Vichada. Colombia.

- P.08 Diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, integrando decisiones de instalaciones e inventarios, bajo un enfoque de multiperiodo-multiproducto. IV Coloquio de Investigación Posgrados de Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia (2017). Manizales. Colombia.
- P.09 Modelamiento del eslabón de abastecimiento para una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, bajo un enfoque económico-ambiental. Aplicaciones en el eje cafetero colombiano. *XIX Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research* (CLAIO 2016). Santiago de Chile. Chile.
- P.10 *Modeling of supply echelon for biofuel supply chain from waste coffee, under environmental and economic approach*. III Coloquio de Investigación Posgrados de Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia (2016). Manizales. Colombia.
- P.11 *Optimization of upstream operations in the biofuel supply chain from sugarcane*. Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro (CiLOG 2015). Querétaro. México.
- P.12 El diseño de la cadena de suministro: Un equilibrio necesario entre las decisiones de instalaciones, transporte e inventarios. Tercer simposio nacional de productividad (2015). Medellín. Colombia.
- P.13 Optimización de cadenas de abastecimiento: Caso particular en el sector cañero peruano. I Coloquio de Investigación Posgrados de Ingeniería Industrial. Universidad Nacional de Colombia. Manizales (2014). Colombia.

**Estancias investigativas:**

- EI.01 *University of Applied Sciences Upper Austria*. Desde el 3 de abril al 3 julio de 2017. Steyr, Austria.
- EI.02 *MIT-ZLC Zaragoza Logistics Center*. Desde el 28 de noviembre de 2018 al 28 de febrero de 2019. Zaragoza, España.

**Proyecto COLCIENCIAS:**

- EI.01 PROYECTO COLCIENCIAS 111971551628  
Modelamiento del eslabón de abastecimiento para una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café, integrando decisiones de instalaciones, ruteo e inventarios, bajo un enfoque económico-ambiental. Aplicaciones en el eje cafetero colombiano (2016-2020).

**Conferencias:**

- CF.01 GAMS como herramienta en el diseño de cadenas de suministro. Conferencia internacional online con Software Shop (31-03-2022).
- CF.02 Diseño de cadenas de suministro de energías renovables: *Tade-off* rentabilidad económica e impacto ambiental. Conferencia internacional online con Software Shop (26-05-2022).
- CF.03 Estrategias de configuración de instalaciones en el diseño de la cadena de suministro con GAMS. Conferencia internacional online con Software Shop (18-08-2022).
- CF.04 Modelos multiperiodo en la configuración de la red de suministro con GAMS. Conferencia internacional online con Software Shop (01-09-2022).
- CF.05 La dinámica de la planificación en las cadenas de suministro - Apertura de instalaciones en cualquier periodo de tiempo con GAMS. Conferencia internacional online con Software Shop (06-10-2022).
- CF.06 Diseño de cadenas de suministro sostenibles: *trade-off* rentabilidad económica e impacto ambiental y social. Seminario Nacional de Ingeniería Comercial: Analítica de Datos. Universidad Santiago de Cali (09-11-22).
- CF.07 Expansión de la capacidad de las instalaciones en el diseño de la red de suministro con GAMS. Conferencia internacional online con Software Shop (17-11-2022).
- CF.08 Introducción a GAMS con un problema de gestión de inventarios. Conferencia internacional online con Software Shop (16-03-2023).

## **B. Anexo: Contribuciones con relación directa perspectivas 1 y 2**

El anexo B muestra las contribuciones relevantes encontradas dentro de la perspectiva 1 y 2 de la revisión del estado del arte. La *Perspectiva 1* consideran las contribuciones en *SCND* que integran decisiones de localización, ruteo e inventario en cadenas de suministro en general. En el caso de la perspectiva 2 el *SCND* bajo el enfoque *ILRP*, se centra en el sector de biocombustibles. Para una mejor comprensión de esta tabla, se resumen los siguientes elementos:

- Tipo de cadena de suministro → Directa (F), inversa (Re), ciclo cerrado (Cl).
- Funciones objetivo → Económicas (Eco), ambientales (Env), sociales (Soc).
- Estrategia de establecimiento de instalaciones → ( $T = 0$ ) si las instalaciones se abren en el período inicial, ( $T = t$ ) si las instalaciones se abren en cualquier periodo de tiempo, asignación de capacidad (Ca), expansión de capacidad (Ce), cierre de instalaciones (Cf).
- Composición de la flota de vehículos (FV) → Homogénea (Ho), heterogénea (He).
- Actividad para la que se toman decisiones de ruteo (DRV) → Recolección (R), distribución (Di).
- Número de productos gestionados en la cadena de suministro → Multiproducto (M), producto único (S).
- Número de períodos de tiempo en el horizonte de planificación → Período múltiple (M), período único (S).
- Parámetros inciertos considerados → Suministro (S), demanda (D), otros (O).
- Metodología de solución → Método exacto (Em), algoritmo genético (GA), recocido simulado (SA), colonia de hormigas (ACO), búsqueda tabú (TS), enjambre de partículas (PSO), otros (O).

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post- optimalidad	Investigaciones futuras	
				<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	<i>FV</i>			<i>DRV</i>	<i>S</i>	<i>D</i>					<i>O</i>
1	Liu et al.(2021)	Perecederos	F	✓	✓	✓	0				Ho	Di	M	M				O	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Otros
2	Yuchi et al.(2021)	Otros	Cl	✓			0				Ho	Di	S	S		✓	✓	SATS	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Incertidumbre Metodologías de solución
3	Wu et al.(2021)	Combustible	F	✓			0				Ho	Di	S	M				GAOSA	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada	Incertidumbre Riesgo
4	A. K. Nasr et al.(2021)	Otros	Cl	✓	✓	✓	0				He	Di	M	M				O	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Metodologías de solución Riesgo
5	Rahbari et al.(2022)	Materiales peligrosos y explosivos	F	✓	✓	✓	0				He	Di	M	M				OSAGA	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Incertidumbre Ventanas de tiempo Metodologías de solución
6	Tavana et al.(2021)	Componentes automotrices	F	✓			0				He	Di	M	M				O	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Metodologías de solución Sostenibilidad
7	Rahbari et al.(2021)	Productos perecederos	F	✓			0				He	Di	S	M				Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Incertidumbre Ventanas de tiempo Sostenibilidad Otros
8	Zarrat Dakhely Parast et al.(2021)	Productos perecederos	Cl	✓			0				He	Di	M	M				O	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Metodologías de solución
9	Misni & Lee (2021)	General	Cl	✓			0				He	Di	S	S				O	Instancias tomadas de la literatura	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Sostenibilidad
10	N. Nasr et al.(2021)	Productos perecederos	F	✓			0				Ho	Di	M	M				GAO	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Metodologías de solución Sostenibilidad

**Anexo B:** (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras
				Eco	Env	Soc	T	Ca	Ce	Cf	FV			DRV	S	D				
11	Aloui et al.(2021)	Otros	F	✓	✓		0				He	Di	S	M			O	Experimentos generados aleatoriamente	No presenta	Metodologías de solución Incertidumbre
12	K. Li et al.(2020)	Productos perecederos	F	✓			0				Ho	Di	M	S			ACO	Caso de estudio	Eficiencia entre modelos	No presenta
13	Yavari et al.(2020)	Productos perecederos	F	✓			0				Ho	Di	S	M			GA	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Incertidumbre Sostenibilidad Otros
14	Zandkari mkhani et al.(2020)	Redes humanitarias y salud	F	✓			0				He	Di	M	M		✓	Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Metodologías de solución Sostenibilidad
15	Rabbani et al.(2020)	Residuos industriales	Re	✓		✓	0				He	Di	M	S			Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Metodologías de solución Otras características del modelo Múltiples periodos de tiempo Incertidumbre
16	Karakostas et al.(2020)	General	F	✓	✓		0	✓			He	Di	S	M			O Em	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución
17	Misni et al.(2020)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	S			SA	Experimentos generados aleatoriamente	Comparación instancia	Metodologías de solución Sostenibilidad
18	Kaya & Ozkok (2020)	Redes humanitarias y salud	F	✓			0				He	Di	S	S			SA Em	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos Comparación instancias	Metodologías de solución

**Anexo B:** (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras	
				<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	<i>FV</i>			<i>DRV</i>	<i>S</i>	<i>D</i>					<i>O</i>
19	Ghorashi et al.(2020)	Redes humanitarias y salud	F	✓		✓	0	✓			He	Di	M	M				O PSO GA Em	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Otras características del modelo Flota heterogénea
20	Biuki et al.(2020)	Productos perecederos	F	✓	✓	✓	0	✓			He	Di	M	M		✓		GA PSO O	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Incertidumbre
21	Li & Yang (2020)	General	F	✓			0				He	Di	S	M				TS	Caso de estudio	No presenta	Incertidumbre
22	Rahbari et al.(2021)	Productos perecederos	F	✓			0				He	Di	S	M				Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Incertidumbre Ventanas de tiempo Sostenibilidad
23	Karakostas et al.(2022)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	M				O	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada	Otros
24	Gholipour et al.(2020)	Componentes automotrices	F	✓			0				He	Di	M	M		✓		Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Metodologías de solución
25	Govindan et al.(2020)	Componentes automotrices	Cl	✓	✓	✓	0				He	Di	M	S		✓		Em	Caso de estudio	No presenta	Metodologías de solución Otras características del modelo Sostenibilidad Incertidumbre
26	Ayoughi et al.(2020)	General	Cl	✓	✓	✓	0				Ho	R Di	M	M		✓	✓	O GA	Experimentos generados aleatoriamente	Comparación instancia	No presenta

**Anexo B:** (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras		
				<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	FV			DRV	S	D					O	
27	Fallah-Tafti et al.(2019)	Otros	F	✓		✓	0					He	Di	S	M		✓		Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Sostenibilidad Otras características del modelo Múltiples periodos de tiempo Incertidumbre
28	Karakostas et al.(2019)	General	F	✓			0					Ho	Di	S	M				Em O	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos Comparación instancias	Sostenibilidad Flota heterogénea
29	Saragih et al.(2019)	General	F	✓			0	✓				Ho	Di	S	S				O SA	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada	Otras características del modelo Flota heterogénea Múltiples productos
30	Saif-Eddine et al.(2019)	General	F	✓			0					Ho	Di	S	M				GA	Instancias tomadas de la literatura	Parámetros de entrada	Múltiples niveles Incertidumbre Ventanas de tiempo
31	Fatemi Ghomi & Asgarian (2019)	Productos perecederos	F	✓			0					Ho	Di	S	M				O	Instancias tomadas de la literatura	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Ventanas de tiempo
32	Pourhejazy et al.(2019)	Combustible	F	✓		✓	0					He	Di	S	M				GA	Caso de estudio	Otros	Otros
33	Chao et al.(2019)	Productos perecederos	F	✓			0					Ho	Di	S	S				ACO O	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos Comparación instancias	No presenta

## Anexo B: (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras	
				Eco	Env	Soc	T	Ca	Ce	Cf	FV			DRV	S	D					O
34	Zheng et al.(2019)	Otros	F	✓			0				Ho	Di	S	M		✓		Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Múltiples periodos Otras características del modelo
35	Nakhjirkan et al.(2019)	General	F	✓			0				He	Di	M	S		✓		Em GA O	Caso de estudio	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución
36	Rabbani et al.(2019)	Residuos industriales	Re	✓	✓		0				He	R	M	M	✓		✓	GA O	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Comparación instancias	Metodologías de solución Múltiples niveles
37	Momenikiyai et al.(2018)	General	F	✓			0	✓			Ho	Di	S	S				PSO GA O	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Comparación instancias	Sostenibilidad Múltiples productos Múltiples periodos de tiempo
38	Tavana et al.(2018)	Redes humanitarias y salud	F	✓			0	✓			He	Di	M	M				Em GA	Experimentos generados aleatoriamente	Otros	Incertidumbre Otros
39	Habibi et al.(2018)	Biocombustible	F	✓			0				Ho	Di	S	S				SA GA O	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos Comparación instancias	Metodologías de solución Incertidumbre Sostenibilidad
40	Asadi et al.(2018)	Biocombustible	F	✓	✓		0				Ho	Di	S	S		✓		PSO GA	Caso de estudio Instancia tomadas de la literatura	Eficiencia entre modelos Comparación instancias	Otras características del modelo Múltiples productos Múltiples periodos de tiempo

**Anexo B:** (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras	
				<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	<i>FV</i>			<i>DRV</i>	<i>S</i>	<i>D</i>					<i>O</i>
41	Forouzanfar et al.(2018)	Componentes automotrices	Cl	✓			0	✓			Ho	Di	S	M				PSO GA	Caso de estudio	Eficiencia entre modelos Comparación instancias	Metodologías de solución Ventanas de tiempo Incertidumbre
42	Vahdani et al.(2018)	Redes humanitarias y salud	F	✓		✓	0	✓			He	Di	M	M			✓	PSO GA	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Otros	Incertidumbre
43	Rafie-Majd et al.(2018)	Productos perecederos	F	✓			0	✓			He	Di	M	M		✓		O	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos Comparación instancias	Metodologías de solución Incertidumbre
44	Kechmane et al.(2018)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	M				GA	Experimentos generados aleatoriamente	Comparación instancia	Flota heterogénea Ventanas de tiempo Incertidumbre
45	Saragih et al.(2018)	General	F	✓			0	✓			Ho	Di	M	S				Em	Experimentos generados aleatoriamente	No presenta	Metodologías de solución
46	Guo et al.(2018)	General	Cl	✓			0				Ho	Di	S	S				O SA GA	Instancias tomadas de la literatura	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Otras características del modelo Riesgo
47	Zhao & Ke (2017)	Materiales peligrosos y explosivos	Re	✓	✓		0				Ho	Di	M	S				O	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Comparación instancias	Incertidumbre Sostenibilidad
48	Rayat et al.(2017)	General	F	✓			0	✓			He	Di	M	M		✓		SA	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada	Incertidumbre Sostenibilidad
49	Nakhjirkan & Rafiei (2017)	Otros	F	✓			0				He	Di	M	S		✓		GA Em	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	No presenta

## Anexo B: (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras	
				Eco	Env	Soc	T	Ca	Ce	Cf	FV			DRV	S	D					O
50	Gholamian & Heydari (2017)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	S		✓	✓	SA GA	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Otras características del modelo Flota heterogénea Múltiples niveles Sostenibilidad
51	Hiassat et al.(2017)	Productos perecederos	F	✓			0				Ho	Di	S	M				GA	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución
52	Habibi et al.(2017)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	S		✓	✓	SA GA	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Sostenibilidad Múltiples niveles
53	Lerhlaly et al.(2016)	Materiales peligrosos y explosivos	F	✓	✓		0				He	Di	S	M				Em	Caso de estudio	Comparación instancia	Metodologías de solución
54	Ghorbani & Jokar (2016)	Componentes automotrices	F	✓			0	✓			Ho	Di	M	M				O SA	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución
55	Zhalechian et al.(2016)	Otros	Cl	✓	✓	✓	0	✓			He	Di	M	M		✓	✓	O GA	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Riesgo
56	Vanajakumari et al.(2016)	Redes humanitarias y salud	F	✓			0				He	Di	M	M				Em	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada	Redes humanitarias y salud
57	Tang et al.(2016)	Combustible	F	✓	✓		0				Ho	Di	S	S				PSO	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Incertidumbre
58	K. Li et al.(2016)	Productos perecederos	F	✓			0				Ho	Di	S	S				PSO	Caso de estudio	Eficiencia entre modelos	No presenta

**Anexo B:** (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras	
				<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	<i>FV</i>			<i>DRV</i>	<i>S</i>	<i>D</i>					<i>O</i>
59	Tavakkoli-Moghaddam & Razi (2016)	General	F	✓		✓	0				He	Di	M	M		✓		Em	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada	Metodologías de solución Otros
60	Angazi (2016)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	S		✓		O	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Múltiples periodos de tiempo
61	Deng et al.(2016)	Otros	Cl	✓			0				Ho	Di	S	S				ACO	Instancias tomadas de la literatura	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Incertidumbre
62	Qunli Yuchi et al.(2016)	General	Cl	✓			0				Ho	Di	M	S				TS	Experimentos generados aleatoriamente Instancias tomadas de la literatura	Parámetros de entrada	Incertidumbre
63	B. Liu et al.(2015)	Otros	Cl	✓			0				Ho	Di	S	S		✓		SA GA	Instancias tomadas de la literatura	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Incertidumbre
64	Guerrero et al.(2015)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	M				O	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Incertidumbre
65	Zhang et al.(2014)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	M				Em O	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Incertidumbre
66	Nekooghadirli et al.(2014)	General	F	✓			0	✓			He	Di	M	M		✓	✓	O SA GA	Experimentos generados aleatoriamente	Parámetros de entrada Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Incertidumbre Otros
67	Guerrero et al.(2013)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	M				Em O	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Otras características del modelo

## Anexo B: (Continuación)

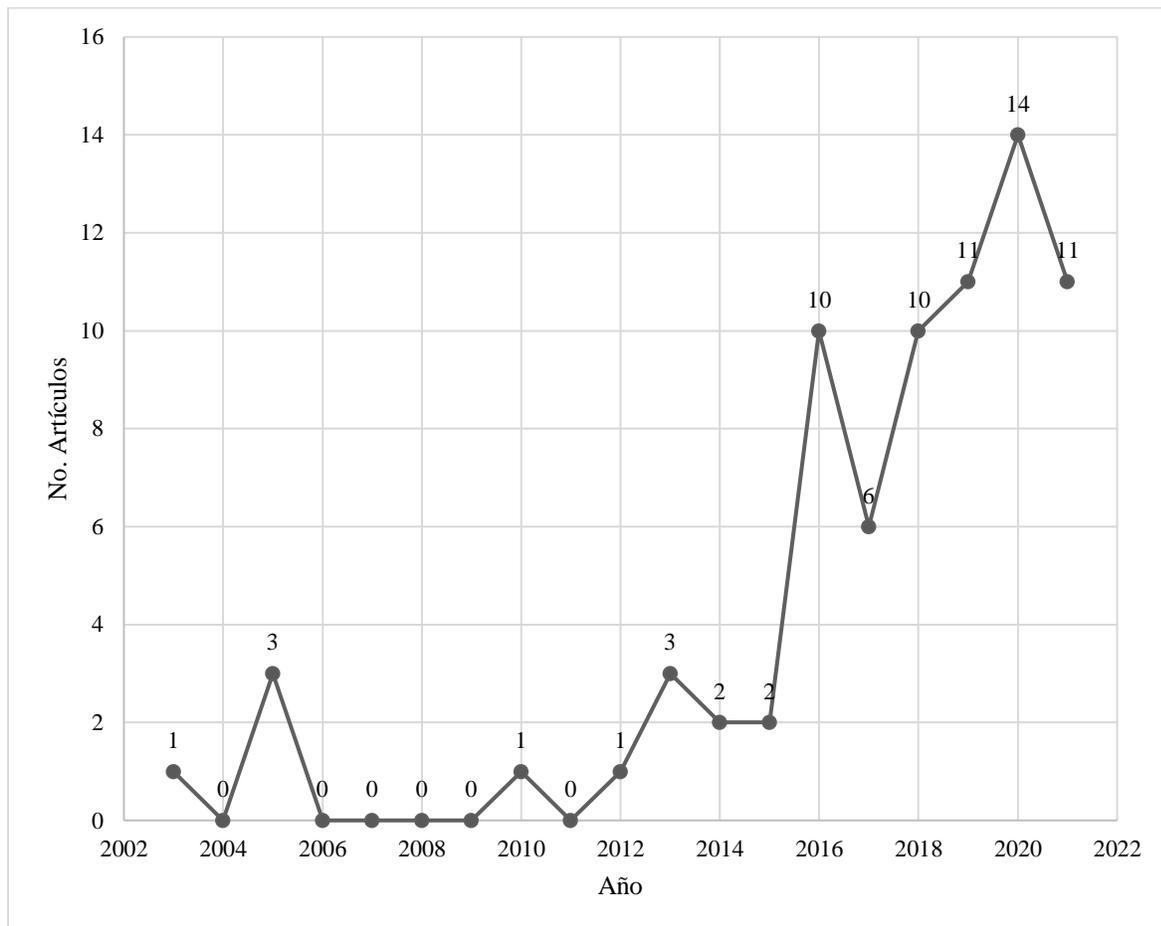
No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras	
				Eco	Env	Soc	T	Ca	Ce	Cf	FV			DRV	S	D					O
68	Y. Li et al.(2013)	Otros	CI	✓			0				Ho	Di	S	S				GA SA	Instancias tomadas de la literatura	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Múltiples productos Flota heterogénea Incertidumbre
69	Reza Tavakkoli-Moghaddam et al.(2013)	General	F	✓			0	✓			He	Di	S	S		✓		Em	Experimentos generados aleatoriamente	No presenta	Incertidumbre
70	Ahmadi-Javid & Seddighi (2012)	General	F	✓			0	✓			Ho	Di	S	S				O SA ACO	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	No presenta
71	Ahmadi Javid & Azad (2010)	General	F	✓			0	✓			Ho	Di	S	S		✓		Em O TS SA	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Otros
72	Ambrosino & Grazia Scutellà (2005)	General	F	✓			0				He	Di	S	M				Em	Caso de estudio Experimentos generados aleatoriamente	Comparación instancia	Metodologías de solución
73	Liu & Lin (2005)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	S				O TS SA	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Flota heterogénea Ventanas de tiempo Múltiples niveles
74	Ma & Davidrajuh (2005)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	S		✓		Em O GA	No presenta resultados computacionales	No presenta	No presenta

**Anexo B:** (Continuación)

No.	Autores	Sector industrial	Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación			Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras	
				<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	FV			DRV	<i>S</i>	D					O
75	Liu & Lee (2003)	General	F	✓			0				Ho	Di	S	S		✓		O	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Metodologías de solución Múltiples productos Otras características del modelo

Fuente: Elaboración propia

### C. Anexo: Línea temporal de artículos con relación directa *Perspectiva 1*



Fuente: Elaboración propia

## **D. Anexo: Contribuciones con relación directa *Perspectiva 3***

El anexo D muestra las contribuciones relevantes encontradas dentro de la *Perspectiva 3* de la revisión del estado del arte, la cual relaciona los aportes realizados en cadenas de suministro de biocombustibles a partir de residuos de café. Para una mejor comprensión de esta tabla, se resumen los siguientes elementos:

- Decisiones incorporadas en el modelo → Localización (L), inventario (I), ruteo de vehículos (R).
- Funciones objetivo → Económicas (Eco), ambientales (Env), sociales (Soc).
- Estrategia de establecimiento de instalaciones → ( $T = 0$ ) si las instalaciones se abren en el período inicial, ( $T = t$ ) si las instalaciones se abren en cualquier periodo de tiempo, asignación de capacidad (Ca), expansión de capacidad (Ce), cierre de instalaciones (Cf).
- Composición de la flota de vehículos (FV) → Homogénea (Ho), heterogénea (He).
- Actividad para la que se toman decisiones de ruteo (DRV) → Recolección (R), distribución (Di).
- Número de productos gestionados en la cadena de suministro → Multiproducto (M), producto único (S).
- Número de períodos de tiempo en el horizonte de planificación → Período múltiple (M), período único (S).
- Parámetros inciertos considerados → Suministro (S), demanda (D), otros (O).
- Metodología de solución → Método exacto (Em), algoritmo genético (GA), recocido simulado (SA), colonia de hormigas (ACO), búsqueda tabú (TS), enjambre de partículas (PSO), otros (O).

No.	Autores	Decisiones			Función objetivo			Estrategia Instalación				Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras
		L	I	R	<i>Eco</i>	<i>Env</i>	<i>Soc</i>	<i>T</i>	<i>Ca</i>	<i>Ce</i>	<i>Cf</i>	FV	DRV			S	D	O				
1	Morales-Chavez et al. (2018)	✓	✓		✓	✓	✓	T=t	✓	✓	✓			M	M				Em	Caso de estudio	Decisiones incorporadas Dimensiones de sostenibilidad Parámetros de entrada	Metodologías de solución Sostenibilidad Otras características del modelo
2	Duarte et al. (2016)	✓			✓	✓		T=0	✓					S	M				Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Otras características del modelo
3	Duarte et al. (2014)	✓			✓			T=0	✓					S	M				Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Sostenibilidad Otras características del modelo

Fuente: Elaboración propia

## **E. Anexo: Contribuciones con relación directa *Perspectiva 4***

El anexo E presenta los documentos con relación directa encontrados dentro de la *Perspectiva 4* de la revisión del estado del arte, la cual examina los aportes en estrategias de configuración dinámica (DCS) dentro del diseño de cadenas de abastecimiento. Para una mejor comprensión de esta tabla, se resumen los siguientes elementos:

- Decisiones incorporadas en el modelo → Localización (L), inventario (I), ruteo de vehículos (R).
- Tipo de cadena de suministro → Directa (F), inversa (Re), ciclo cerrado (CI).
- Funciones objetivo → Económicas (Eco), ambientales (Env), sociales (Soc).
- Estrategia de establecimiento de instalaciones → (T = 0) si las instalaciones se abren en el período inicial, (T = t) si las instalaciones se abren en cualquier periodo de tiempo, asignación de capacidad (Ca), expansión de capacidad (Ce), cierre de instalaciones (Cf).
- Composición de la flota de vehículos (FV) → Homogénea (Ho), heterogénea (He).
- Actividad para la que se toman decisiones de ruteo (DRV) → Recolección (R), distribución (Di).
- Número de productos gestionados en la cadena de suministro → Multiproducto (M), producto único (S).
- Número de períodos de tiempo en el horizonte de planificación → Período múltiple (M), período único (S).
- Parámetros inciertos considerados → Suministro (S), demanda (D), otros (O).
- Metodología de solución → Método exacto (Em), algoritmo genético (GA), recocido simulado (SA), colonia de hormigas (ACO), búsqueda tabú (TS), enjambre de partículas (PSO), otros (O).

No.	Autores	Sector industrial	Decisiones			Tipo de cadena	Función objetivo			Estrategia Instalación				Ruteo		Número de productos	Número de periodos	Parámetro incierto			Metodología de solución	Aplicación del modelo	Análisis de post-optimalidad	Investigaciones futuras
			L	R	I		Eco	Env	Soc	T	Ca	Ce	Cf	FV	DRV			S	D	O				
1	Jena et al. (2016)	Sector forestal	✓			F	✓			t	✓	✓	✓			M	M				O Em	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos Comparación de instancias	No presenta
2	Pehlivan et al. (2014)	Sector salud	✓			F	✓			t	✓	✓				M	M			✓	Em	Caso de estudio	Parámetros de entrada	Incertidumbre
3	Bagheri nejad & Shoeib (2018)	Sector salud	✓			F			✓	t	✓	✓				S	M				GA	Experimentos generados aleatoriamente	Eficiencia entre modelos	Sostenibilidad

Fuente: Elaboración propia

## F. Anexo: Componentes modelo matemático base

**Tabla 6-1:** Resumen componentes modelo matemático base

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
<i>Variables de decisión</i>	Variables de instalaciones Variables de inventario Variables de flujo
<i>Funciones objetivo</i>	Max F1 = Valor presente Neto (Ingresos – Costos) Ingresos = Ingresos de ventas Costos = Materia prima, instalaciones (apertura), costos fijos/ variables, inventario, transporte Min F2 = Impactos ambientales negativos (huella gris, CO <sub>2</sub> generado) Max F3 = Impactos sociales positivos (Contribución a la seguridad alimentaria y disminución del índice de desempleo)
<i>Restricciones</i>	Restricciones de instalaciones Restricciones de inventario Restricciones de flujo de materiales
<i>Conjuntos</i>	W, Conjunto de residuos I, Conjunto de proveedores J, Conjunto de ubicaciones potenciales para los centros de acopio K, Conjunto de ubicaciones potenciales para las biorrefinerías M, Conjunto de centrales de mezcla B, Conjunto de capacidades para los centros de acopio C, Conjunto de capacidades para las biorrefinerías T, Conjunto de periodos de tiempo R ∈ T
<i>Parámetros</i>	Económicos: Ingresos, costos de materia prima, de apertura, fijos, variables, de inventario y de transporte Ambientales: costo y generación de CO <sub>2</sub> y vertimientos de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en proveedores, centros de acopio, biorrefinerías y transporte Sociales: Empleos generados e índices de desempleo de las ubicaciones de proveedores, centros de acopio y biorrefinerías. Litros de bioetanol por hectarea cultivada de biomasa de primera generación (caña de azúcar) Capacidades: Proveedores, centros de acopio, biorrefinerías Generales: Tasa de interés <i>NPV</i> , demanda, número grande

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-2: Parámetros de entrada modelo matemático base

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<u>Ingresos</u>		
$PBE_t$	Precio de venta del bioetanol en el periodo de tiempo $t$	\$/l
<u>Costo materia prima</u>		
$PBM_{tw}$	Costo del residuo $w$ en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de apertura</u>		
$cosA_{jb}$	Costo de apertura del centro de acopio $j$ con capacidad $b$	\$
$cosP_{kc}$	Costo de apertura de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$	\$
<u>Costo fijo</u>		
$cosfA_{jbt}$	Costo fijo del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfP_{kct}$	Costo fijo de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
<u>Costo variable</u>		
$cosvA_{wjbt}$	Costo variable con respecto al residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvP_{kct}$	Costo variable de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de inventario</u>		
$cosstoA_{wjbt}$	Costo de inventario por mantener una tonelada del residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de transporte</u>		
$costSA_{wijt}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el proveedor $i$ al centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$costAP_{wjkt}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$costPB_{kmt}$	Costo de transporte de bioetanol, desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcal $m$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/l
<u>Parámetros ambientales</u>		
$cosSST_t$	Multa por contaminación del agua (en términos de SST) en el período de tiempo $t$	\$/kg SST
$cosCO2_t$	Costo por contaminación del aire en el periodo de tiempo $t$	\$/ton CO <sub>2</sub> equiv
$SSTS_w$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	kg/ton residuo
$CO2S_w$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$SSTA_{wb}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	Kg SST/ton residuo
$CO2A_{wb}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el procesamiento del residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo

Tabla 6-2: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$SSTP_c$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados en una biorrefinería con capacidad $c$	Kg SST/ton residuo
$CO2P_c$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada en una biorrefinería con capacidad $c$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2SA_{wij}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el proveedor $i$ al centro de acopio $j$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2AP_{wjk}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2PB_{km}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del bioetanol desde la biorrefinería $k$ hasta la central de mezcla $m$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ l bioetanol
<u>Parámetros sociales</u>		
$UES_{it}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde está ubicado el proveedor $i$	---
$ES_w$	Número de empleos generados por un proveedor si el residuo $w$ se utiliza como materia prima para la producción de bioetanol	Número de empleos
$UEA_{jt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicado el centro de acopio $j$	---
$EA_b$	Número de empleos generados por un centro de acopio con capacidad $b$	Número de empleos
$UEP_{kt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicada la biorrefinería $k$	---
$EP_c$	Número de empleos generados por una biorrefinería con capacidad $c$	Número de empleos
$BIO$	Cantidad de bioetanol obtenido por hectara cultivada de una biomasa de primera generación	l/ha
<u>Capacidades</u>		
$S_{iwt}$	Cantidad disponible del residuo $w$ que tiene el proveedor $i$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$capstoA_{wb}$	Cantidad máxima del residuo $w$ que puede almacenarse en un centro de acopio con capacidad $b$	ton
$capA_{wb}$	Cantidad máxima del residuo $w$ que se puede procesar en un centro de acopio con capacidad $b$ , en un periodo de tiempo	ton/t
$capP_c$	Cantidad máxima de residuos que se pueden procesar en una biorrefinería con capacidad $c$ , en un periodo de tiempo	ton/t
$IC$	Índice de conversión de residuos de café (tallos, pulpa y mucílago) a bioetanol	l/ton
<u>Parámetros generales</u>		
$D_{mt}$	Demanda de bioetanol de la central de mezcla $m$ , en el periodo de tiempo $t$	l/t
$MM$	Número grande	--
$InRate$	Tasa de interes usada para el cálculo del Valor Presente Neto (NPV)	--

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-3:** Variables de decisión modelo matemático base

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<i>Instalaciones</i>		
$A_{jb}$	1 si se abre el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , 0 en caso contrario	Binaria
$P_{kc}$	1 si se abre la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , 0 en caso contrario	Binaria
<i>Inventario</i>		
$IA_{wjb t}$	Nivel de inventario del residuo $w$ en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
<i>Flujo</i>		
$SO_{iwt}$	1 si el residuo $w$ es utilizado como materia prima para la producción de bioetanol por el proveedor $i$ en el periodo de tiempo $t$ , 0 en caso contrario	Binaria
$NS_{iwt}$	Cantidad del residuo $w$ que no es usado por proveedor $i$ como materia prima para la producción de bioetanol, en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$SA_{wijbt}$	Cantidad del residuo $w$ enviado desde el proveedor $i$ al centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$AP_{wjbkct}$	Cantidad del residuo $w$ enviado desde el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ a la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$PB_{kmt}$	Cantidad de bioetanol enviado desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcal $m$ , en el periodo de tiempo $t$	l/t

Fuente: Elaboración propia

## G. Anexo: Componentes modelo matemático bajo un enfoque DCS

**Tabla 6-4:** Resumen componentes modelo matemático bajo un enfoque DCS

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
<i>Variables de decisión</i>	Variables de instalaciones Variables de inventario Variables de flujo
<i>Funciones objetivo</i>	Max F1 = Valor presente Neto (Ingresos – Costos) Ingresos = Ingresos de ventas + valor de salvamento Costos = Materia prima, instalaciones (apertura, expansión, cierre) , costos fijos/ variables , inventario, transporte Min F2 = Impactos ambientales negativos (huella gris, CO <sub>2</sub> generado) Max F3 = Impactos sociales positivos (Contribución a la seguridad alimentaria y disminución del índice de desempleo)
<i>Restricciones</i>	Restricciones de instalaciones Restricciones de inventario Restricciones de flujo de materiales
<i>Conjuntos</i>	W, Conjunto de residuos I, Conjunto de proveedores J, Conjunto de ubicaciones potenciales para los centros de acopio K, Conjunto de ubicaciones potenciales para las biorrefinerías M, Conjunto de centrales de mezcla B, Conjunto de alternativas de capacidades para los centros de acopio C, Conjunto de alternativas de capacidades para las biorrefinerías UB, Conjunto de alternativas de expansión de capacidad para centros de acopio UC, Conjunto de capacidades para las biorrefinerías T, Conjunto de periodos de tiempo $R \in T; T_0 \in T$
<i>Parámetros</i>	Económicos: Ingresos de ventas y valor de salvamento, costos de materia prima, de apertura, de expansión, cierre, fijos, variables, de inventario y de transporte Ambientales: costo y generación de CO <sub>2</sub> y vertimientos de Sólidos Suspendidos Totales (SST) en proveedores, centros de acopio, biorrefinerías y transporte Sociales: Empleos generados e índices de desempleo de las ubicaciones de proveedores, centros de acopio y biorrefinerías. Litros de bioetanol por hectarea cultivada de biomasa de primera generación (caña de azúcar) Capacidades: Proveedores, centros de acopio, biorrefinerías Generales: Tasa de interés NPV, demanda, número grande

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-5: Parámetros de entrada modelo matemático bajo un enfoque DCS

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<u>Ingresos</u>		
$PBE_t$	Precio de venta del bioetanol en el periodo de tiempo $t$	\$/l
$revAC_{jb}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revPC_{kc}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revUAC_{jb\ ub}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revUPC_{kc\ uc}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo materia prima</u>		
$PBM_{tw}$	Costo del residuo $w$ en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de apertura</u>		
$cosA_{jbt}$	Costo de apertura del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosP_{kct}$	Costo de apertura de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo de expansión</u>		
$cosUA_{jb}^{ub\ t}$	Costo de expansión de capacidad del nivel $b$ al nivel $ub$ para el centro de acopio $j$ en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUP_{kc}^{uc\ t}$	Costo de expansión de capacidad del nivel $c$ al nivel $uc$ para la biorrefinería $k$ en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo de cierre</u>		
$cosAC_{jb}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosPC_k^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUAC_{jb\ ub}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUPC_{kc\ uc}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo fijo</u>		
$cosfA_{jbt}$	Costo fijo del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t

Tabla 6-5: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$cosfP_{kct}$	Costo fijo de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfUA_{jb}^{ub t}$	Costo fijo asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfUP_{kc}^{uc t}$	Costo fijo asociado a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
<u>Costo variable</u>		
$cosvA_{wjb t}$	Costo variable con respecto al residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvP_{kct}$	Costo variable de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvUA_{wjb}^{ub t}$	Costo variable asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvUP_{kc}^{uc t}$	Costo variable asociado a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ), en la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de inventario</u>		
$cosstoA_{wjb t}$	Costo de inventario por mantener una tonelada del residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosstoUA_{wjb}^{ub t}$	Costo de inventario asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de transporte</u>		
$costSA_{wij t}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el proveedor $i$ al centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$costAP_{wjkt}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$costPB_{kmt}$	Costo de transporte de bioetanol, desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcal $m$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/l
<u>Parámetros ambientales</u>		
$cosSST_t$	Multa por contaminación del agua (en términos de SST) en el periodo de tiempo $t$	\$/kg SST
$cosCO2_t$	Costo por contaminación del aire en el periodo de tiempo $t$	\$/ton CO <sub>2</sub> equiv
$SSTS_w$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	kg/ton residuo
$CO2S_w$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$SSTA_{wb}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	Kg SST/ton residuo

Tabla 6-5: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$SSTUA_{wb}^{ub}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) asociados a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en un centro de acopio	Kg SST/ton residuo
$CO2A_{wb}$	Contaminación del aire ( $CO_2$ ) generada por el procesamiento del residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	ton $CO_2$ equiv/ ton residuo
$CO2UA_{wb}^{ub}$	Contaminación del aire ( $CO_2$ ) asociada a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en un centro de acopio	ton $CO_2$ equiv/ ton residuo
$SSTP_c$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados en una biorrefinería con capacidad $c$	Kg SST/ton residuo
$SSTUP_c^{uc}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) asociados a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	Kg SST/ton residuo
$CO2P_c$	Contaminación del aire ( $CO_2$ ) generada en una biorrefinería con capacidad $c$	ton $CO_2$ equiv/ ton residuo
$CO2UP_c^{uc}$	Contaminación del aire ( $CO_2$ ) asociada a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	ton $CO_2$ equiv/ ton residuo
$CO2SA_{whg}$	Contaminación del aire ( $CO_2$ ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el nodo $g$ hasta el nodo $h$ (nodo: proveedor o centro de acopio)	ton $CO_2$ equiv/ ton residuo
$CO2AP_{wjk}$	Contaminación del aire ( $CO_2$ ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$	ton $CO_2$ equiv/ ton residuo
$CO2PB_{km}$	Contaminación del aire ( $CO_2$ ) generada por el transporte del bioetanol desde la biorrefinería $k$ hasta la central de mezcla $m$	ton $CO_2$ equiv/ l bioetanol
<i>Parámetros sociales</i>		
$UES_{it}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde está ubicado el proveedor $i$	---
$ES_w$	Número de empleos generados por un proveedor si el residuo $w$ se utiliza como materia prima para la producción de bioetanol	Número de empleos
$UEA_{jt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicado el centro de acopio $j$	---
$EA_b$	Número de empleos generados por un centro de acopio con capacidad $b$	Número de empleos
$EUA_b^{ub}$	Número de empleos asociados a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ), en un centro de acopio	Número de empleos
$UEP_{kt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicada la biorrefinería $k$	---
$EP_c$	Número de empleos generados por una biorrefinería con capacidad $c$	Número de empleos
$EUP_c^{uc}$	Número de empleos asociados a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	Número de empleos
$BIO$	Cantidad de bioetanol obtenido por hectara cultivada de una biomasa de primera generación	l/ha

Tabla 6-5: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<i>Capacidades</i>		
$S_{iwt}$	Cantidad disponible del residuo $w$ que tiene el proveedor $i$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$capstoA_{wb}$	Cantidad máxima del residuo $w$ que puede almacenarse en un centro de acopio con capacidad $b$	ton
$capstoUA_{wb}^{ub}$	Cantidad máxima adicional del residuos $w$ que puede almacenarse en un centro de acopio que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton
$capA_{wb}$	Cantidad máxima del residuos $w$ que se puede procesar en un centro de acopio con capacidad $b$ , en un periodo de tiempo	ton/t
$capUA_{wb}^{ub}$	Cantidad máxima adicional del residuos $w$ que se puede procesar en un centro de acopio que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$capP_c$	Cantidad máxima de residuos que se pueden procesar en una biorrefinería con capacidad $c$ , en un periodo de tiempo	ton/t
$capUP_c^{uc}$	Cantidad máxima adicional de residuos que se pueden procesar en una biorrefinería que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ )	ton/t
$IC$	Índice de conversión de residuos de café (tallos, pulpa y mucílago) a bioetanol	l/ton
<i>Parámetros generales</i>		
$D_{mt}$	Demanda de bioetanol de la central de mezcla $m$ , en el periodo de tiempo $t$	l/t
$MM$	Número grande	--
$InRate$	Tasa de interes usada para el cálculo del Valor Presente Neto ( $NPV$ )	--

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-6:** Variables de decisión modelo matemático bajo un enfoque DCS

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<i>Instalaciones</i>		
$A_{jbt}$	1 si se abre el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ en el periodo de tiempo $t$ , 0 en caso contrario	Binaria
$P_{kct}$	1 si se abre la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ en el periodo de tiempo $t$ , 0 en caso contrario	Binaria
$UA_{jb}^{ub t}$	1 si la capacidad del centro de acopio $j$ se expande del nivel $b$ al nivel $ub$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UP_{kc}^{uc t}$	1 si la capacidad de la biorrefinería $k$ se expande del nivel $c$ al nivel $uc$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$AC_{jb}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio $j$ el cual fue abierto con capacidad $b$ en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$PC_{kc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería $k$ la cual fue abierta con capacidad $c$ en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UAC_{jb ub}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UPC_{kc uc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería $k$ que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$AO_{jbt}$	1 si el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$PO_{kct}$	1 si la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UAO_{jb}^{ub t}$	1 si el centro de acopio $j$ con expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UPO_{kc}^{uc t}$	1 si la biorrefinería $k$ con expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
<i>Inventario</i>		
$IA_{wjbt}$	Nivel de inventario del residuo $w$ en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
<i>Flujo</i>		
$SO_{iwt}$	1 si el residuo $w$ es utilizado como materia prima para la producción de bioetanol por el proveedor $i$ en el periodo de tiempo $t$ , 0 en caso contrario	Binario
$NS_{iwt}$	Cantidad del residuo $w$ que no es usado por proveedor $i$ como materia prima para la producción de bioetanol, en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$SA_{wijbt}$	Cantidad del residuo $w$ enviado desde el proveedor $i$ al centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$AP_{wjbkct}$	Cantidad del residuo $w$ enviado desde el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ a la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$PB_{kmt}$	Cantidad de bioetanol enviado desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcal $m$ , en el periodo de tiempo $t$	l/t

**Tabla 6-6:** (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<i>Linealización</i>		
$IUA_{wjb}^{ub t}$	Variable auxiliar (linealización) - Nivel de inventario del residuo $w$ en el periodo de tiempo $t$ , en el centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$SUA_{wjb}^{ub t}$	Variable auxiliar (linealización) – Cantidad total del residuo $w$ enviado en el periodo de tiempo $t$ al centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$AUP_{kc}^{uc t}$	Variable auxiliar (linealización) – Cantidad total de residuos enviados en el periodo de tiempo $t$ a la biorrefinería $k$ que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ )	ton/t

Fuente: Elaboración propia

## H. Anexo: Componentes modelo matemático bajo una formulación *ILRP*

**Tabla 6-7:** Resumen componentes modelo matemático bajo una formulación *ILRP*

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
<i>Variables de decisión</i>	Variables de instalaciones Variables de inventario Variables de flujo Variables auxiliares
<i>Funciones objetivo</i>	Max F1 = Valor presente Neto (Ingresos – Costos) Ingresos = Ingresos de ventas + valor de salvamento Costos = Materia prima, instalaciones (apertura, expansión, cierre), costos fijos/variables, inventario, transporte Min F2 = Impactos ambientales negativos (huella gris, CO <sub>2</sub> generado) Max F3 = Impactos sociales positivos (Contribución a la seguridad alimentaria y disminución del índice de desempleo)
<i>Restricciones</i>	Restricciones de instalaciones Restricciones de inventario Restricciones de flujo de materiales Restricciones de linealización
<i>Conjuntos</i>	W, Conjunto de residuos I, Conjunto de proveedores J, Conjunto de ubicaciones potenciales para los centros de acopio H, Conjunto de proveedores y centros de acopio ( $I \cup J$ ) K, Conjunto de ubicaciones potenciales para las biorrefinerías M, Conjunto de centrales de mezcla B, Conjunto de alternativas de capacidades para los centros de acopio C, Conjunto de alternativas de capacidades para las biorrefinerías UB, Conjunto de alternativas de expansión de capacidad para centros de acopio UC, Conjunto de capacidades para las biorrefinerías V <sub>w</sub> , Conjunto de vehículos utilizados para transportar el residuo w T, Conjunto de periodos de tiempo $G \in H; L \in I; R \in T; T_0 \in T$
<i>Parámetros</i>	Económicos: Ingresos de ventas y valor de salvamento, costos de materia prima, de apertura, de expansión, cierre, fijos, variables, de inventario y de transporte Ambientales: costo y generación de CO <sub>2</sub> y vertimientos de Sólidos Suspendedos Totales (SST) en proveedores, centros de acopio, biorrefinerías y transporte Sociales: Empleos generados e índices de desempleo de las ubicaciones de proveedores, centros de acopio, biorrefinerías y centrales de mezcla. Litros de bioetanol por hectarea cultivada de biomasa de primera generación (caña de azúcar) Capacidades: Proveedores, centros de acopio, biorrefinerías, vehículos Generales: Tasa de interés <i>NPV</i> , demanda, número grande

**Tabla 6-8:** Parámetros de entrada modelo matemático bajo una formulación *ILRP*

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<u>Ingresos</u>		
$PBE_t$	Precio de venta del bioetanol en el periodo de tiempo $t$	\$/l
$revAC_{jb}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revPC_{kc}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revUAC_{jb\ ub}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revUPC_{kc\ uc}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo materia prima</u>		
$PBM_{tw}$	Costo del residuo $w$ en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de apertura</u>		
$cosA_{jbt}$	Costo de apertura del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosP_{kct}$	Costo de apertura de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo de expansión</u>		
$cosUA_{jb}^{ub\ t}$	Costo de expansión de capacidad del nivel $b$ al nivel $ub$ para el centro de acopio $j$ en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUP_{kc}^{uc\ t}$	Costo de expansión de capacidad del nivel $c$ al nivel $uc$ para la biorrefinería $k$ en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo de cierre</u>		
$cosAC_{jb}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosPC_{kc}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUAC_{jb\ ub}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUPC_{kc\ uc}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$

Tabla 6-8: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<i>Costo fijo</i>		
$cosfA_{jbt}$	Costo fijo del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfP_{kct}$	Costo fijo de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfUA_{jb}^{ub t}$	Costo fijo asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfUP_{kc}^{uc t}$	Costo fijo asociado a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
<i>Costo variable</i>		
$cosvA_{wjt}$	Costo variable con respecto al residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvP_{kct}$	Costo variable de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvUA_{wjb}^{ub t}$	Costo variable asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvUP_{kc}^{uc t}$	Costo variable asociado a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ), en la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<i>Costo de inventario</i>		
$cosstoA_{wjt}$	Costo de inventario por mantener una tonelada del residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosstoUA_{wjb}^{ub t}$	Costo de inventario asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<i>Costo de transporte</i>		
$costSA_{whgt}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el nodo $h$ hasta el nodo $g$ , en el periodo de tiempo $t$ (nodo: proveedor o centro de acopio)	\$/trayecto
$costSA_{wt}$	Costo fijo por vehículo utilizado para el transporte del residuo $w$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/vehículo
$costAP_{wjkt}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$costPB_{kmt}$	Costo de transporte de bioetanol, desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcal $m$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/l
<i>Parámetros ambientales</i>		
$cosSST_t$	Multa por contaminación del agua (en términos de SST) en el período de tiempo $t$	\$/kg SST
$cosCO2_t$	Costo por contaminación del aire en el periodo de tiempo $t$	\$/ton CO <sub>2</sub> equiv
$SSTS_w$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	kg/ton residuo

Tabla 6-8: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$CO2S_w$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$SSTA_{wb}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	Kg SST/ton residuo
$SSTUA_{wb}^{ub}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) asociados a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en un centro de acopio	Kg SST/ton residuo
$CO2A_{wb}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el procesamiento del residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2UA_{wb}^{ub}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) asociada a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en un centro de acopio	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$SSTP_c$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados en una biorrefinería con capacidad $c$	Kg SST/ton residuo
$SSTUP_c^{uc}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) asociados a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	Kg SST/ton residuo
$CO2P_c$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada en una biorrefinería con capacidad $c$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2UP_c^{uc}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) asociada a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2SA_{whg}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el nodo $g$ hasta el nodo $h$ (nodo: proveedor o centro de acopio)	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2AP_{wjk}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2PB_{km}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del bioetanol desde la biorrefinería $k$ hasta la central de mezcla $m$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ l bioetanol
<u>Parámetros sociales</u>		
$UES_{it}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde está ubicado el proveedor $i$	---
$ES_w$	Número de empleos generados por un proveedor si el residuo $w$ se utiliza como materia prima para la producción de bioetanol	Número de empleos
$UEA_{jt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicado el centro de acopio $j$	---
$EA_b$	Número de empleos generados por un centro de acopio con capacidad $b$	Número de empleos
$EUA_b^{ub}$	Número de empleos asociados a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ), en un centro de acopio	Número de empleos
$UEP_{kt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicada la biorrefinería $k$	---
$EP_c$	Número de empleos generados por una biorrefinería con capacidad $c$	Número de empleos
$EUP_c^{uc}$	Número de empleos asociados a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	Número de empleos
$UEB_{mt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde está ubicada la central de mezcla $m$	---

Tabla 6-8: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<b><math>ETSA_w</math></b>	Número de empleos asociados al proceso de transporte (desde los proveedores hasta los centros de acopio) del residuo $w$	Número de empleos
<b><math>ETAP_w</math></b>	Número de empleos asociados al proceso de transporte (desde los centros de acopio hasta las biorrefinerías) del residuo $w$	Número de empleos
<b><math>ETPB</math></b>	Número de empleos asociados al proceso de transporte (desde las biorrefinerías hasta las centrales de mezcla) del del bioetanol	Número de empleos
<b><math>BIO</math></b>	Cantidad de bioetanol obtenido por hectara cultivada de una biomasa de primera generación	l/ha
<u>Capacidades</u>		
<b><math>S_{iwt}</math></b>	Cantidad disponible del residuo $w$ que tiene el proveedor $i$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
<b><math>capstoA_{wb}</math></b>	Cantidad máxima del residuo $w$ que puede almacenarse en un centro de acopio con capacidad $b$	ton
<b><math>capstoUA_{wb}^{ub}</math></b>	Cantidad máxima adicional del residuos que puede almacenarse en un centro de acopio que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton
<b><math>capA_{wb}</math></b>	Cantidad máxima del residuos $w$ que se puede procesar en un centro de acopio con capacidad $b$ , en un periodo de tiempo	ton/t
<b><math>capUA_{wb}^{ub}</math></b>	Cantidad máxima adicional del residuos $w$ que se puede procesar en un centro de acopio que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
<b><math>capP_c</math></b>	Cantidad máxima de residuos que se pueden procesar en una biorrefinería con capacidad $c$ , en un periodo de tiempo	ton/t
<b><math>capUP_c^{uc}</math></b>	Cantidad máxima adicional de residuos que se pueden procesar en una biorrefinería que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ )	ton/t
<b><math>IC</math></b>	Índice de conversión de residuos de café (tallos, pulpa y mucílago) a bioetanol.	l/ton
<b><math>capVSA_w</math></b>	Capacidad del vehículo para transportar el residuo $w$ (desde los proveedores hasta los centros de acopio)	ton
<b><math>capVAP_w</math></b>	Capacidad del vehículo para transportar el residuo $w$ (desde los centros de acopio hasta las biorrefinerías)	ton
<b><math>capVPB</math></b>	Capacidad del vehículo para transportar bioetanol (desde las biorrefinerías hasta las centrales de mezcla)	l
<u>Parámetros generales</u>		
<b><math>D_{mt}</math></b>	Demanda de bioetanol de la central de mezcla $m$ , en el periodo de tiempo $t$ .	l/t
<b><math>MM</math></b>	Número grande	--
<b><math>InRate</math></b>	Tasa de interes usada para el cálculo del Valor Presente Neto ( $NPV$ )	--

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-9:** Variables de decisión modelo matemático bajo una formulación *ILRP*

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<u>Instalaciones</u>		
$A_{jbt}$	1 si se abre el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$P_{kct}$	1 si se abre la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UA_{jb}^{ub t}$	1 si la capacidad del centro de acopio $j$ se expande del nivel $b$ al nivel $ub$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UP_{kc}^{uc t}$	1 si la capacidad de la biorrefinería $k$ se expande del nivel $c$ al nivel $uc$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$AC_{jb}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio $j$ el cual fue abierto con capacidad $b$ en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$PC_{kc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería $k$ la cual fue abierta con capacidad $c$ en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UAC_{jb ub}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UPC_{kc uc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería $k$ que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$AO_{jbt}$	1 si el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$PO_{kct}$	1 si la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UAO_{jb}^{ub t}$	1 si el centro de acopio $j$ con expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UPO_{kc}^{uc t}$	1 si la biorrefinería $k$ con expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
<u>Inventario</u>		
$IA_{wjb t}$	Nivel de inventario del residuo $w$ en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
<u>Flujo</u>		
$SO_{iwt}$	1 si el residuo $w$ es utilizado como materia prima para la producción de bioetanol por el proveedor $i$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$NS_{iwt}$	Cantidad del residuo $w$ que no es usado por proveedor $i$ como materia prima para la producción de bioetanol, en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$SA_{wjb t}$	Cantidad del residuo $w$ recibido por el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$AP_{wjbkct}$	Cantidad del residuo $w$ enviado desde el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ a la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$PB_{kmt}$	Cantidad de bioetanol enviado desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcal $m$ , en el periodo de tiempo $t$	l/t

**Tabla 6-9:** (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$X_{whgv_w t}$	1 si el arco $h, g$ (proveedores o centros de acopio) está en la ruta del vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$Q_{whgv_w t}$	Cantidad del residuo $w$ transportado a través del arco $h, g$ (proveedores o centros de acopio) por el vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$	ton/t
$Z_{wjiv_w t}$	1 si el residuo $w$ es suministrado por el proveedor $i$ al centro de acopio $j$ , utilizando el vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binario
$M_{wiv_w t}$	Variable auxiliar no negativa utilizada para la eliminación de subtours, asociada al transporte del residuo $w$ , en la ruta el vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$	--
<u>Linealización</u>		
$IUA_{wjb}^{ub t}$	Variable auxiliar (linealización) - Nivel de inventario del residuo $w$ en el periodo de tiempo $t$ , en el centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$SUA_{wjb}^{ub t}$	Variable auxiliar (linealización) – Cantidad total del residuo $w$ enviado en el periodo de tiempo $t$ al centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$AUP_{kc}^{uc t}$	Variable auxiliar (linealización) – Cantidad total de residuos enviados en el periodo de tiempo $t$ a la biorrefinería $k$ que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ )	ton/t

Fuente: Elaboración propia

# I. Anexo: Modelo matemático *DCS - ILRP* bajo un enfoque estocástico y sostenible

**Tabla 6-10:** Resumen componentes modelo matemático *DCS – ILRP* bajo un enfoque estocástico y sostenible

<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
<i>Variables de decisión</i>	Variables de instalaciones Variables de inventario Variables de flujo Variables auxiliares
<i>Funciones objetivo</i>	Max F1 = Valor presente Neto (Ingresos – Costos) Ingresos = Ingresos de ventas + valor de salvamento Costos = Materia prima, instalaciones (apertura, expansión, cierre), costos fijos/variables, inventario, transporte Min F2 = Impactos ambientales negativos (huella gris, CO <sub>2</sub> generado) Max F3 = Impactos sociales positivos (Contribución a la seguridad alimentaria y disminución del índice de desempleo)
<i>Restricciones</i>	Restricciones de instalaciones Restricciones de inventario Restricciones de flujo de materiales Restricciones de linealización
<i>Conjuntos</i>	W, Conjunto de residuos I, Conjunto de proveedores J, Conjunto de ubicaciones potenciales para los centros de acopio H, Conjunto de proveedores y centros de acopio ( $I \cup J$ ) K, Conjunto de ubicaciones potenciales para las biorrefinerías M, Conjunto de centrales de mezcla B, Conjunto de alternativas de capacidades para los centros de acopio C, Conjunto de alternativas de capacidades para las biorrefinerías UB, Conjunto de alternativas de expansión de capacidad para centros de acopio UC, Conjunto de capacidades para las biorrefinerías $V_w$ , Conjunto de vehículos utilizados para transportar el residuo w T, Conjunto de periodos de tiempo S, Conjunto de escenarios estocásticos $G \in H$ ; $L \in I$ ; $R \in T$ ; $T_0 \in T$
<i>Parámetros</i>	Económicos: Ingresos de ventas y valor de salvamento, costos de materia prima, de apertura, de expansión, cierre, fijos, variables, de inventario y de transporte Ambientales: costo y generación de CO <sub>2</sub> y vertimientos de Sólidos Suspendedos Totales (SST) en proveedores, centros de acopio, biorrefinerías y transporte

**Tabla 6-10:** (Continuación)

Componente	Descripción
<i>Parámetros</i>	Sociales: Empleos generados e índices de desempleo de las ubicaciones de proveedores, centros de acopio, biorrefinerías y centrales de mezcla. Litros de bioetanol por hectarea cultivada de biomasa de primera generación (caña de azúcar) Capacidades: Proveedores, centros de acopio, biorrefinerías, vehículos Generales: Tasa de interés <i>NPV</i> , demanda, número grande, probabilidades de ocurrencia de escenarios

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-11:** Parámetros de entrada modelo matemático *DCS – ILRP* bajo un enfoque estocástico y sostenible

Término	Descripción	Unidades
<i>Ingresos</i>		
$PBE_t$	Precio de venta del bioetanol en el periodo de tiempo $t$	\$/l
$revAC_{jb}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revPC_{kc}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revUAC_{jb\ ub}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$revUPC_{kc\ uc}^{t_0t}$	Valor de salvamento asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
<i>Costo materia prima</i>		
$PBM_{tw}$	Costo del residuo $w$ en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<i>Costo de apertura</i>		
$cosA_{jbt}$	Costo de apertura del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosP_{kct}$	Costo de apertura de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$
<i>Costo de expansión</i>		
$cosUA_{jb}^{ub\ t}$	Costo de expansión de capacidad del nivel $b$ al nivel $ub$ para el centro de acopio $j$ en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUP_{kc}^{uc\ t}$	Costo de expansión de capacidad del nivel $c$ al nivel $uc$ para la biorrefinería $k$ en el periodo de tiempo $t$	\$
<i>Costo de cierre</i>		
$cosAC_{jb}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$

Tabla 6-11: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$cosPC_{kc}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , que abrió en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUAC_{jub}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
$cosUPC_{kcuc}^{t_0t}$	Costo asociado al cierre de la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , que inició en el periodo $t_0$ y termina su operación en el periodo de tiempo $t$	\$
<u>Costo fijo</u>		
$cosfA_{jbt}$	Costo fijo del centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfP_{kct}$	Costo fijo de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfUA_{jub}^{ubt}$	Costo fijo asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) del centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
$cosfUP_{kc}^{uct}$	Costo fijo asociado a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) de la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/t
<u>Costo variable</u>		
$cosvA_{wjb}$	Costo variable con respecto al residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvP_{kct}$	Costo variable de la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvUA_{wjb}^{ubt}$	Costo variable asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$cosvUP_{kc}^{uct}$	Costo variable asociado a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ), en la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de inventario</u>		
$costoA_{wjb}$	Costo de inventario por mantener una tonelada del residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$costoUA_{wjb}^{ubt}$	Costo de inventario asociado a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en el centro de acopio $j$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
<u>Costo de transporte</u>		
$costSA_{whgt}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el nodo $h$ hasta el nodo $g$ , en el periodo de tiempo $t$ (nodo: proveedor o centro de acopio)	\$/trayecto
$costSA_{wt}$	Costo fijo por vehículo utilizado para el transporte del residuo $w$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/vehículo

Tabla 6-11: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$costAP_{wjk}$	Costo de transporte del residuo $w$ , desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/ton
$costPB_{kmt}$	Costo de transporte de bioetanol, desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcla $m$ , en el periodo de tiempo $t$	\$/l
<u>Parámetros ambientales</u>		
$cosSST_t$	Multa por contaminación del agua (en términos de SST) en el período de tiempo $t$	\$/kg SST
$cosCO2_t$	Costo por contaminación del aire en el periodo de tiempo $t$	\$/ton CO <sub>2</sub> equiv
$SSTSw$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	kg/ton residuo
$CO2Sw$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el residuo $w$ cuando los proveedores no lo utilizan como materia prima para la producción de bioetanol	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$SSTA_{wb}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	Kg SST/ton residuo
$SSTUA_{wb}^{ub}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) asociados a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en un centro de acopio	Kg SST/ton residuo
$CO2A_{wb}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el procesamiento del residuo $w$ en un centro de acopio con capacidad $b$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2UA_{wb}^{ub}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) asociada a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) para el residuo $w$ , en un centro de acopio	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$SSTP_c$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados en una biorrefinería con capacidad $c$	Kg SST/ton residuo
$SSTUP_c^{uc}$	Sólidos Suspendidos Totales (SST) asociados a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	Kg SST/ton residuo
$CO2P_c$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada en una biorrefinería con capacidad $c$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2UP_c^{uc}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) asociada a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2SA_{whg}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el nodo $g$ hasta el nodo $h$ (nodo: proveedor o centro de acopio)	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2AP_{wjk}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del residuo $w$ desde el centro de acopio $j$ a la biorrefinería $k$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ ton residuo
$CO2PB_{km}$	Contaminación del aire (CO <sub>2</sub> ) generada por el transporte del bioetanol desde la biorrefinería $k$ hasta la central de mezcla $m$	ton CO <sub>2</sub> equiv/ l bioetanol
<u>Parámetros sociales</u>		
$UES_{it}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde está ubicado el proveedor $i$	---
$ES_w$	Número de empleos generados por un proveedor si el residuo $w$ se utiliza como materia prima para la producción de bioetanol	Número de empleos

Tabla 6-11: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$UEA_{jt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicado el centro de acopio $j$	---
$EA_b$	Número de empleos generados por un centro de acopio con capacidad $b$	Número de empleos
$EUA_b^{ub}$	Número de empleos asociados a la expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ), en un centro de acopio	Número de empleos
$UEP_{kt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde estaría ubicada la biorrefinería $k$	---
$EP_c$	Número de empleos generados por una biorrefinería con capacidad $c$	Número de empleos
$EUP_c^{uc}$	Número de empleos asociados a la expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en una biorrefinería	Número de empleos
$UEB_{mt}$	Índice de desempleo en el periodo de tiempo $t$ , de la zona en donde está ubicada la central de mezcla $m$	---
$ETSA_w$	Número de empleos asociados al proceso de transporte (desde los proveedores hasta los centros de acopio) del residuo $w$	Número de empleos
$ETAP_w$	Número de empleos asociados al proceso de transporte (desde los centros de acopio hasta las biorrefinerías) del residuo $w$	Número de empleos
$ETPB$	Número de empleos asociados al proceso de transporte (desde las biorrefinerías hasta las centrales de mezcla) del del bioetanol	Número de empleos
$BIO$	Cantidad de bioetanol obtenido por hectara cultivada de una biomasa de primera generación	l/ha
<u>Capacidades</u>		
$S_{iwt_s}$	Cantidad disponible del residuo $w$ que tiene el proveedor $i$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	ton/t
$capstoA_{wb}$	Cantidad máxima del residuo $w$ que puede almacenarse en un centro de acopio con capacidad $b$	ton
$capstoUA_{wb}^{ub}$	Cantidad máxima adicional del residuos $w$ que puede almacenarse en un centro de acopio que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton
$capA_{wb}$	Cantidad máxima del residuos $w$ que se puede procesar en un centro de acopio con capacidad $b$ , en un periodo de tiempo	ton/t
$capUA_{wb}^{ub}$	Cantidad máxima adicional del residuos $w$ que se puede procesar en un centro de acopio que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$capP_c$	Cantidad máxima de residuos que se pueden procesar en una biorrefinería con capacidad $c$ , en un periodo de tiempo	ton/t
$capUP_c^{uc}$	Cantidad máxima adicional de residuos que se pueden procesar en una biorrefinería que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ )	ton/t
$IC$	Índice de conversión de residuos de café (tallos, pulpa y mucílago) a bioetanol	l/ton
$capVSA_w$	Capacidad del vehículo para transportar el residuo $w$ (desde los proveedores hasta los centros de acopio)	ton

Tabla 6-11: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$capVAP_w$	Capacidad del vehículo para transportar el residuo $w$ (desde los centros de acopio hasta las biorrefinerías)	ton
$capVPB$	Capacidad del vehículo para transportar bioetanol (desde las biorrefinerías hasta las centrales de mezcla)	l
<i>Parámetros generales</i>		
$D_{mt}$	Demanda de bioetanol de la central de mezcla $m$ , en el periodo de tiempo $t$ .	l/t
$MM$	Número grande	--
$Prob_s$	Probabilidad de ocurrencia asociada al escenario $s$	--
$InRate$	Tasa de interes usada para el cálculo del Valor Presente Neto ( $NPV$ )	--

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-12: Variables de decisión modelo matemático  $DCS - ILRP$  bajo un enfoque estocástico y sostenible

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<i>Instalaciones</i>		
$A_{jbt}$	1 si se abre el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$P_{kct}$	1 si se abre la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UA_{jb}^{ub t}$	1 si la capacidad del centro de acopio $j$ se expande del nivel $b$ al nivel $ub$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UP_{kc}^{uc t}$	1 si la capacidad de la biorrefinería $k$ se expande del nivel $c$ al nivel $uc$ en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$AC_{jb}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio $j$ el cual fue abierto con capacidad $b$ en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$PC_{kc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería $k$ la cual fue abierta con capacidad $c$ en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UAC_{jb ub}^{t_0 t}$	1 si el centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UPC_{kc uc}^{t_0 t}$	1 si la biorrefinería $k$ que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) en el periodo $t_0$ , termina su operación en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$AO_{jbt}$	1 si el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$PO_{kct}$	1 si la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UAO_{jb}^{ub t}$	1 si el centro de acopio $j$ con expansión de capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ ) está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria
$UPO_{kc}^{uc t}$	1 si la biorrefinería $k$ con expansión de capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ ) está operando en el periodo de tiempo $t$ . 0 en caso contrario	Binaria

Tabla 6-12: (Continuación)

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
<u>Inventario</u>		
$IA_{wjbts}$	Nivel de inventario del residuo $w$ en el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	ton/t
<u>Flujo</u>		
$SO_{iwt}$	1 si el residuo $w$ es utilizado como materia prima para la producción de bioetanol por el proveedor $i$ en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$ . 0 en caso contrario	Binaria
$NS_{iwt}$	Cantidad del residuo $w$ que no es usado por proveedor $i$ como materia prima para la producción de bioetanol, en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	ton/t
$SA_{wjbts}$	Cantidad del residuo $w$ recibido por el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	ton/t
$AP_{wjbkcts}$	Cantidad del residuo $w$ enviado desde el centro de acopio $j$ con capacidad $b$ a la biorrefinería $k$ con capacidad $c$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	ton/t
$PB_{kmts}$	Cantidad de bioetanol enviado desde la biorrefinería $k$ a la central de mezcal $m$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	l/t
$X_{whgv_wts}$	1 si el arco $h, g$ (proveedores o centros de acopio) está en la ruta del vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$ . 0 en caso contrario	Binaria
$Q_{whgv_wts}$	Cantidad del residuo $w$ transportado a través del arco $h, g$ (proveedores o centros de acopio) por el vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	ton/t
$Z_{wjitv_wts}$	1 si el residuo $w$ es suministrado por el proveedor $i$ al centro de acopio $j$ , utilizando el vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$ . 0 en caso contrario	Binario
$M_{wiv_wts}$	Variable auxiliar no negativa utilizada para la eliminación de subtours, asociada al transporte del residuo $w$ , en la ruta del vehículo $v_w$ , en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$	--
<u>Linealización</u>		
$IUA_{wjb}^{ubts}$	Variable auxiliar (linealización) - Nivel de inventario del residuo $w$ en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$ , en el centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$SUA_{wjb}^{ubts}$	Variable auxiliar (linealización) - Cantidad total del residuo $w$ enviado en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$ al centro de acopio $j$ que expandió su capacidad (del nivel $b$ al nivel $ub$ )	ton/t
$AUP_{kc}^{uc ts}$	Variable auxiliar (linealización) - Cantidad total de residuos enviados en el periodo de tiempo $t$ , bajo el escenario $s$ , a la biorrefinería $k$ que expandió su capacidad (del nivel $c$ al nivel $uc$ )	ton/t

Fuente: Elaboración propia

### Funciones objetivo

$$\text{Max } F1 = \text{Valor esperado (Valor presente neto)} \quad (6.1)$$

$$\text{Min } F2 = \text{Valor esperado (Impactos ambientales negativos)} \quad (6.2)$$

$$\text{Max } F3 = \text{Valor esperado (Impactos sociales positivos)} \quad (6.3)$$

### Función objetivo económica

$$\text{Max } F1 = \text{Valor esperado (NPV)} = \sum_{t \in T} \frac{\text{Flujo de efectivo esperado}_t}{(1 + \text{InRate})^t} \quad (6.4)$$

Los ingresos para el cálculo del NPV se definen en las Ecuación (6.5), (6.6) y (6.7) que corresponden a las ventas del biocombustible y al valor de salvamento por el cierre de los centros de acopio y biorrefinerías respectivamente. Por otra parte, las funciones de costo están representadas en las ecuaciones (6.8) a (6.20). El costo por adquisición para cada tipo de residuo y de acuerdo con el periodo de tiempo está dado en la Ecuación (6.8). A su vez, los costos relacionados con la apertura de nuevas instalaciones teniendo en cuenta el nivel de capacidad asignada y el periodo de tiempo se expresan en las ecuaciones (6.9) y (6.10).

$$\begin{aligned} \text{Ingreso por ventas} \\ \text{esperado}_t = \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s(PBE_t PB_{kmts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \text{Valor de salvamento} \\ \text{centros de acopio}_t = \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \text{revAC}_{jb}^{t_0 t} AC_{jb}^{t_0 t} \\ + \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{j \in J} \sum_{\substack{b \in B \\ /b < ub}} \sum_{ub \in UB} \text{revUAC}_{jb ub}^{t_0 t} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} \text{Valor de salvamento} \\ \text{biorrefinerías}_t = \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \text{revPC}_{kc}^{t_0 t} PC_{kc}^{t_0 t} \\ + \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < t}} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{revUPC}_{kc uc}^{t_0 t} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de} \\ \text{materia prima} \\ \text{esperado}_t = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(PBM_{tw} SA_{wjbts}) \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de apertura} \\ \text{centros de acopio}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \text{cosA}_{jbt} A_{jbt} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de apertura} \\ \text{biorrefinerías}_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \text{cosP}_{kct} P_{kct} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.10)$$

Los centros de acopio y biorrefinerías se abren con una capacidad inicial, que se puede ampliar en todo el horizonte de planificación. Dado que los ingresos y costos asociados a estas instalaciones dependen de una DCS, es necesario dividirlos en dos partes: 1) los valores asociados a la capacidad inicial y 2) el aumento de este valor cuando se amplía. Los costos relacionados con expansión y cierre se expresan a través de (6.11) - (6.14). Los costos fijos y variables se formulan en (6.15) - (6.18). Finalmente, los costos de inventario y transporte están representados en (6.19) y (6.20), respectivamente.

$$\begin{aligned} \text{Costo de expansión} \\ \text{centros de acopio}_t = & \sum_{j \in J} \sum_{\substack{b \in B \\ ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{uc \in UC} \cos UA_{jb}^{ub t} UA_{jb}^{ub t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.11)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de expansión} \\ \text{biorrefinerías}_t = & \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \cos UP_{kc}^{uc t} UP_{kc}^{uc t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.12)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de cierre} \\ \text{centros de acopio}_t = & \sum_{t_0 \in T} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \cos AC_{jb}^{t_0 t} AC_{jb}^{t_0 t} \\ & + \sum_{t_0 \in T} \sum_{j \in J} \sum_{\substack{b \in B \\ /b < ub}} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \cos UAC_{jb ub}^{t_0 t} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo de cierre} \\ \text{biorrefinerías}_t = & \sum_{t_0 \in T} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \cos PC_{kc}^{t_0 t} PC_{kc}^{t_0 t} \\ & + \sum_{t_0 \in T} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \cos UPC_{kc uc}^{t_0 t} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo fijo} \\ \text{centros de acopio}_t = & \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \cos f A_{jbt} AO_{jbt} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{\substack{b \in B \\ /b < ub}} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \cos f UA_{jb}^{ub t} UAO_{jb}^{ub t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.15)$$

$$\begin{aligned} \text{Costo fijo} \\ \text{biorrefinerías}_t = & \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \cos f P_{kct} PO_{kct} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \cos f UP_{kc}^{uc t} UPO_{kc}^{uc t} \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned}
\text{Costo variable esperado} \\
\text{de centros de acopio}_t = & \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosv}A_{wjb}tSA_{wjb}ts) \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosv}UA_{wjb}^{ub}tSUA_{wjb}^{ub}ts) \\
& \forall t \in T \quad (6.17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Costo variable esperado} \\
\text{de biorrefinerías}_t = & \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosv}P_{kct}AP_{wjbk}cts) \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{Prob}_s(\text{cosv}UP_{kc}^{uc}tAUP_{kc}^{uc}ts) \\
& \forall t \in T \quad (6.18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Costo de inventario} \\
\text{esperado en} \\
\text{centros de acopio}_t = & \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cossto}A_{wjb}tIA_{wjb}ts) \\
& + \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cossto}UA_{wjb}^{ub}tIUA_{wjb}^{ub}ts) \\
& \forall t \in T \quad (6.19)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Costo de transporte} \\
\text{esperado}_t = & \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{g \in H} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cost}SA_{whgt}X_{whgv_w}ts) + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cost}SA_{wt}X_{wji}v_wts) + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cost}AP_{wjk}tAP_{wjbk}cts) + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s(\text{cost}PB_{kmt}PB_{kmts}) \quad \forall t \in T \quad (6.20)
\end{aligned}$$

### Función objetivo ambiental

La Ecuación (6.21) minimiza el costo de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de la contaminación del agua de los vertimientos de efluentes teniendo en cuenta la carga de SST.

$$\begin{aligned}
\text{Min } F2 = & \sum_{t \in T} \text{Contaminación de agua esperada en proveedores}_t \\
& + \text{Contaminación de aire esperada en proveedores}_t \\
& + \text{Contaminación de agua esperada en centros de acopio}_t \\
& + \text{Contaminación de aire esperada en centros de acopio}_t \\
& + \text{Contaminación de agua esperada en biorrefinerías}_t \\
& + \text{Contaminación de aire esperada en biorrefinerías}_t \\
& + \text{Contaminación de aire esperada en transporte}_t
\end{aligned} \tag{6.21}$$

Las ecuaciones (6.22) y (2.23) establecen los impactos ambientales generados por las fincas cuando los residuos agrícolas no son utilizados por la cadena de suministro. A su vez, las expresiones (6.24) a (6.27) representan el costo de la contaminación del agua y aire de los centros de acopio y biorrefinerías. Por último, el costo del CO<sub>2</sub> generado por las operaciones de transporte se define en la Ecuación (6.28).

$$\begin{aligned}
& \text{Contaminación de agua} \\
& \text{esperada en} \\
& \text{proveedores}_t = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTS}_w \text{NS}_{i w t s}) \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.22}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Contaminación de aire} \\
& \text{esperada en} \\
& \text{proveedores}_t = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2S}_w \text{NS}_{i w t s}) \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.23}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Contaminación de agua} \\
& \text{esperada en} \\
& \text{centros de acopio}_t = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTA}_{wb} \text{SA}_{w j b t s}) + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTUA}_{wb}^{ub} \text{SUA}_{w j b}^{ub t s}) \\
& \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.24}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Contaminación de aire} \\
& \text{esperada en} \\
& \text{centros de acopio}_t = \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2A}_{wb} \text{SA}_{w j b t s}) + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2UA}_{wb}^{ub} \text{SUA}_{w j b}^{ub t s}) \\
& \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.25}$$

Contaminación de agua  
esperada en  
biorrefinerías<sub>t</sub> =

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTP}_c \text{AP}_{wjbkcts}) \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{Prob}_s(\text{cosSST}_t \text{SSTUP}_c^{uc} \text{AUP}_{kc}^{uc \ ts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (6.26)$$

Contaminación de aire  
esperada en  
biorrefinerías<sub>t</sub> =

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2P}_c \text{AP}_{wjbkcts}) \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2UP}_c^{uc} \text{AUP}_{kc}^{uc \ ts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (6.27)$$

Contaminación de aire  
esperada en  
transporte<sub>t</sub> =

$$\begin{aligned} & \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} \sum_{g \in H} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2SA}_{whg} Q_{whgv_wts}) + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2AP}_{wjk} \text{AP}_{wjbkcts}) + \\ & \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s(\text{cosCO2}_t \text{CO2PB}_{km} \text{PB}_{kmts}) \end{aligned} \quad \forall t \in T \quad (6.28)$$

### Función objetivo social

El objetivo del modelo matemático es maximizar dos de los principales impactos sociales positivos (Ecuación (6.29)): la seguridad alimentaria y el impacto de la generación de empleo, que considera además del número de puestos de trabajo generados, el índice de desempleo en las zonas de influencia de manera que el efecto sea mayor.

Teniendo en cuenta estos dos impactos, la Ecuación (6.30) determina la cantidad de tierra que puede liberarse si el biocombustible se produce a partir de residuos agrícolas. Por otra parte, las ecuaciones (6.31) a (6.34) establecen en las regiones de influencia, los impactos que generan los empleos generados en fincas, centros de acopio y biorrefinerías sobre la tasa de desempleo.

$$\begin{aligned}
\text{Max } F3 = & \sum_{t \in T} \text{Contribución esperada a la seguridad alimentaria}_t \\
& + \text{Aporte esperado al índice de empleo en proveedores}_t \\
& + \text{Aporte al índice de empleo en centros de acopio}_t \\
& + \text{Aporte al índice de empleo en biorrefinerías}_t \\
& + \text{Aporte esperado al índice de empleo en transporte}_t
\end{aligned} \tag{6.29}$$

$$\text{Contribución esperada a la seguridad alimentaria}_t = \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \text{Prob}_s \left( \frac{PB_{kmts}}{BIO} \right) \quad \forall t \in T \tag{6.30}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Aporte esperado} \\
& \text{al índice de empleo} \\
& \text{en proveedores}_t = \sum_{s \in S} \sum_{i \in I} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s (UES_{it} ES_w SO_{i w t s}) \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.31}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Aporte al índice de empleo} \\
& \text{en centros de acopio}_t = \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} UEA_{jt} EA_b AO_{jbt} \\
& + \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UEA_{jt} EUA_b^{ub} UAO_{jb}^{ub t} \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.32}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Aporte al índice de empleo} \\
& \text{en biorrefinerías}_t = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} UEP_{kt} EP_c PO_{kct} \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UEP_{kt} EUP_c^{uc} UPO_{kc}^{uc t} \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.33}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Aporte esperado} \\
& \text{al índice de empleo} \\
& \text{en transporte}_t = \sum_{s \in S} \sum_{v_w \in V_w} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s (ETSA_w UEA_{jt} X_{w j i v_w t s}) + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} \text{Prob}_s \left( ETAP_w UEP_{kt} \frac{AP_{w j b k c t s}}{capVPAP_w} \right) + \\
& \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} \text{Prob}_s \left( ETPB * UEB_{mt} \frac{PB_{kmts}}{capVPB} \right) \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{6.34}$$

### Restricciones de instalaciones- Apertura

$$\sum_{t \in T} \sum_{b \in B} A_{jbt} \leq 1 \quad \forall j \in J \tag{6.35}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{c \in C} P_{kct} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6.36)$$

### Restricciones de instalaciones- Expansión

$$\sum_{t \in T} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_{jb}^{ub t} \leq 1 \quad \forall b \in B; \forall j \in J \quad (6.37)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc t} \leq 1 \quad \forall c \in C; \forall k \in K \quad (6.38)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_{jb}^{ub t} \leq \sum_{r \in T / r < t} A_{jbr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r < t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} AC_{jb}^{t_0 r} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (6.39)$$

$$\sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc t} \leq \sum_{r \in T / r < t} P_{kcr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r < t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} PC_{kc}^{t_0 r} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (6.40)$$

### Restricciones de instalaciones- Cierre

$$A_{jbt_0} \geq \sum_{t \in T / t_0 < t} AC_{jb}^{t_0 t} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T \quad (6.41)$$

$$P_{kct_0} \geq \sum_{t \in T / t_0 < t} PC_{kc}^{t_0 t} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T \quad (6.42)$$

$$UA_{jb}^{ub t_0} \geq \sum_{t \in T / t_0 < t} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall ub \in UB; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T \quad (6.43)$$

$$UP_{kc}^{uc t_0} \geq \sum_{t \in T / t_0 < t} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall uc \in UC; \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T \quad (6.44)$$

$$AC_{jb}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_{jb}^{ub r} \geq 2 \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAC_{jb ub}^{t_0 t} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (6.45)$$

$$AC_{jb}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UA_{jb}^{ub r} \leq \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAC_{jb ub}^{t_0 t} + 1 \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (6.46)$$

$$PC_{kc}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc r} \geq 2 \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UPC_{kc uc}^{t_0 t} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (6.47)$$

$$PC_{kc}^{t_0 t} + \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UP_{kc}^{uc r} \leq \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UPC_{kc uc}^{t_0 t} + 1 \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t_0 \in T / t_0 < t, \forall t \in T \quad (6.48)$$

### Restricciones de instalaciones- Operación

$$AO_{jbt} = \sum_{r \in T / r \leq t} A_{jbr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} AC_{jb}^{t_0 r} \quad \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (6.49)$$

$$PO_{kct} = \sum_{r \in T / r \leq t} P_{kcr} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} PC_{kc}^{t_0 r} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (6.50)$$

$$UAO_{jb}^{ub t} = \sum_{r \in T / r \leq t} UA_{jb}^{ub r} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} UAC_{jb ub}^{t_0 r} \quad \forall ub \in UB / b < ub; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T \quad (6.51)$$

$$UPO_{kc}^{uc t} = \sum_{r \in T / r \leq t} UP_{kc}^{uc r} - \sum_{\substack{r \in T \\ /r \leq t}} \sum_{\substack{t_0 \in T \\ /t_0 < r}} UPC_{kc uc}^{t_0 r} \quad \forall uc \in UC / c < uc; \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T \quad (6.52)$$

### Restricciones de instalaciones- Capacidad

$$SA_{wjbts} \leq capA_{wb} AO_{jbt} + \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} capUA_{wb}^{ub} UAO_{jb}^{ub t} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.53)$$

$$IA_{wjbts} \leq capstoA_{wb} AO_{jbt+1} + \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} capstoUA_{wb}^{ub} UAO_{jb}^{ub t+1} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.54)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkcts} \leq capP_c PO_{kct} + \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} capUP_c^{uc} UPO_{kc}^{uc t} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.55)$$

### Restricciones de inventario

$$IA_{wjbts} = \sum_{r \in T/r \leq t} SA_{wjbts} - \sum_{r \in T/r \leq t} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} AP_{wjbkcrs} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.56)$$

### Restricciones de flujo de materiales

$$\sum_{v_w \in V_w} \sum_{j \in J} Z_{wjiv_wts} = SO_{i_wts} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.57)$$

$$NS_{i_wts} = S_{i_wts} - \sum_{v_w \in V_w} \sum_{j \in J} S_{i_wts} Z_{wjiv_wts} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.58)$$

$$\sum_{v_w \in V_w} \sum_{i \in I} S_{i_wts} Z_{wjiv_wts} = \sum_{b \in B} SA_{wjbts} \quad \forall w \in W; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.59)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkcts} IC = \sum_{m \in M} PB_{kmnts} \quad \forall k \in K; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.60)$$

$$\sum_{k \in K} PB_{kmnts} \leq D_{mt} \quad \forall m \in M; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.61)$$

### Restricciones de Ruteo

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} X_{wjiv_wts} \leq 1 \quad \forall w \in W; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.62)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} S_{i_wts} X_{whiv_wts} \leq CapVSA_w \quad \forall w \in W; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.63)$$

$$\sum_{v_w \in V_w} \sum_{h \in H} X_{whiv_wts} \leq 1 \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.64)$$

$$\sum_{g \in H} X_{whgv_wts} - \sum_{g \in H} X_{wghv_wts} = 0 \quad \forall w \in W; \forall h \in H; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.65)$$

$$\sum_{h \in H} X_{wjhv_wts} + \sum_{h \in H} X_{wihv_wts} \geq 2 Z_{wjiv_wts} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall j \in J; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.66)$$

$$\sum_{h \in H} X_{wjhv_wts} + \sum_{h \in H} X_{wihv_wts} \leq Z_{wjiv_wts} + 1 \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall j \in J; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.67)$$

$$M_{wiv_wts} - M_{wlv_wts} + I / X_{wilv_wts} \leq I / -1 \quad \forall w \in W; \forall v_w \in V_w; \forall i, \ell \in I; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.68)$$

$$\sum_{h \in H} Q_{wihv_wts} - \sum_{h \in H} Q_{whiv_wts} = \sum_{h \in H} X_{wihv_wts} S_{iwts} \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.69)$$

$$Q_{whgv_wts} \leq X_{whgv_wts} \quad MM \quad \forall w \in W; \forall h, g \in H; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.70)$$

$$Q_{wjiv_wts} = 0 \quad \forall w \in W; \forall i \in I; \forall j \in J; \forall v_w \in V_w; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.71)$$

### Restricciones auxiliares de linealización

$$\sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} AUP_{kc}^{uc ts} \leq \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkcts} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.72)$$

$$AUP_{kc}^{uc ts} \leq UPO_{kc}^{uc t} \quad MM \quad \forall uc \in UC / c < uc; \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.73)$$

$$\sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} AUP_{kc}^{uc ts} + \left(1 - \sum_{\substack{uc \in UC \\ /c < uc}} UPO_{kc}^{uc t}\right) MM \geq \sum_{j \in J} \sum_{b \in B} \sum_{w \in W} AP_{wjbkcts} \quad \forall c \in C; \forall k \in K; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.74)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} IUA_{wjb}^{ub ts} \leq IA_{wjbts} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.75)$$

$$IUA_{wjb}^{ub ts} \leq UAO_{jb}^{ub t} \quad MM \quad \forall w \in W; \forall ub \in UB / b < ub; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.76)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} IUA_{wjb}^{ub ts} + \left(1 - \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAO_{jb}^{ub t}\right) MM \geq IA_{wjbts} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.77)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} SUA_{wjb}^{ubts} \leq SA_{wjbts} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.78)$$

$$SUA_{wjb}^{ubts} \leq UAO_{jb}^{ubt} MM \quad \forall w \in W; \forall ub \in UB / b < ub; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.79)$$

$$\sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} SUA_{wjb}^{ubts} + \left( 1 - \sum_{\substack{ub \in UB \\ /b < ub}} UAO_{jb}^{ubt} \right) MM \geq SA_{wjbts} \quad \forall w \in W; \forall b \in B; \forall j \in J; \forall t \in T; \forall s \in S \quad (6.79)$$

### Naturaleza de las variables

$$A_{jbt}, P_{kct}, UA_{jb}^{ubt}, UP_{kc}^{uct}, AC_{jb}^{t_0t}, PC_{kc}^{t_0t}, UAC_{jbu}^{t_0t}, UPC_{kcu}^{t_0t}, AO_{jbt}, PO_{kct}, UAO_{jb}^{ubt}, UPO_{kc}^{uct}, SO_{iwts}, X_{whgv_wts}, Z_{wjiv_wts} \in (0,1) \quad (6.80)$$

$$IA_{wjbts}, NS_{iwts}, SA_{wjbts}, AP_{wjbkcts}, PB_{kmts}, Q_{whgv_wts}, M_{wiv_wts}, IUA_{wjb}^{ubts}, SUA_{wjb}^{ubts}, AUP_{kc}^{uct} \geq 0 \quad (6.81)$$

## J.Anexo: Parámetros de entrada del caso de estudio de la región cafetera de Colombia

**Tabla 6-13:** Fuentes de información para la aplicación del modelo

Escalón	Parámetro	Fuente
<i>Upstream</i>	Producción de café	Federación Nacional de Cafeteros de Colombia
	Renovación de cultivos	Federación Nacional de Cafeteros de Colombia
	Costo de compra de residuos	(Duarte, 2017)
	Capacidad de los centros de acopio	(Trujillo, 2018)
<i>Midstream</i>	Costos de producción de las biorrefinerías	(Duarte, 2017)
	Capacidad de las biorrefinerías	
	Tasa de conversión	
<i>Downstream</i>	Precio del etanol	Federación Colombiana de Biocombustibles
	Demanda de combustibles fósiles	Ministerio de Minas y Energía de Colombia
	Tasa de mezcla	Normativa colombiana
General	Capacidades de expansión	Pequeño → Mediano Pequeño → Grande Mediano → Grande
	Costo de transporte	Ministerio de Transporte de Colombia

Fuente: Morales-Chavez et al. (2018)

**Tabla 6-14:** Producción de residuos por hectárea de café cultivada

Residuo	Producción [ton/ha-año]
Pulpa	2,258
Mucílago	0,768
Tallos	3,2

Fuente: Rodríguez & Zambrano (2010)

**Figura 6-1:** Regiones para proveedores/ Centros de acopio/ Biorrefinerías

<b>Regiones para proveedores/ Centros de acopio/ Biorrefinerías</b>	<b>Departamentos</b>
Región 1	Bolívar
	Cesar
	La Guajira
	Magdalena*
Región 2	Boyacá*
	Cundinamarca
	Casarane
	Meta
	Norte de Santander
Región 3	Santander
	Caquetá
	Cauca
Región 4	Huila*
	Nariño
	Quindío*
Región 5	Tolima
	Valle
Región 5	Antioquia*
	Caldas
	Chocó
	Risaralda

The diagram shows three nested brackets on the right side of the table. The innermost bracket, labeled 'Regiones biorrefinerías', encompasses all five regions. The middle bracket, labeled 'Regiones centros de acopio', encompasses all five regions as well. The outermost bracket, labeled 'Regiones proveedores', encompasses all five regions. This indicates that all listed regions serve as collection centers and are also potential supplier regions.

\*Departamentos tomados como referencia para determinar el costo de transporte

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-15:** Zonas de demanda

<b>Zonas de Demanda</b>	<b>Departamentos</b>
Zona 1	La Guajira
	Magdalena
	Atlántico
	Cesar
	Bolívar
	Sucre
	Norte de Santander
	Córdoba
	Antioquia
	Santander
	Arauca
Zona 2	Vichada
	Meta
	Casanare
	Boyacá
	Cundinamarca
	Tolima
	Caldas
	Risaralda
	Quindío
	Valle del Cauca
Choco	
Zona 3	Amazonas
	Caquetá
	Putumayo
	Vaupés
	Nariño
	Guaviare
	Cauca
	Huila
Guainía	

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-16:** Parámetros de entrada caso de estudio Región cafetera de Colombia

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>		
Residuos	3	Proveedores	5		
Centros de acopio	4	Biorrefinerías	3		
Centrales de mezcla	3	Capacidad centros de acopio	3		
Capacidad de biorrefinerías	3	Interés para el cálculo del VAN	0,002400		
Precio Etanol en el periodo de tiempo 1 [U\$/litro]	0,7700	Cantidad de bioetanol obtenido usando biomasa de primera generación [Litros/ha]	6.525		
Multa por contaminación de agua en el periodo de tiempo 1 [U\$/kg]	0,00663333	Índice de conversión de biomasa a bioetanol	188,719899		
Capacidad máxima de una biorrefinería [ton/año]	Cap1	26.271,5	Costo de residuos en el periodo de tiempo 1 [U\$/ton]	Residuo1	6,078
	Cap2	52.543,0		Residuo2	3,8
	Cap3	105.085,9		Residuo3	3,8
CO <sub>2</sub> generados por biorrefinerías [ton CO <sub>2</sub> / ton residuo]	Cap1	0,2244	CO <sub>2</sub> generados por el residuo w en los proveedores [ton CO <sub>2</sub> / ton residuo]	Residuo1	0,00
	Cap2	0,2259		Residuo2	1,78
	Cap3	0,2281		Residuo3	0,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por biorrefinerías [kg/ton residuo]	Cap1	136,120	Sólidos Suspendidos Totales (SST) generados por el residuo w en los proveedores [kg/ton residuo]	Residuo1	0,00
	Cap2	136,121		Residuo2	402,12
	Cap3	136,122		Residuo3	421,90
Empleos generados centros de acopio [personas]	Cap1	80	Empleos generados en proveedores [personas]	Residuo1	0
	Cap2	118		Residuo2	1
	Cap3	179		Residuo3	0
Empleos generados biorrefinerías [personas]	Cap1	108	Costo por ton de CO <sub>2</sub> en el periodo de tiempo 1 [U\$/ton]	12,790	
	Cap2	190			
	Cap3	318			

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-17:** Costos para centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD]

	Costo de Apertura			Costo Fijo		
	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3
Centro de acopio 1	1.550.017,48	2.777.780,66	4.916.871,29	13.962,98	23.034,07	39.426,79
Centro de acopio 2	1.535.255,41	2.751.325,61	4.870.043,95	13.830,00	22.814,70	39.051,30
Centro de acopio 3	1.535.255,41	2.751.325,61	4.870.043,95	13.830,00	22.814,70	39.051,30
Centro de acopio 4	1.505.731,27	2.698.415,50	4.776.389,26	13.564,04	22.375,96	38.300,31

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-18:** Costo Variable de centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD/ton]

	Residuo 1			Residuo 2		
	Capacidad	Capacidad	Capacidad	Capacidad	Capacidad	Capacidad
	1	2	3	1	2	3
Centro de acopio 1	0,4137	0,4280	0,4477	0,4137	0,4280	0,4477
Centro de acopio 2	0,4098	0,4240	0,4434	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 3	0,4098	0,4240	0,4434	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 4	0,4019	0,4158	0,4349	0,4019	0,4158	0,4349

	Residuo 3		
	Capacidad	Capacidad	Capacidad
	1	2	3
Centro de acopio 1	0,4137	0,4280	0,4477
Centro de acopio 2	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 3	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 4	0,4019	0,4158	0,4349

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-19:** Costos de transporte de los residuos desde proveedores hasta centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD/ton]

	Residuo 1				Residuo 2			
	Centro de acopio 1	Centro de acopio 2	Centro de acopio 3	Centro de acopio 4	Centro de acopio 1	Centro de acopio 2	Centro de acopio 3	Centro de acopio 4
	Proveedor 1	36,3	38,2	36,3	31,3	36,3	38,2	36,3
Proveedor 2	0,0	21,5	22,5	26,0	0,0	21,5	22,5	26,0
Proveedor 3	23,1	0,0	12,2	20,0	23,1	0,0	12,2	20,0
Proveedor 4	22,7	12,2	0,0	14,3	22,7	12,2	0,0	14,3
Proveedor 5	26,1	20,0	14,3	0,0	26,1	20,0	14,3	0,0

	Residuo 3			
	Centro de acopio 1	Centro de acopio 2	Centro de acopio 3	Centro de acopio 4
	Proveedor 1	36,3	38,2	36,3
Proveedor 2	0,0	21,5	22,5	26,0
Proveedor 3	23,1	0,0	12,2	20,0
Proveedor 4	22,7	12,2	0,0	14,3
Proveedor 5	26,1	20,0	14,3	0,0

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-20:** Costo de Inventario en centros de acopio en el periodo de tiempo 1 [USD/ton]

	Residuo 1			Residuo 2		
	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3
Centro de acopio 1	0,4137	0,4280	0,4477	0,4137	0,4280	0,4477
Centro de acopio 2	0,4098	0,4240	0,4434	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 3	0,4098	0,4240	0,4434	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 4	0,4019	0,4158	0,4349	0,4019	0,4158	0,4349

	Residuo 3		
	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3
Centro de acopio 1	0,4137	0,4280	0,4477
Centro de acopio 2	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 3	0,4098	0,4240	0,4434
Centro de acopio 4	0,4019	0,4158	0,4349

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-21:** Costos para biorrefinerías en el periodo de tiempo 1 [USD]

	Costo de Apertura			Costo Fijo		
	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3
Biorrefinería 1	15.352.554	27.513.256	48.700.439	138.300	228.147	390.513
Biorrefinería 2	15.352.554	27.513.256	48.700.439	138.300	228.147	390.513
Biorrefinería 3	15.057.313	26.984.155	47.763.893	135.640	223.760	383.003

	Costo Variable		
	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3
Biorrefinería 1	12,29	12,72	13,30
Biorrefinería 2	12,29	12,72	13,30
Biorrefinería 3	12,06	12,47	13,05

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-22:** Costos de transporte de los residuos desde centros de acopio a biorrefinerías en el periodo de tiempo 1 [USD/ton]

	Residuo 1			Residuo 2		
	Biorrefinería	Biorrefinería	Biorrefinería	Biorrefinería	Biorrefinería	Biorrefinería
	1	2	3	1	2	3
Centro de acopio 1	10,22	10,65	12,71	10,22	10,65	12,71
Centro de acopio 2	0,00	5,68	9,86	0,00	5,68	9,86
Centro de acopio 3	5,68	0,00	6,60	5,68	0,00	6,60
Centro de acopio 4	9,86	6,60	0,00	9,86	6,60	0,00

	Residuo 3		
	Biorrefinería	Biorrefinería	Biorrefinería
	1	2	3
Centro de acopio 1	10,22	10,65	12,71
Centro de acopio 2	0,00	5,68	9,86
Centro de acopio 3	5,68	0,00	6,60
Centro de acopio 4	9,86	6,60	0,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-23:** Costos de transporte desde biorrefinerías a centrales de mezcla en el periodo de tiempo 1 [USD/litros]

	Central de mezcla 1	Central de mezcla 2	Central de mezcla 3
Biorrefinería 1	0,0763	0,0357	0,0248
Biorrefinería 2	0,0613	0,0317	0,0417
Biorrefinería 3	0,0457	0,0321	0,0556

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-24:** Impactos ambientales en los centros de acopio

	Sólidos Suspendedos Totales (SST) [kg/ton residuo]			CO <sub>2</sub> generados [ton CO <sub>2</sub> /ton residuo]		
	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3
Residuo 1	0,000	0,000	0,000	0,224	0,224	0,224
Residuo 2	0,000	0,000	0,000	0,226	0,226	0,226
Residuo 3	0,010	0,010	0,010	0,228	0,228	0,228

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-25:** CO<sub>2</sub> generado por el transporte de los residuos desde proveedores hasta centros de acopio [ton CO<sub>2</sub>/ton residuo]

	Centro de acopio 1			Centro de acopio 2		
	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
Proveedor 1	0,10873	0,10873	0,10873	0,14157	0,14157	0,14157
Proveedor 2	0,00000	0,00000	0,00000	0,06268	0,06268	0,06268
Proveedor 3	0,06268	0,06268	0,06268	0,00000	0,00000	0,00000
Proveedor 4	0,06150	0,06150	0,06150	0,03591	0,03591	0,03591
Proveedor 5	0,07596	0,07596	0,07596	0,07368	0,07368	0,07368

	Centro de acopio 3			Centro de acopio 4		
	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
Proveedor 1	0,12847	0,12847	0,12847	0,10560	0,10560	0,10560
Proveedor 2	0,06150	0,06150	0,06150	0,07560	0,07560	0,07560
Proveedor 3	0,03591	0,03591	0,03591	0,07368	0,07368	0,07368
Proveedor 4	0,00000	0,00000	0,00000	0,03548	0,03548	0,03548
Proveedor 5	0,03548	0,03548	0,03548	0,00000	0,00000	0,00000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-26:** CO<sub>2</sub> generado por el transporte de los residuos desde los centros de acopio a las biorrefinerías [ton CO<sub>2</sub>/ton residuo]

	Biorrefinería 1			Biorrefinería 2		
	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
Centro de acopio 1	0,06268	0,06268	0,06268	0,06150	0,06150	0,06150
Centro de acopio 2	0,00000	0,00000	0,00000	0,03591	0,03591	0,03591
Centro de acopio 3	0,03591	0,03591	0,03591	0,00000	0,00000	0,00000
Centro de acopio 4	0,07368	0,07368	0,07368	0,03548	0,03548	0,03548

	Biorrefinería 3		
	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
Centro de acopio 1	0,07560	0,07560	0,07560
Centro de acopio 2	0,07368	0,07368	0,07368
Centro de acopio 3	0,03548	0,03548	0,03548
Centro de acopio 4	0,00000	0,00000	0,00000

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-27:** CO<sub>2</sub> generado por el transporte desde las biorrefinerías hasta las centrales de mezcla [ton CO<sub>2</sub>/litro bioetanol]

	Central de mezcla 1	Central de mezcla 2	Central de mezcla 3
<b>Biorrefinería 1</b>	0,150218670	0,055596000	0,027798000
<b>Biorrefinería 2</b>	0,113310060	0,035475291	0,064995291
<b>Biorrefinería 3</b>	0,076541670	0,050061000	0,102766500

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-28:** Índice de desempleo ubicaciones en el periodo de tiempo 1

Proveedor 1	0,084
Proveedor 2	0,070
Proveedor 3	0,080
Proveedor 4	0,139
Proveedor 5	0,096
Centro de acopio 1	0,0700
Centro de acopio 2	0,0800
Centro de acopio 3	0,1390
Centro de acopio 4	0,0960
Biorrefinería 1	0,0800
Biorrefinería 2	0,1390
Biorrefinería 3	0,0960

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-29:** Disponibilidad de suministro

Periodo de tiempo	Proveedor 1			Proveedor 2		
	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
$t = 1$	4.510,9	0,0	0,0	15.013,8	0,0	0,0
$t = 2$	4.510,9	0,0	0,0	15.013,8	0,0	0,0
$t = 3$	4.510,9	0,0	0,0	9.034,3	10.635,1	3.617,3
$t = 4$	4.510,9	0,0	0,0	2.469,1	33.988,2	11.560,2
$t = 5$	4.510,9	0,0	0,0	2.469,1	33.988,2	11.560,2
$t = 6$	4.510,9	0,0	0,0	9.034,3	10.635,1	3.617,3
$t = 7$	4.510,9	0,0	0,0	15.013,8	0,0	0,0
$t = 8$	4.510,9	0,0	0,0	15.013,8	0,0	0,0
$t = 9$	0,0	32.091,6	10.915,1	0,0	51.554,5	17.534,9
$t = 10$	0,0	32.091,6	10.915,1	0,0	51.554,5	17.534,9
$t = 11$	0,0	32.091,6	10.915,1	0,0	51.554,5	17.534,9
$t = 12$	0,0	32.091,6	10.915,1	0,0	51.554,5	17.534,9

Periodo de tiempo	Proveedor 3			Proveedor 4		
	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
$t = 1$	42.700,3	0,0	0,0	32.677,5	0,0	0,0
$t = 2$	42.700,3	0,0	0,0	32.677,5	0,0	0,0
$t = 3$	329,8	91.765,6	31.211,7	0,0	58.119,3	19.767,8
$t = 4$	329,8	91.765,6	31.211,7	0,0	58.119,3	19.767,8
$t = 5$	329,8	91.765,6	31.211,7	0,0	58.119,3	19.767,8
$t = 6$	329,8	91.765,6	31.211,7	0,0	58.119,3	19.767,8
$t = 7$	42.700,3	0,0	0,0	32.677,5	0,0	0,0
$t = 8$	42.700,3	0,0	0,0	32.677,5	0,0	0,0
$t = 9$	3.074,8	72.236,5	24.569,4	0,0	58.119,3	19.767,8
$t = 10$	3.074,8	72.236,5	24.569,4	0,0	58.119,3	19.767,8
$t = 11$	3.074,8	72.236,5	24.569,4	0,0	58.119,3	19.767,8
$t = 12$	3.074,8	72.236,5	24.569,4	0,0	58.119,3	19.767,8

**Tabla 6-29:** (Continuación)

Periodo de tiempo	Proveedor 5		
	Residuo 1	Residuo 2	Residuo 3
$t = 1$	26.195,6	0,0	0,0
$t = 2$	26.195,6	0,0	0,0
$t = 3$	26.195,6	0,0	0,0
$t = 4$	0,0	93.181,5	31.693,3
$t = 5$	0,0	93.181,5	31.693,3
$t = 6$	26.195,6	0,0	0,0
$t = 7$	26.195,6	0,0	0,0
$t = 8$	26.195,6	0,0	0,0
$t = 9$	0,0	93.181,5	31.693,3
$t = 10$	0,0	93.181,5	31.693,3
$t = 11$	0,0	93.181,5	31.693,3
$t = 12$	0,0	93.181,5	31.693,3

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-30:** Capacidades centros de acopio

	Capacidad máxima de procesamiento [ton/año]			Capacidad máxima de inventario [ton]		
	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3	Capacidad 1	Capacidad 2	Capacidad 3
Residuo 1	1.500,00	3.000,00	6.000,00	9.000,00	18.000,00	36.000,00
Residuo 2	8.900,00	17.800,00	35.600,00	0,00	0,00	0,00
Residuo 3	3.000,00	6.000,00	12.000,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 6-31:** Demanda de centrales de mezcla [Litros]

Periodo de tiempo	Central de mezcla 1	Central de mezcla 2	Central de mezcla 3
$t = 1$	2.152.642	3.213.925	598.159
$t = 2$	1.939.459	3.044.436	531.346
$t = 3$	2.060.461	3.175.188	531.450
$t = 4$	2.004.466	3.154.720	555.214
$t = 5$	2.053.203	3.273.716	567.860
$t = 6$	1.853.803	2.993.985	511.249
$t = 7$	2.063.865	3.227.801	523.321
$t = 8$	1.979.502	3.127.667	511.798
$t = 9$	1.968.367	3.080.267	508.150
$t = 10$	2.008.047	3.169.717	516.845
$t = 11$	1.806.064	2.835.885	471.590
$t = 12$	2.298.882	3.568.261	561.870

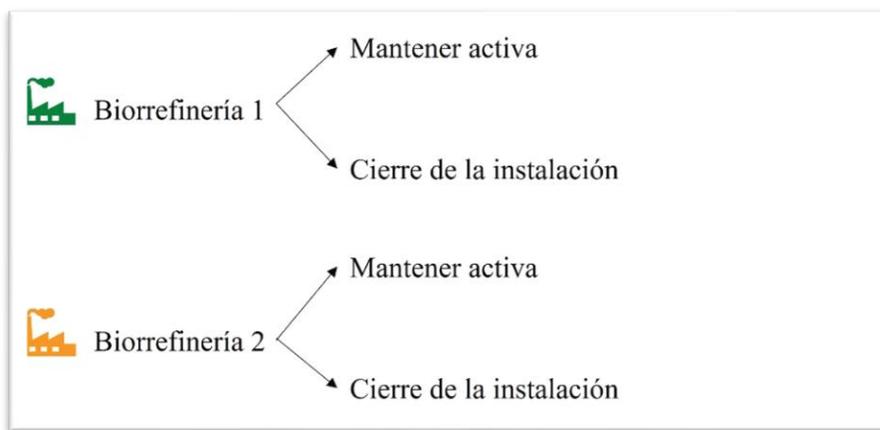
Fuente: Elaboración propia

## K. Anexo: Reglas para generar lista de posibilidades de cierre

A continuación, se detallan los pasos para generar la lista de posibilidades de cierre de las instalaciones. Para una mayor comprensión se ejemplifica un escenario de dos biorrefinerías activas.

**Paso 1:** Se generan dos alternativas para cada instalación abierta (mantener activa o cierre de la instalación) (Figura 6-2)

**Figura 6-2:** Alternativas de cierre para dos biorrefinerías



Fuente: Elaboración propia

**Paso 2:** Asigne probabilidades de ocurrencia a las alternativas generadas con las siguientes reglas:

Regla 1: Si el promedio de la demanda restante (demanda de los periodos  $[t, t + 1, \dots, T]$ ) es mayor a la capacidad actual de las instalaciones evaluadas y, el promedio del valor esperado de la oferta restante (valor esperado de los residuos disponibles de los periodos  $[t, t + 1, \dots, T]$ ) es mayor que la capacidad actual de las instalaciones evaluadas. Asigne las siguientes probabilidades de ocurrencia:

Mantener activa la instalación (70%).

Cierre de la instalación (30%).

Regla 2: Si el promedio de la demanda restante (demanda de los periodos  $[t, t + 1, \dots, T]$ ) es menor a la capacidad actual de las instalaciones evaluadas y, el promedio del valor esperado de la oferta restante (valor esperado de los residuos disponibles de los periodos  $[t, t + 1, \dots, T]$ ) es menor que la capacidad actual de las instalaciones evaluadas. Asigne las siguientes probabilidades de ocurrencia:

Mantener activa la instalación (30%).

Cierre de la instalación (70%).

Regla 3: En algún otro caso las alternativas tienen la misma probabilidad de ocurrencia.

Continuando con el ejemplo y asumiendo que se cumple la regla 1 se obtendrían los resultados que se presentan en la Tabla 6-32.

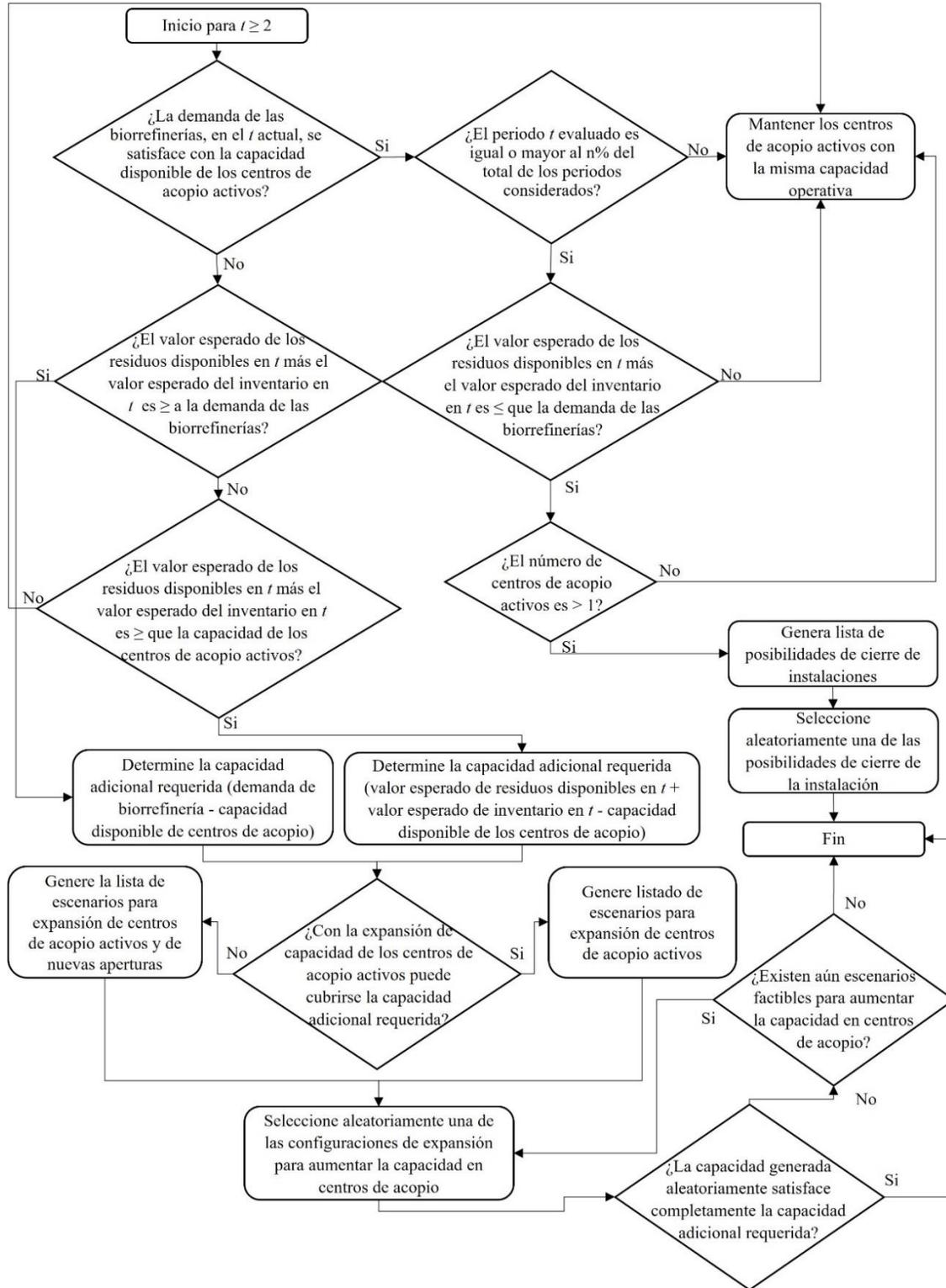
**Tabla 6-32:** Ejemplo de asignación de probabilidades a lista de opciones de cierre de instalaciones

Biorrefinería	Alternativa	Probabilidad por biorrefinería	Probabilidad general
Biorrefinería 1	Mantener activa	0.7	0,35
Biorrefinería 1	Cierre de la instalación	0.3	0,15
Biorrefinería 2	Mantener activa	0.7	0,35
Biorrefinería 2	Cierre de la instalación	0.3	0,15

Fuente: Elaboración propia

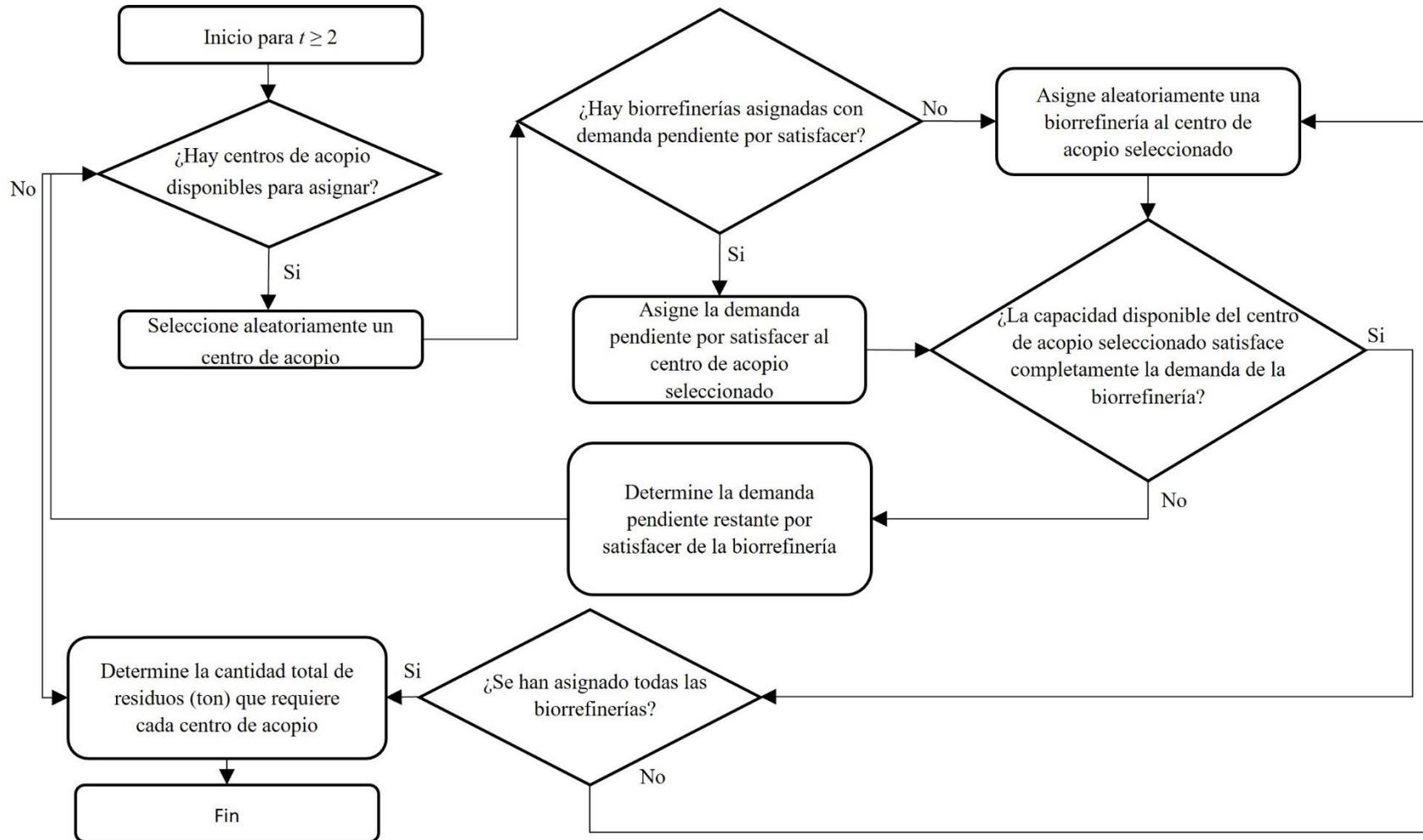
**L. Anexo: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura, expansión, cierre y asignación de centros de acopio para ( $t \geq 2$ )**

**Figura 6-3:** Diagrama de flujo de la fase constructiva – Apertura, expansión y cierre de centros de acopio para  $(t \geq 2)$



Fuente: Elaboración propia

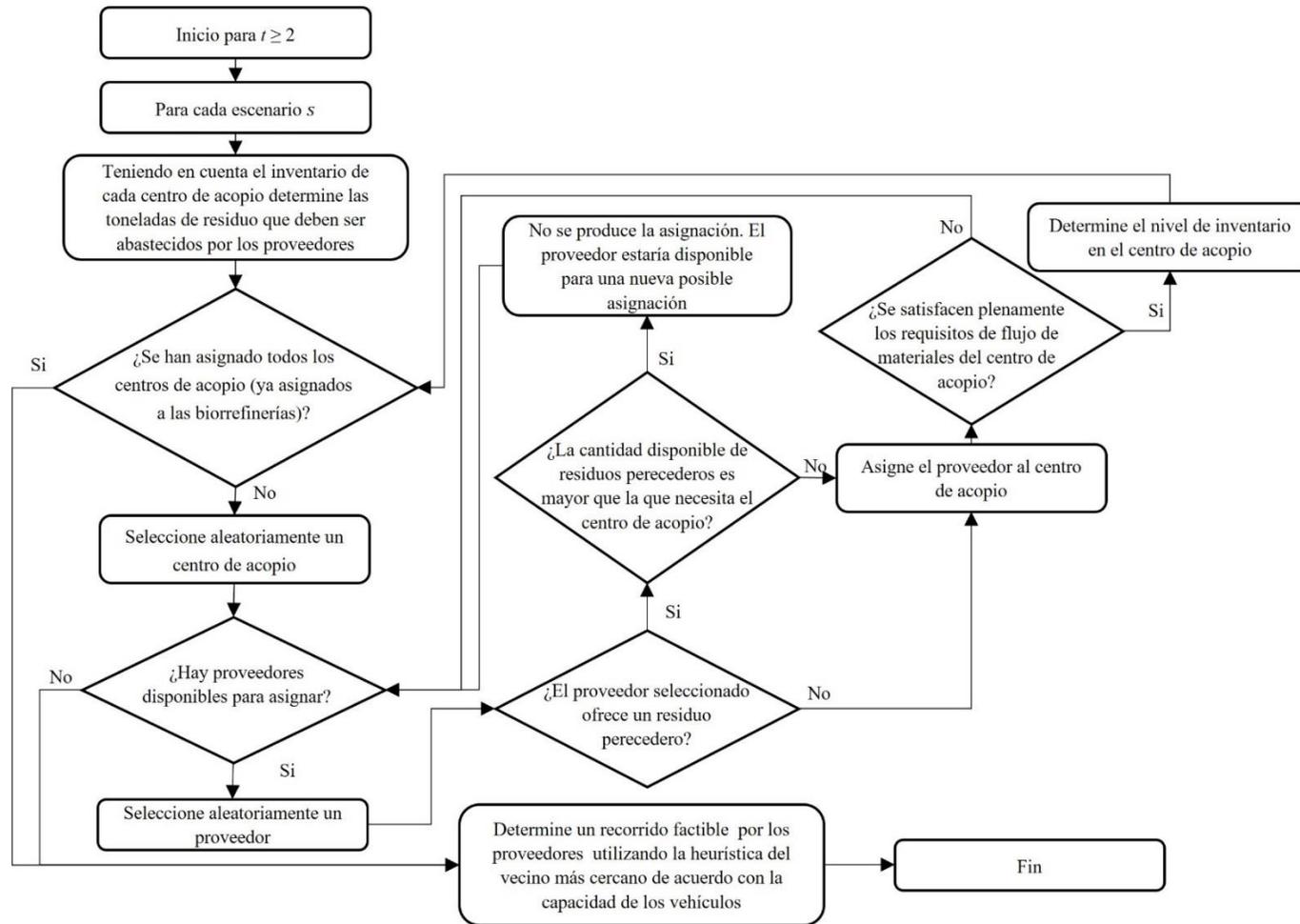
**Figura 6-4:** Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de centros de acopio para ( $t \geq 2$ )



Fuente: Elaboración propia

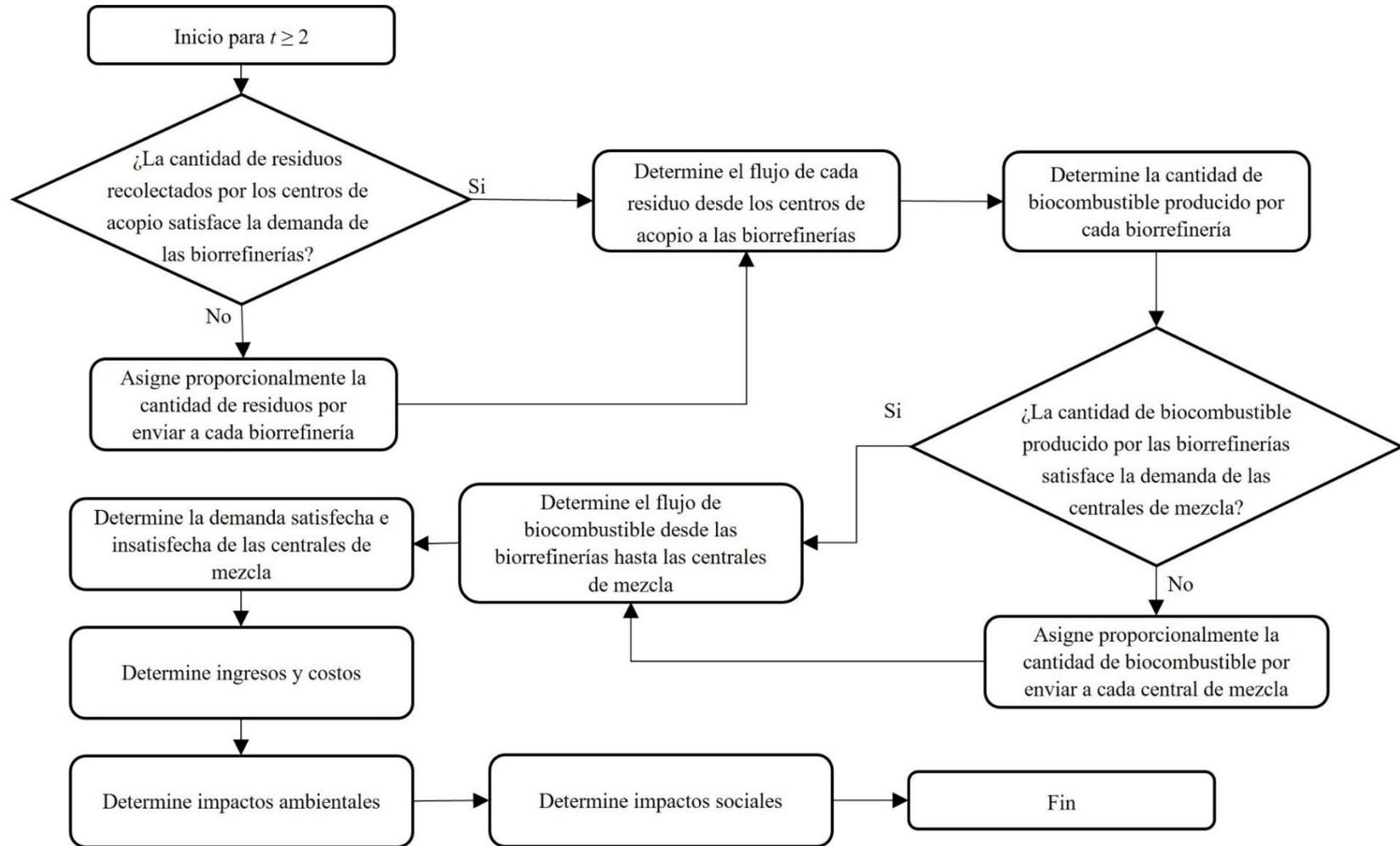
**M. Anexo: Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de proveedores a centros de acopio y de flujo final de materiales para  $(t \geq 2)$**

**Figura 6-5:** Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de proveedores a centros de acopio para ( $t \geq 2$ )



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-6:** Diagrama de flujo de la fase constructiva – Asignación de flujo final de materiales para ( $t \geq 2$ )



Fuente: Elaboración propia

**N. Anexo: Parámetros de entrada para conjunto de datos de prueba**

Diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café

Parámetro	Valor/distribución de probabilidad	Parámetro	Valor/distribución de probabilidad
$PBE_t$ [\$/l]	$U[10, 50]$	$PBM_{tw}$ [\$/ton]	$W_1$ 6.08 $W_2$ 3.80 $W_3$ 3.80
$cosA_{jbt}$ [\$]	$U[5, 10] \times 10^5$	$cosP_{kct}$ [\$]	$U[5, 15] \times 10^5$
$cosfA_{jbt}$ [\$/t]	$U[15, 30] \times 10$	$cosfP_{kct}$ [\$/t]	$U[15, 30] \times 10$
$cosvA_{wjb}$ [\$/ton]	$U[2, 5]$	$cosvP_{kct}$ [\$/ton]	$U[2, 5]$
$cosstoA_{wjb}$ [\$/ton]	$U[1, 4]$	$costSA_{whgt}$ [\$/trip]	$U[5, 20]$
$cosftSA_w$ [\$/vehículo]	$U[100, 120]$	$costAP_{wjk}$ [\$/ton]	$U[5, 20]$
$costPB_{kmt}$ [\$/l]	$U[0.01, 0.09]$	$cosSST_t$ [\$/kg TSS]	0.00663333
$cosCO2_t$ [\$/ton CO2 equiv]	12.79	$SSTSw$ [kg TSS/ ton de residuo]	$W_1$ 0.00 $W_2$ 402.12 $W_3$ 421.90
$CO2S_w$ [ton CO2 equiv/ton de residuo]	$W_1$ 0.00 $W_2$ 1.78 $W_3$ 0.00	$SSTA_{wb}$ [Kg TSS/ton de residuo]	$B_1$ $B_2$ $B_3$ $W_1$ 0.00 0.00 0.00 $W_2$ 0.00 0.00 0.00 $W_3$ 0.01 0.01 0.01
$CO2A_{wb}$ [ton CO2 equiv / ton de residuo]	$B_1$ $B_2$ $B_3$ $W_1$ 0.11 0.23 0.44 $W_2$ 0.16 0.31 0.64 $W_3$ 0.32 0.64 1.29	$SSTP_c$ [Kg TSS/ton de residuo]	$C_1$ 136.120 $C_2$ 136.121 $C_3$ 136.122
$CO2P_c$ [ton CO2 equiv / ton de residuo]	$C_1$ 0.2244 $C_2$ 0.2259 $C_3$ 0.2281	$CO2SA_{whg}$ $CO2AP_{wjk}$ $CO2PB_{km}$	$Factor CO_2 = 0.00123$ [ton CO <sub>2</sub> /ton_km]
$UES_{it}$ $UEA_{jt}$ $UEP_{kt}$ $UEB_{mt}$	$U[0, 0.2]$ [rate]	$ES_w$ [Número de empleos]	$W_1$ 0 $W_2$ 1 $W_3$ 0
$EA_b$ [Número de empleos]	$B_1$ 80 $B_2$ 118 $B_3$ 179	$EP_c$ [Número de empleos]	$C_1$ 108 $C_2$ 190 $C_3$ 318
$ETSA_w$ $ETAP_w$ $ETPB$	1 [Número de empleos]	$BIO$ [l/ha]	6,525
$S_{iwt}$ [ton]	$U[a, b]$ $a = U[30, 50]$ $b = a + U[0, 10]$	$capA_{wb}$ [ton] $capstoA_{wb}$ [ton]	$U[4, 6] \times 10^2$
$capP_c$ [ton]	$U[8, 18] \times 10^2$	$IC$ [l/ton]	188.72
$capVSA_w$ [ton]	$U[10, 28] \times 10$	$capVAP_w$ [ton] $capVPB$ [l]	$U[20, 24] \times 10$
$D_{mt}$ [l/t]	$U[30, 80] \times 10^3$	Tasa de interés	0.115176
Fracción sobre activos para pago de cierre de instalaciones	0.07 [tasa]	Variación de costos por período de tiempo	$U[0, 0.1]$ [tasa]

Anexo N: Parámetros de entrada para conjuntos de datos de prueba

**Anexo N:** (Continuación)

Parámetro	Valor/distribución de probabilidad	Parámetro	Valor/distribución de probabilidad
<i>Variación de generación de residuos y demanda por periodo de tiempo</i>	$U[-0.5, 0.5]$ [tasa]	<i>Variación de la tasa de desempleo por periodo de tiempo</i>	$U[-0.05, 0.05]$ [tasa]

Fuente: Adaptado de Rabbani et al. (2019) y Morales-Chávez et al. (2018)

## O. Anexo: Análisis mejoramiento de la solución inicial para diferentes temperaturas de la PHeu

---

Temperatura inicial (T)	Mejoramiento promedio entre la solución inicial y la solución final de la PHeu				
	P1	P2	P3	P4	P5
250	-20,07%	-31,32%	-21,49%	-22,81%	-15,15%
500	-35,90%	-31,81%	-17,50%	-24,22%	-17,46%
750	-15,45%	-20,98%	-19,80%	-11,32%	-16,30%
1000	-10,00%	-12,25%	-19,21%	-17,37%	-10,11%

Fuente: Elaboración propia

## P. Anexo: Comparación solución estocástica vs solución información perfecta

**Tabla 6-33:** Comparación solución estocástica vs solución información perfecta

	Solución estocástica	Solución -5%	Solución punto medio	Solución +5%	Diferencia -5%
P1_5%	\$9.039.085,56	\$9.119.569,73	\$9.557.251,49	\$9.949.869,27	\$(80.484,17)
P2_5%	\$16.526.476,01	\$17.330.107,72	\$18.200.227,69	\$18.299.227,69	\$(803.631,71)
P3_5%	\$28.004.411,44	\$28.780.535,12	\$30.276.752,92	\$31.750.679,35	\$(776.123,68)
P4_5%	\$22.515.907,05	\$24.976.253,39	\$25.063.728,92	\$25.115.891,99	\$(2.460.346,34)
P5_5%	\$33.506.956,87	\$34.868.216,83	\$34.879.890,38	\$34.884.736,55	\$(1.361.259,96)

	Diferencia punto medio	'Diferencia +5%	Diferencia -5%	Diferencia punto medio	'Diferencia +5%
P1_5%	\$(518.165,93)	\$ (910.783,71)	-1%	-6%	-10%
P2_5%	\$(1.673.751,68)	\$ (1.772.751,68)	-5%	-10%	-11%
P3_5%	\$(2.272.341,48)	\$(3.746.267,92)	-3%	-8%	-13%
P4_5%	\$(2.547.821,87)	\$ (2.599.984,94)	-11%	-11%	-12%
P5_5%	\$(1.372.933,51)	\$ (1.377.779,68)	-4%	-4%	-4%

	Solución estocástica	Solución -10%	Solución punto medio	Solución +10%	Diferencia -10%
P1_10%	\$9.038.825,57	\$8.623.661,54	\$9.557.251,49	\$10.457.233,61	\$415.164,04
P2_10%	\$15.207.917,33	\$16.418.852,38	\$18.200.227,69	\$20.030.785,31	\$(1.210.935,05)
P3_10%	\$24.633.365,21	\$27.270.023,51	\$30.276.752,92	\$33.217.066,54	\$(2.636.658,30)
P4_10%	\$19.163.694,71	\$24.286.149,06	\$25.063.728,92	\$25.131.419,77	\$(5.122.454,35)
P5_10%	\$25.895.705,51	\$34.857.744,44	\$34.879.890,38	\$34.890.196,78	\$(8.962.038,93)

Diseño de una cadena de suministro de biocombustible a partir de residuos de café

	Diferencia punto medio	'Diferencia +10%	Diferencia -10%	Diferencia punto medio	'Diferencia +10%
P1_10%	\$(518.425,92)	\$(1.418.408,04)	5%	-6%	-16%
P2_10%	\$(2.992.310,36)	\$(4.822.867,98)	-8%	-20%	-32%
P3_10%	\$(5.643.387,70)	\$(8.583.701,33)	-11%	-23%	-35%
P4_10%	\$(5.900.034,2)	\$(5.967.725,06)	-27%	-31%	-31%
P5_10%	\$(8.984.184,87)	\$(8.994.491,27)	-35%	-35%	-35%

	Solución estocástica	Solución -25%	Solución punto medio	Solución +25%	Diferencia -25%
P1_25%	\$8.913.363,20	\$7.195.414,32	\$9.557.251,49	\$11.961.940,48	\$1.717.948,88
P2_25%	\$15.550.070,15	\$13.643.977,79	\$18.200.227,69	\$22.713.792,52	\$1.906.092,37
P3_25%	\$23.821.043,84	\$22.747.145,74	\$30.276.752,92	\$34.725.790,26	\$1.073.898,10
P4_25%	\$19.279.965,12	\$20.405.066,11	\$25.063.728,92	\$25.168.087,88	\$(1.125.100,99)
P1_25%	\$25.482.464,50	\$34.597.398,61	\$34.879.890,38	\$34.904.897,26	\$(9.114.934,11)

	Diferencia punto medio	'Diferencia +25%	Diferencia -25%	Diferencia punto medio	'Diferencia +25%
P1_25%	\$(643.888,29)	\$(3.048.577,28)	19%	-7%	-34%
P2_25%	\$(2.650.157,5)	\$(7.163.722,36)	12%	-17%	-46%
P3_25%	\$(6.455.709,0)	\$(10.904.746,43)	5%	-27%	-46%
P4_25%	\$(5.783.763,8)	\$(5.888.122,76)	-6%	-30%	-31%
P5_25%	\$(9.397.425,8)	\$(9.422.432,76)	-36%	-37%	-37%

Fuente: Elaboración propia

## Bibliografía

- Ahmadi-Javid, A., & Seddighi, A. H. (2012). A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks. *Engineering Optimization*, 44(6), 637–656. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2011.600756>
- Ahmadi Javid, A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 582–597. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.005>
- Alikhani, R., Torabi, S. A., & Altay, N. (2021). Retail supply chain network design with concurrent resilience capabilities. *International Journal of Production Economics*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108042>
- Aloui, A., Hamani, N., Derrouiche, R., & Delahoche, L. (2021). Assessing the benefits of horizontal collaboration using an integrated planning model for two-echelon energy efficiency-oriented logistics networks design. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*. <https://doi.org/10.1080/23302674.2021.1887397>
- Amaruchkul, K. (2021). Planning migrant labor for green sugarcane harvest: A stochastic logistics model with dynamic yield prediction. *Computers and Industrial Engineering*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107016>
- Ambrosino, D., & Grazia Scutellà, M. (2005). Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 610–624. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2003.04.009>
- Aravendan, M., & Panneerselvam, R. (2014). Literature review on network design problems in closed loop and reverse supply chains. *Intelligent Information Management*, 2014.
- Asadi, E., Habibi, F., Nickel, S., & Sahebi, H. (2018). A bi-objective stochastic location-inventory-routing model for microalgae-based biofuel supply chain. *Applied Energy*, 228(July), 2235–2261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.067>
- Awudu, I., & Zhang, J. (2012). Uncertainties and sustainability concepts in biofuel supply chain management: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1359–1368. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.10.016>

- Ayoughi, H., Dehghani Podeh, H., Raad, A., & Talebi, D. (2020). Providing an Integrated Multi-Objective Model for Closed-Loop Supply Chain under Fuzzy Conditions with Upgral Approach. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 11(1), 107–136.
- Babagolzadeh, M., Shrestha, A., Abbasi, B., & Zhang, Y. (2020). Sustainable cold supply chain management under demand uncertainty and carbon tax regulation. *Transportation Research Part D*, 80, 102245. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102245>
- Bag, S., Dhamija, P., Bryde, D. J., & Singh, R. K. (2022). Effect of eco-innovation on green supply chain management, circular economy capability, and performance of small and medium enterprises. *Journal of Business Research*, 141, 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.12.011>
- Bagherinejad, J., & Shoeib, M. (2018). Dynamic capacitated maximal covering location problem by considering dynamic capacity. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(2), 249–264. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.5.004>
- Banasik, A., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2017). Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, 409–420. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.012>
- Behzadi, G., O’Sullivan, M. J., Olsen, T. L., & Zhang, A. (2018). Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models. *Omega*, 79, 21–42. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.005>
- Bera, T., Inglett, K. S., Inglett, P. W., Vardanyan, L., Wilkie, A. C., O’Connor, G. A., & Reddy, K. R. (2021). Comparing first- and second-generation bioethanol by-products from sugarcane: Impact on soil carbon and nitrogen dynamics. *Geoderma*, 384. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114818>
- Beske, P., Land, A., & Seuring, S. (2014). Sustainable supply chain management practices and dynamic capabilities in the food industry: A critical analysis of the literature. *International Journal of Production Economics*, 152, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.026>
- Biuki, M., Kazemi, A., & Alinezhad, A. (2020). An integrated location-routing-inventory model for sustainable design of a perishable products supply chain network. *Journal of Cleaner Production*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120842>
- Bonilla-Hermosa, V. A., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. *Bioresource Technology*, 166, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.031>
- Boostani, A., Jolai, F., & Bozorgi-Amiri, A. (2021). Designing a sustainable humanitarian relief

- logistics model in pre-and postdisaster management. *International Journal of Sustainable Transportation*, 15(8), 604–620.
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., & Labadie, N. (2016). Handling uncertainty in agricultural supply chain management: A state of the art. *European Journal of Operational Research*, 254(2), 348–359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.057>
- Cadena, E., Rocca, F., Gutierrez, J. A., & Carvalho, A. (2019). Social life cycle assessment methodology for evaluating production process design : Biorefinery case study. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117718>
- Cenicafé. (2016). *Manejo de Subproductos*. [https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos\\_cafe/manejo\\_de\\_subproductos](https://www.cenicafe.org/es/index.php/cultivemos_cafe/manejo_de_subproductos)
- Choi, I. S., Wi, S. G., Kim, S.-B., & Bae, H.-J. (2012). Conversion of coffee residue waste into bioethanol with using popping pretreatment. *Bioresource Technology*, 125, 132–137. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.080>
- Christopher, M. (2007). New directions in logistics. Waters, D., *Global Logistics: New Directions in Supply Chain Management*, London, Kogan Page Limited, 21–32.
- Conpes. (2008). *Conpes 3510. Lineamientos de política para promover la producción sostenible de Biocombustibles en Colombia*. [http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Conpes 3510.pdf](http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/Conpes%203510.pdf)
- Conpes. (2022). *CONPES 4075. Política de transición energética*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/4075.pdf>
- Correa, D. F., Beyer, H. L., Possingham, H. P., Fargione, J. E., Hill, J. D., & Schenk, P. M. (2021). Microalgal biofuel production at national scales: Reducing conflicts with agricultural lands and biodiversity within countries. *Energy*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119033>
- Čuček, L., Martín, M. J. P., Grossmann, I. E., & Kravanja, Z. (2012). Multi-objective optimization of a biorefinery's supply network. *AICHE 2012 - 2012 AIChE Annual Meeting*, 1.
- da Silva, C., Barbosa-Póvoa, A. P., & Carvalho, A. (2020). Environmental monetization and risk assessment in supply chain design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121552>
- Duarte, A., Sarache, W., & Costa, Y. (2014). A facility-location model for biofuel plants: Applications in the Colombian context. *Energy*, 72, 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.069>
- Duarte, A., Sarache, W., & Costa, Y. (2016). Biofuel supply chain design from Coffee Cut Stem under environmental analysis. *Energy*, 100, 321–331. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.01.076>

- Echeverry, M. (2009). *Algoritmos evolutivos y técnicas bio-inspiradas. De la teoría a la práctica*. Universidad tecnológica de Pereira Pereira.
- Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega (United Kingdom)*, *54*, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>
- Fallah-Tafti, A., Vahdatzad, M. A., & Sadegheiyeh, A. (2019). A comprehensive mathematical model for a location-routing-inventory problem under uncertain demand: A numerical illustration in cash-in-transit sector. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, *32*(11), 1634 – 1642. <https://doi.org/10.5829/ije.2019.32.11b.15>
- FAO. (2013). *Food wastage footprint: impacts on natural resources: summary report*. Food & Agriculture Org.
- Fatemi Ghomi, S. M. T., & Asgarian, B. (2019). Development of metaheuristics to solve a transportation inventory location routing problem considering lost sale for perishable goods. *Journal of Modelling in Management*, *14*(1), 175–198. <https://doi.org/10.1108/JM2-05-2018-0064>
- Fedebiocombustibles. (2022). *Fedebiocombustibles*. <https://fedebiocombustibles.com/2022/06/01/4-contribuciones-clave-del-sector-de-los-biocombustibles-ante-los-compromisos-del-cop-26-2/>
- Feitó-Cespón, M., Costa, Y., Pishvae, M. S., & Cespón-Castro, R. (2021). A fuzzy inference based scenario building in two-stage optimization framework for sustainable recycling supply chain redesign. *Expert Systems with Applications*, *165*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113906>
- FNC. (2013a). *Familias cafeteras en Colombia*. [http://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/nuestros\\_caficultores](http://www.federaciondecafeteros.org/particulares/es/nuestros_caficultores)
- FNC. (2013b). *La decisión tranquila de zoquear hoy un cafetal - Federación Nacional de Cafeteros*. <https://federaciondecafeteros.org/wp/blog/la-decision-tranquila-de-zoquear-hoy-un-cafetal/>
- FNC. (2022). *Precios, área y producción de café*. <https://federaciondecafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>
- Gamborg, C., Millar, K., Shortall, O., & Sandøe, P. (2012). Bioenergy and Land Use: Framing the Ethical Debate. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, *25*(6), 909–925. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84869082138&partnerID=40&md5=114a56e8989289127258d3e34e663bf0>
- Ghelichi, Z., Saidi-Mehrabad, M., & Pishvae, M. S. (2018). A stochastic programming approach toward optimal design and planning of an integrated green biodiesel supply chain network under uncertainty: A case study. *Energy*, *156*, 661–687.

- <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.103>
- Gholipour, S., Ashoftehfard, A., & Mina, H. (2020). Green supply chain network design considering inventory-location-routing problem: A fuzzy solution approach. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 35(4), 436–452. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2020.106272>
- Ghorashi, S. B., Hamed, M., & Sadeghian, R. (2020). Modeling and optimization of a reliable blood supply chain network in crisis considering blood compatibility using MOGWO. *Neural Computing and Applications*, 32(16), 12173 – 12200. <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04343-1>
- Govindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, 152, 9–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.028>
- Govindan, K., Mina, H., Esmaili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (2020). An Integrated Hybrid Approach for Circular supplier selection and Closed loop Supply Chain Network Design under Uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118317>
- GRI. (2016). Global Reporting Initiative. In *GRI 306: Effluents and Waste. GRI Standards*. <https://www.globalreporting.org/standards/gri-standards-download-center/>
- Guerrero, W. J., Prodhon, C., Velasco, N., & Amaya, C. A. (2013). Hybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 359–370. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.07.025>
- Habibi, F., Asadi, E., & Sadjadi, S. J. (2017). Developing a location-inventory-routing model using METRIC approach in inventory policy. *Uncertain Supply Chain Management*, 5(4), 337–358. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2017.4.003>
- Habibi, F., Asadi, E., & Sadjadi, S. J. (2018). A location-inventory-routing optimization model for cost effective design of microalgae biofuel distribution system: A case study in Iran. *Energy Strategy Reviews*, 22(April 2017), 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.006>
- Hajirasouli, A., & Kumarasuriyar, A. (2016). The social dimension of sustainability: Towards some definitions and analysis. *Journal of Social Science for Policy Implications*, 4(2), 23–34.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P., & others. (2018). *Metodología de la investigación* (Vol. 4). McGraw-Hill Interamericana México.
- Ho, D. P., Ngo, H. H., & Guo, W. (2014). A mini review on renewable sources for biofuel. *Bioresource Technology*, 169(0), 742–749.

- <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.bioritech.2014.07.022>
- Hu, J., & Li, X. (2022). Construction and optimization of green supply chain management mode of agricultural enterprises in the digital economy. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 15(2), 1–18. <https://doi.org/10.4018/IJISSCM.287864>
- Huang, E., & Goetschalckx, M. (2014). Strategic robust supply chain design based on the Pareto-optimal tradeoff between efficiency and risk. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 508–518. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.038>
- Hurford, A. P., Huskova, I., & Harou, J. J. (2014). Using many-objective trade-off analysis to help dams promote economic development, protect the poor and enhance ecological health. *Environmental Science & Policy*, 38, 72–86. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCI.2013.10.003>
- Huysman, S., Sala, S., Mancini, L., Ardente, F., Alvarenga, R. A. F., De Meester, S., Mathieux, F., & Dewulf, J. (2015). Toward a systematized framework for resource efficiency indicators. *Resources, Conservation and Recycling*, 95, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.10.014>
- ICO. (2020). *International Coffee Organization*. <https://www.ico.org/>
- ICO. (2022). *Total production of exporting countries*. <http://www.ico.org/prices/po.htm>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (L. A. M. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave (ed.)). [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/contents.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html)
- IPCC. (2011). *Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* (C. von S. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer (ed.)).
- IPCC. (2018). *Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, & T. Waterfield (eds.)).
- IPCC. (2019). *Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* ((eds.)). In press. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J.

- Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, (ed.)).
- Ivanov, B., & Stoyanov, S. (2016). A mathematical model formulation for the design of an integrated biodiesel-petroleum diesel blends system. *Energy*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.038>
- Jena, S. D., Cordeau, J.-F., & Gendron, B. (2016). Solving a dynamic facility location problem with partial closing and reopening. *Computers and Operations Research*, 67, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.10.011>
- Jiménez, J. E., & Hernández, S. (2002). Marco conceptual de la cadena de suministro : un nuevo enfoque logístico. In *Instituto Mexicano del Transporte* (Issue 215). [http://www.elmayorportaldegerencia.com/Documentos/Cadena Suministros/\[PD\] Documentos - Un nuevo enfoque logistico.pdf](http://www.elmayorportaldegerencia.com/Documentos/Cadena Suministros/[PD] Documentos - Un nuevo enfoque logistico.pdf)
- Jonkman, J., Barbosa-Póvoa, A. P., & Bloemhof, J. M. (2019). Integrating harvesting decisions in the design of agro-food supply chains. *European Journal of Operational Research*, 276(1), 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.024>
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2020). Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review for research and applications. *International Journal of Production Economics*, 219, 179–194. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.022>
- Karakostas, P., Sifaleras, A., & Georgiadis, M. C. (2020). Adaptive variable neighborhood search solution methods for the fleet size and mix pollution location-inventory-routing problem. *Expert Systems with Applications*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113444>
- Kaya, O., & Ozkok, D. (2020). A Blood Bank Network Design Problem with Integrated Facility Location, Inventory and Routing Decisions. *Networks and Spatial Economics*, 20(3), 757 – 783. <https://doi.org/10.1007/s11067-020-09500-x>
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671–680. <https://doi.org/10.1126 / science.220.4598.671>
- Kumar, M., Tiwari, M. K., Wong, K. Y., Govindan, K., & Kuah, C. T. (2014). Evaluating reverse supply chain efficiency: Manufacturer’s perspective. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/901914>
- Lahri, V., Shaw, K., & Ishizaka, A. (2021). Sustainable supply chain network design problem: Using the integrated BWM, TOPSIS, possibilistic programming, and  $\epsilon$ -constrained methods. *Expert Systems with Applications*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114373>
- Lee, S., Park, S. J., & Seshadri, S. (2017). Plant location and inventory level decisions in global supply chains: Evidence from Korean firms. *European Journal of Operational Research*, 262(1), 163–179. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.03.044>

- Liu, S. C., & Lee, S. B. (2003). A two-phase heuristic method for the multi-depot location routing problem taking inventory control decisions into consideration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22(11–12), 941–950. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1639-5>
- Liu, Y., Ma, L., & Liu, Y. (2021). A novel robust fuzzy mean-UPM model for green closed-loop supply chain network design under distribution ambiguity. *Applied Mathematical Modelling*, 92, 99–135. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.10.042>
- Maass, K. L., Daskin, M. S., & Shen, S. (2016). Mitigating hard capacity constraints with inventory in facility location modeling. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 48(2), 120–133. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2015.1078015>
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management – A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>
- Meredith, J. R., Raturi, A., Amoako-Gyampah, K., & Kaplan, B. (1989). Alternative research paradigms in operations. *Journal of Operations Management*, 8(4), 297–326. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(89\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0272-6963(89)90033-8)
- Messmann, L., Zender, V., Thorenz, A., & Tuma, A. (2020). How to quantify social impacts in strategic supply chain optimization: State of the art. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120459>
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H., & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087–1092.
- Mirhashemi, M. S., Mohseni, S., Hasanzadeh, M., & Pishvae, M. S. (2018). Moringa oleifera biomass-to-biodiesel supply chain design: An opportunity to combat desertification in Iran. *Journal of Cleaner Production*, 203, 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.257>
- Monemi, R. N., Gelareh, S., Nagih, A., & Jones, D. (2021). Bi-objective load balancing multiple allocation hub location: a compromise programming approach. *Annals of Operations Research*, 296(1), 363–406.
- Morales-Chavez, M. M., Costa, Y., & Sarache, W. (2021). A three-objective stochastic location-inventory-routing model for agricultural waste-based biofuel supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107759. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107759>
- Morales-Chavez, M. M., Sarache, W., & Costa, Y. (2018). Towards a comprehensive model of a biofuel supply chain optimization from coffee crop residues. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116(May), 136–162.

- <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.06.001>
- Morales-Chavez, M. M., Sarache, W., Costa, Y., & Soto, J. (2020). Multiobjective stochastic scheduling of upstream operations in a sustainable sugarcane supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 123305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123305>
- Moreno-Camacho, C. A., Montoya-Torres, J. R., Jaegler, A., & Gondran, N. (2019). Sustainability metrics for real case applications of the supply chain network design problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 231, 600–618. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.278>
- Mottaghi, M., Bairamzadeh, S., & M.S., P. (2022). A taxonomic review and analysis on biomass supply chain design and planning: New trends, methodologies and applications. *Industrial Crops and Products*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114747>
- Nakhjirkan, S., Rafiei, F. M., & Kashan, A. H. (2019). Developing an integrated decision making model in supply chain under demand uncertainty using genetic algorithm and network data envelopment analysis. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 14(1), 53 – 81. <https://doi.org/10.1504/IJMOR.2019.096979>
- Nasr, N., Niaki, S. T. A., Hussenzadek Kashan, A., & Seifbarghy, M. (2021). An efficient solution method for an agri-fresh food supply chain: hybridization of Lagrangian relaxation and genetic algorithm. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13718-8>
- Nematollahi, M., & Tajbakhsh, A. (2020). Past, present, and prospective themes of sustainable agricultural supply chains: A content analysis. *Journal of Cleaner Production*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122201>
- Ng, R. T. L., & Maravelias, C. T. (2016). Design of Cellulosic Ethanol Supply Chains with Regional Depots. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 55(12). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03677>
- Nguyen, T. H., Granger, J., Pandya, D., & Paustian, K. (2019). High-resolution multi-objective optimization of feedstock landscape design for hybrid first and second generation biorefineries. *Applied Energy*, 238, 1484–1496. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.117>
- O'Neill, E. G., & Maravelias, C. T. (2021). Towards integrated landscape design and biofuel supply chain optimization. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100666>
- OCDE, & FAO, F. and A. O. of U. N.-. (2017). *Perspectivas Agrícolas OCDE-FAO*. <https://doi.org/10.1007/BF02915673>
- ONU. (2018). *Generación de residuos*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado->

- de-prensa/un-tercio-de-los-residuos-de-america-latina-y-el-caribe
- Organizacion de las naciones Unidas - Medio Ambiente (ONU). (2018). *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*.
- Pehlivan, C., Augusto, V., & Xie, X. (2014). Dynamic capacity planning and location of hierarchical service networks under service level constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *11*(3), 863–880. <https://doi.org/10.1109/TASE.2014.2309255>
- Pourhejazy, P., Kwon, O. K., & Lim, H. (2019). Integrating Sustainability into the Optimization of Fuel Logistics Networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, *23*(3), 1369 – 1383. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1373-7>
- Programa Mundial de Alimentos. (2020). *Programa Mundial de Alimentos*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>
- Rabbani, M., Amirhossein Sadati, S., & Farrokhi-Asl, H. (2020). Incorporating location routing model and decision making techniques in industrial waste management: Application in the automotive industry. *Computers and Industrial Engineering*, *148*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106692>
- Rabbani, M., Heidari, R., & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European Journal of Operational Research*, *272*(3), 945 – 961. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.024>
- Rahbari, M., Arshadi Khamseh, A., Sadati-Keneti, Y., & Jafari, M. J. (2022). A risk-based green location-inventory-routing problem for hazardous materials: NSGA II, MOSA, and multi-objective black widow optimization. *Environment, Development and Sustainability*, *24*(2), 2804 – 2840. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01555-1>
- Ríos, P. (2018). Metodología de la Investigación: Un enfoque pedagógico. *Editorial Cognitus CA*.
- Rocha, M. V. P., de Matos, L. J. B. L., Lima, L. P. D., Figueiredo, P. M. D. S., Lucena, I. L., Fernandes, F. A. N., & Gonçalves, L. R. B. (2014). Ultrasound-assisted production of biodiesel and ethanol from spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, *167*, 343–348. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.06.032>
- Rodríguez Valencia, N., Zambrano Franco, A., Rodríguez, N., & Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: fuente de energía renovable. In *Avances Técnicos Cenicafé (Colombia)(no. 393) 0120-0178* (Issue 3). <https://doi.org/doi.org/ISSN-0120-0178>
- Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. (Issue 338 ROM).

- Romero, C., & Rehman, T. (2003). *Multiple criteria analysis for agricultural decisions* (Vol. 11). Elsevier.
- Saif-Eddine, A. S., El-Beheiry, M. M., & El-Kharbotly, A. K. (2019). An improved genetic algorithm for optimizing total supply chain cost in inventory location routing problem. *Ain Shams Engineering Journal*, *10*(1), 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.09.002>
- Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *METODOLOGÍA de la investigación* (5th ed.). Mc Graw Hill.
- Sarache, W., & Morales-Chavez, M. M. (2016). *Localización, transporte e inventarios: tres decisiones estructurales en el diseño de cadenas de abastecimiento* (Editorial Universidad Nacional de Colombia (ed.)).
- Sarma, D., Das, A., & Bera, U. K. (2020). Uncertain demand estimation with optimization of time and cost using Facebook disaster map in emergency relief operation. *Applied Soft Computing*, *87*, 105992. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105992>
- Sasikumar, P., & Kannan, G. (2008a). Issues in reverse supply chains, part I: End-of-life product recovery and inventory management - an overview. *International Journal of Sustainable Engineering*, *1*(3), 154–172. <https://doi.org/10.1080/19397030802433860>
- Sasikumar, P., & Kannan, G. (2008b). Issues in reverse supply chains, part II: Reverse distribution issues - an overview. *International Journal of Sustainable Engineering*, *1*(4), 234–249. <https://doi.org/10.1080/19397030802509974>
- Schaffel, S. B., & La Rovere, E. L. (2010). The quest for eco-social efficiency in biofuels production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *18*(16–17), 1663–1670. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.031>
- Serageldin, I., & Steer, A. (1994). Making development sustainable: from concepts to action. In *Making development sustainable: from concepts to action*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85041151110&partnerID=40&md5=e7bb7fe34d6c61fd78bf0acf58238f88>
- Seuring, S., & Gold, S. (2012). Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. *Supply Chain Management*, *17*(5), 544–555. <https://doi.org/10.1108/13598541211258609>
- Seuring, Stefan, & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, *16*(15), 1699–1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>
- Shanmugam, S., Hari, A., Kumar, D., Rajendran, K., Mathimani, T., Atabani, A. E., Brindhadevi, K., & Pugazhendhi, A. (2021). Recent developments and strategies in genome engineering and

- integrated fermentation approaches for biobutanol production from microalgae. *Fuel*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119052>
- Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C. L., & Khanchi, A. (2013). Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24(0), 608–627. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.049>
- Singh, A. R., Mishra, P. K., Jain, R., & Khurana, M. K. (2012). Design of global supply chain network with operational risks. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(1–4), 273–290. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3615-9>
- Tavakkoli-Moghaddam, R., & Razi, Z. (2016). A New Bi-Objective Location-Routing-Inventory Problem with Fuzzy Demands. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1116–1121. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2016.07.646>
- Tavana, M., Abtahi, A.-R., Di Caprio, D., Hashemi, R., & Yousefi-Zenouz, R. (2018). An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 64, 21 – 37. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2017.12.004>
- Tavana, M., Tohidi, H., Alimohammadi, M., & Lesansalmasi, R. (2021). A location-inventory-routing model for green supply chains with low-carbon emissions under uncertainty. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50636 – 50648. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13815-8>
- Triana, C. F., Quintero, J. A., Agudelo, R. A., Cardona, C. A., & Higuera, J. C. (2011). Analysis of coffee cut-stems (CCS) as raw material for fuel ethanol production. *Energy*, 36(7), 4182–4190. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.025>
- Valderrama, C. V., Santibañez-González, E., Pimentel, B., Candia-Véjar, A., & Canales-Bustos, L. (2020). Designing an environmental supply chain network in the mining industry to reduce carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 119688.
- Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2020). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega (United Kingdom)*, 91. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.001>
- Waltho, C., Elhedhli, S., & Gzara, F. (2019). Green supply chain network design: A review focused on policy adoption and emission quantification. *International Journal of Production Economics*, 208, 305–318. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.12.003>
- Williams, P. R. D., Inman, D., Aden, A., & Heath, G. A. (2009). Environmental and sustainability factors associated with next-generation biofuels in the U.S.: What do we really know? *Environmental Science and Technology*, 43(13), 4763–4775.

- <https://doi.org/10.1021/es900250d>
- Wu, W., Zhou, W., Lin, Y., Xie, Y., & Jin, W. (2021). A hybrid metaheuristic algorithm for location inventory routing problem with time windows and fuel consumption. *Expert Systems with Applications*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114034>
- Yaghoubi, A., & Akrami, F. (2019). Proposing a new model for location - routing problem of perishable raw material suppliers with using meta-heuristic algorithms. *Heliyon*, 5(12), e03020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03020>
- Yao, X., & Askin, R. (2019). Review of supply chain configuration and design decision-making for new product. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2226–2246. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1567954>
- Yuchi, Q., Wang, N., He, Z., & Chen, H. (2021). Hybrid heuristic for the location-inventory-routing problem in closed-loop supply chain. *International Transactions in Operational Research*, 28(3), 1265 – 1295. <https://doi.org/10.1111/itor.12621>
- Zandkarimkhani, S., Mina, H., Biuki, M., & Govindan, K. (2020). A chance constrained fuzzy goal programming approach for perishable pharmaceutical supply chain network design. *Annals of Operations Research*, 295(1), 425 – 452. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03677-7>
- Zeleny, M. (1973). Compromise programming, multiple criteria decision-making. *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina Press, Columbia, 263–301.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182–214. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.02.011>
- Zhang, Y., Qi, M., Miao, L., & Liu, E. (2014). Hybrid metaheuristic solutions to inventory location routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70(1), 305–323. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.07.010>
- Zhao, J., & Ke, G. Y. (2017). Incorporating inventory risks in location-routing models for explosive waste management. *International Journal of Production Economics*, 193, 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.07.001>
- Zhao, X., Ke, Y., Zuo, J., Xiong, W., & Wu, P. (2020). Evaluation of sustainable transport research in 2000 e 2019. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120404. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120404>
- Zheng, X., Yin, M., & Zhang, Y. (2019). Integrated optimization of location, inventory and routing in supply chain network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 121, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.003>