



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desempeño sostenible en el diseño y gestión de cadenas de abastecimiento bajo condiciones de incertidumbre. Aplicación a la producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar

Jimmy Alexander Carvajal Beltrán

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y arquitectura
Manizales, Colombia
2022

Desempeño sostenible en el diseño y gestión de cadenas de abastecimiento bajo condiciones de incertidumbre. Aplicación a la producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar

Jimmy Alexander Carvajal Beltrán

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título:
Doctor en Ingeniería -Industria y Organizaciones-

Director

Dr-Ing. William Sarache. Universidad Nacional de Colombia

Codirector:

Dr-Ing. Yasel Costa. MIT- Zaragoza Logistic Center

Línea de Investigación:

Métodos y modelos de optimización y estadística en ingeniería industrial y administrativa

Grupo de Investigación:

Innovación y Desarrollo Tecnológico

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia
2022

El esfuerzo continuo, no la fuerza o inteligencia, es la llave para desatar nuestro potencial

-Winston Churchill

A Dios, por la vida que me ha dado; a mi esposa, por su paciencia, tolerancia y su amor; a mis hijos Miguel Ángel y Macarena, esto es gracias a ustedes, fueron mi fuente de inspiración y mi motivación constante.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la energía y fuerza para afrontar los retos del doctorado, que han sido muchos y muy diversos, desde lo académico, familiar y personal. Este camino ha sido transformador, me ha enseñado a ser mejor alumno, mejor investigador, mejor padre, mejor persona.

Estoy muy agradecido con mi tutor, Profesor William Sarache, quien me ha guiado por un sendero de enseñanza y crecimiento personal. Agradezco especialmente su paciencia y el apoyo constante, así como, la disciplina y retroalimentación. Así mismo, agradezco a mi cotutor, el profesor Yasel Costa, quien compartió conmigo sus conocimientos y experiencias, así como sus palabras de aliento, a darme fuerza para cumplir las metas.

A la Universidad Nacional de Colombia, porque me apoyó ofreciéndome excelentes profesores, infraestructura y recursos financieros y un sin número de vivencias y experiencias que me permitieron avanzar en mi proceso doctoral.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e innovación que financió mi doctorado por medio del crédito condonable de la convocatoria 757 de 2016.

A las dos instituciones que me permitieron conocer otras culturas, compartir mis ideas y aprender de la mano de los mejores, Eindhoven University of Technology y Zaragoza Logistics Center.

A mis compañeros del grupo de investigación, quienes me han motivado, con quienes me he reído y, también, nos hemos angustiado juntos, ya sea por una entrega o porque nos toca hacer la presentación de resultados.

Finalmente, agradezco a mi esposa quien me acompañó, me motivó y me impulsó a seguir adelante. A mi hijo Miguel Ángel, quien compitió por mi tiempo con la tesis durante gran parte de su vida. A mi hija Macarena, ese regalo que me dio Dios justo cuando ya estaba terminando esta tesis doctoral.

Resumen

Desempeño sostenible en el diseño y gestión de cadenas de abastecimiento bajo condiciones de incertidumbre. Aplicación a la producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar

La producción de biocombustibles forma parte de las estrategias mundiales para la mitigación del calentamiento global, al buscar la reducción de las emisiones generadas por el consumo indiscriminado de combustible fósil. En ese sentido, se logró identificar en la literatura que, desde el punto de vista del diseño de cadenas de abastecimiento, la producción de biocombustibles ha sido poco estudiada, y en menor proporción, cuando se involucra la modelación matemática del componente agrícola. Esta cadena plantea sus propios retos, en términos del diseño, operación, integración de actores y fuentes de incertidumbre, las cuales afectan los sistemas biológicos y logísticos. Tales particularidades afectan también la factibilidad de la inversión a largo plazo, no solo desde la perspectiva económica, sino también, desde la dimensión social y ambiental.

Basado en lo anterior, la situación problemática abordada en esta tesis doctoral se enmarca en la escasez de modelos de optimización para apoyar las decisiones de diseño y gestión de operaciones de la cadena de abastecimiento para la producción de biocombustible a partir de la caña de azúcar, que simultáneamente consideren el desempeño sostenible como criterio de evaluación y la vulnerabilidad de las decisiones frente a fuentes de incertidumbre. De acuerdo con el estado del arte, esta brecha de conocimiento es reconocida como un problema científico que requiere ser abordado y solucionado. Por lo tanto, la presente tesis doctoral propone una solución desde el enfoque cuantitativo, propio de la investigación de operaciones, a través del diseño y validación de un modelo de optimización multiobjetivo con parámetros estocásticos.

El modelo integra las decisiones de diseño de la cadena de abastecimiento desde la perspectiva sostenible, considerando al eslabón agrícola y a la biorefinería. Además, se modelan las operaciones agrícolas propias de la producción de biomasa, la afectación de fuentes de incertidumbre sobre el rendimiento de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha, ambos aspectos asociados con las condiciones climáticas. En ese sentido, esta tesis contribuye al estado del arte con un modelo estocástico, multi-periodo, que involucra las decisiones de diseño y gestión para múltiples actores, desde la perspectiva sostenible buscando un equilibrio entre: 1) el desempeño económico, por medio del valor económico agregado para los accionistas; 2) el social, compuesto por la distribución justa de los beneficios entre los eslabones de la cadena, la reducción de la huella de tierra, y la creación de puestos de trabajo; y 3) la minimización de los impactos ambientales ocasionados durante la producción de biomasa, el transporte de caña y la producción de biocombustible.

El modelo fue aplicado en la evaluación de un proyecto de inversión en biocombustibles a partir de la caña azúcar en una nueva zona de expansión agrícola en Colombia. Este caso exhibió problemas de dimensión; sin embargo, el enfoque de modelamiento permitió enfrentar la complejidad computacional, a través de la implementación de una cadena de Markov para simular escenarios correlacionados de las fuentes de incertidumbre para instancias reales, al igual que implementar un modelo de programación lineal, omitiendo el uso de variables enteras o binarias. Los resultados demostraron la factibilidad del diseño de la cadena de abastecimiento y, además, se identificaron un conjunto de factores, tales como: el rendimiento del cultivo, el retraso de la construcción de la biorefinería, el precio de comercialización de caña de azúcar, la distancia entre las fincas y la industria, entre otros, como variables que influyen en el diseño de la cadena y su desempeño.

Palabras clave: Cadenas de abastecimiento, programación estocástica de dos etapas, cadenas de Markov, optimización multi-objetivo, biocombustibles, caña de azúcar, desempeño sostenible, distribución justa del beneficio.

Abstract

Designing supply chain under uncertain conditions from sustainable performance perspective. An application at sugarcane based biofuel production

The production of biofuels is part of the world strategies for the mitigation of global warming, seeking to reduce emissions generated by the indiscriminate consumption of fossil fuels. In this sense, it was possible to identify in the literature that biofuel production, from the point of view of the supply chain, has been scarcely studied, and minor, in instances that agricultural echelon is involved. This supply chain poses relevant challenges, in terms of design, manage, integration of actors and sources of uncertainty, which affect biological (biomass production) and logistical systems. Such particularities also lead the long term investment feasibility, not only from the economic point of view, but also from the social and environmental dimension.

Based on the above, the problematic situation addressed in this doctoral thesis is framed in the absence of optimization models to support design and operations management decisions in the sugarcane-based biofuel supply chain, simultaneously considering sustainable performance as an evaluation criterion and the vulnerability of decisions in the face of uncertainty sources. The problem was verified in the state-of-the-art evidencing that it is recognized as a scientific problem that needs to be addressed and solved. Consequently, this doctoral thesis proposes a solution from the quantitative approach, typical of operation research discipline, through design and validation of a multi-objective optimization model with stochastic parameters.

The model integrates the design decisions of the supply chain considering the sustainable performance, integrating both, agricultural (supplier) and production stages (biorefinery). Additionally, it includes the modeling of the agricultural operations involved in biomass production, as well as the impact of sources of uncertainty on crop yields and the length of harvest season, both aspects associated and affected by weather conditions. In that sense, this thesis contributes to the state of the art with a multi-period, stochastic model, involving design and management decisions for multiple actors of agricultural and industrial echelons, from sustainable perspective seeking a balance between: economic performance, through economic value added for shareholders; social performance, composed by fairness profit distribution, reducing land footprint, and incenting the job creation; and reducing environmental impacts caused during biomass production, sugarcane transportation and biofuel production phases.

The model was proven in case of study related with the assessment of a sugarcane-based biofuel investment project in a new agricultural expansion zone in Colombia. This case exhibited dimensional problems; however, the modeling approach allowed facing the computational complexity, through the implementation of a Markov chain to simulate correlated scenarios for real instances, as well as implementing a linear programming model, omitting the use of integer or binary variables. The results demonstrated a feasible design from a sustainable perspective. On the other hand, through a sensitivity analysis, a set of factors were identified, such as: crop yield, delay in the biorefinery construction process, sugarcane trade price, distance among farms and industry, and so on, as variables that influence the design and its performance.

Keywords: Supply chains, two-stage stochastic programming, Markov chains, multi-objective optimization, biofuels, sugarcane, sustainable performance, fair profit distribution.

Contenido

Introducción	1
1. Capítulo 1. Marco teórico y contextual de la investigación	10
1.1. Marco conceptual	11
1.1.1. Diseño y gestión de las cadenas de abastecimiento	11
1.1.2. Las cadenas de abastecimiento de biocombustibles	12
1.1.3. Desempeño Sostenible en la SC	16
1.1.4. Condiciones de Incertidumbre en la SC	20
1.1.5. Enfoques de solución	21
1.2. Marco Contextual: cadenas de abastecimiento de los biocombustibles a partir de caña azúcar 24	
1.2.1. Decisiones estratégicas y tácticas en las SBSC	27
1.2.2. La incertidumbre y su efecto en el desempeño de la SBSC	29
1.2.3. El desempeño sostenible en las SBSC	30
1.2.4. La SBSC en Colombia	32
1.3. Estado del Arte	37
1.3.1. Integración de decisiones en la ASC de la caña de azúcar	39
1.3.2. Integración de operaciones en la SBSC	40
1.3.3. Fuentes de incertidumbre en la ASC de la caña de azúcar y las SBSC.....	41
1.3.4. Perspectiva sostenible en las ASC en la caña de azúcar.....	43
1.3.5. SBSC sostenibles considerando los efectos de la incertidumbre	46
1.4. Conclusiones parciales e identificación de vacíos de conocimiento	47
2. Capítulo 2. Formulación matemática del problema.....	49
2.1. Modelo conceptual propuesto para abordar el diseño y gestión de operaciones de la SBSC. 50	
2.1.1. Definición del alcance del sistema	51
2.1.2. Modelo conceptual y su relación con los modelos matemáticos propuestos.....	55
2.2. Modelos matemáticos	59
2.2.1. Modelo agrícola (MAG).....	60
2.2.2. Modelo Agrícola y BR VPN (MABV)	65
2.2.3. Modelo agrícola y BR EVA (MABE).	69
2.2.4. Multi-actor modelo agrícola BR EVA (M-MAB)	70
2.2.5. Multi-actor anual modelo agrícola BR EVA (MA-MAB)	73
2.3. Conclusiones Parciales	79

3.	Capítulo 3. Resultados	81
3.1.	Descripción general del caso de estudio.....	81
3.2.	Resultados del modelo del eslabón agrícola MAg.....	86
3.3.	Refinación del desempeño económico de la SBSC	92
3.4.	Complejidad de los modelos M-MAB y MA-MAB	98
3.5.	Desempeño sostenible en la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar	102
3.5.1.	Definición de niveles de importancia de los indicadores sociales, su desempeño estandarizado y sus límites extremos	103
3.5.2.	Resultados del desempeño ambiental	106
3.5.3.	Integración de las dimensiones de la sostenibilidad para la SBSC en un enfoque multi-objetivo	109
3.6.	Análisis de sensibilidad sobre el diseño y gestión de la SBSC	113
3.6.1.	Análisis de sensibilidad sobre la adaptabilidad del cultivo y retrasos en la construcción de la biorefinería.....	114
3.6.2.	Análisis de sensibilidad sobre la disponibilidad de equipo agrícola para siembra y cosecha	117
3.6.3.	Análisis de sensibilidad del precio venta de la caña de azúcar y el costo de adquisición de la tierra	119
3.6.4.	Análisis de sensibilidad de la distancia sobre el desempeño sostenible	122
3.6.5.	Análisis de sensibilidad del precio de caña de azúcar en el desempeño sostenible	126
3.7.	Discusión de los resultados	130
3.8.	Conclusiones Parciales	135
4.	Conclusiones finales y recomendaciones	137
4.1.	Conclusiones finales.....	137
4.2.	Recomendaciones.....	139
5.	Producción científica derivada de la investigación	142
6.	Referencias	144
Anexo A.	Revisión de literatura. Nivel de integración de decisiones y operaciones de la SC de la caña de azúcar basado en la revisión de literatura implementada	163
Anexo B.	Revisión de literatura. Artículos que abordan la incertidumbre en la SC de la caña de azúcar y biocombustibles.....	167
Anexo C.	Información relacionada con los modelos de Optimización. Conjuntos utilizados en el modelo MAg.....	169
Anexo D.	Información relacionada con los modelos de Optimización Parámetros utilizados en el MAg	170
Anexo E.	Información relacionada con los modelos de Optimización Variables de decisión	

utilizados en el modelo MAg.....	171
Anexo F. Información relacionada con los modelos de Optimización. Parámetros utilizados en la MABV y MABE.....	172
Anexo G. Información relacionada con los modelos de Optimización. Variables de decisión utilizadas en los modelos MABV y MABE	174

Lista de Figuras

Figura 1-1 Hilo conductor del marco teórico y contextual para el estudio de las SBSC	10
Figura 1-2 Estructura general de la cadena de abastecimiento del biocombustible (bioetanol) a partir de la caña de azúcar	25
Figura 1-3 Diagrama de transición del ciclo de vida del cultivo de caña de azúcar en función de las operaciones agrícolas.....	26
Figura 1-4 Rendimiento del cultivo de caña de azúcar por cada soca del desarrollo del cultivo	27
Figura 1-5 Jerarquía de decisiones de la SBSC	28
Figura 1-6 Fuentes de incertidumbre en las SBSC.....	29
Figura 1-7. Desempeño sostenible en la SBSC en sus dimensiones económico, ambiental y social	32
Figura 1-8 Producción e importación de bioetanol en Colombia	33
Figura 1-9 Estructuración de las ecuaciones de búsqueda basados en los componentes	38
Figura 1-10 Tendencia de publicaciones en torno al tema de las SC de la caña de azúcar y biocombustibles	38
Figura 1-11 Relación de artículos que estudian la jerarquía de decisiones y las operaciones de la cadena de abastecimiento de la caña de azúcar	39
Figura 1-12 Enfoque de desempeño sostenible en la cadena de suministro de la caña de azúcar y los biocombustibles.....	43
Figura 1-13 Distribución de los indicadores económicos abordados en al SBSC y las ASC de caña azúcar	44
Figura 2-1 Cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de caña de azúcar	49
Figura 2-2 Proceso metodológico de investigación propuesto.....	50
Figura 2-3 Fases del horizonte de planeación considerada en el diseño de la SBSC	52
Figura 2-4 : Estructura del desempeño social y la relación con los grupos sociales de la SBSC	54
Figura 2-5 Modelo conceptual para solucionar el problema de diseño y gestión de la SBSC desde la perspectiva sostenible, considerando las condiciones climáticas como fuente de incertidumbre..	56
Figura 2-6 Factores relevantes que inciden en el diseño y operación de la SBSC y su relación con los modelos computacionales propuestos.	59
Figura 2-7 Esquema del modelo matemático del eslabón agrícola de la SBSC.....	60
Figura 2-8 Decisiones de primera y segunda etapa para el modelo TSSP sobre el diseño de la SBSC	62
Figura 2-9 Esquema conceptual del modelo matemático M-MAB	71
Figura 2-10 Esquema conceptual del modelo matemático MA-MAB	74
Figura 3-1 Regiones y sus potenciales áreas de expansión agrícola con el fin de producir biocombustibles (etanol a partir de caña de azúcar).....	81
Figura 3-2 Grafo de transición entre los estados de la cadena de Markov que modela la incertidumbre generada por las condiciones climáticas.....	85
Figura 3-3 estimación del tamaño de la muestra de los escenarios por medio de la metodología SAA	87
Figura 3-4 Estimación del valor esperado de la información perfecta <i>EVPI</i>	88
Figura 3-5 Nivel de producción de la BR al optimizar el modelo MAg en sus decisiones estratégicas y tácticas.....	89
Figura 3-6 Planes de siembra y cosecha para el desarrollo del cultivo en el MAg	90
Figura 3-7 Plan de adquisición de tierras para el desarrollo del cultivo	91
Figura 3-8 Análisis de los componentes del flujo de caja neto	91
Figura 3-9 Niveles de producción de la BR para cada uno de los modelos.....	93

Figura 3-10 Comparativo de las operaciones agrícolas para los modelos evaluados.....	94
Figura 3-11 Estrategias de adquisición de tierras para los modelos evaluados	94
Figura 3-12 Fuentes de financiación de las inversiones necesarias en el diseño SBSC para los modelos MABE y MABV	95
Figura 3-13 Tasas de rentabilidad respecto a la inversión total (ROA) y respecto a la inversión de los accionistas (ROE)	96
Figura 3-14 VPN de la utilidad neta desagregado para los eslabones fincas y BR en los modelos MABE y MABV	97
Figura 3-15 Diseño de la SBSC considerando múltiples fincas. Decisiones de localización de fincas y asignación de cultivos.	101
Figura 3-16 Nivel de producción de la BR versus tamaño de cultivo para cada finca asignada	102
Figura 3-17. Desempeño de los factores que componen el indicador social para el diseño de la SBSC considerando el FDP y la huella de tierra.....	104
Figura 3-18 Desempeño de los factores que componen el indicador social para el diseño de la SBSC, considerando el FPD y la creación de empleo.....	104
Figura 3-19 : Desempeño Social Agregado.....	106
Figura 3-20. Soluciones no dominadas (frontera de Pareto) para el Desempeño ambiental y económico.....	108
Figura 3-21 Desempeño de las categorías de impactos ambientales analizadas en el diseño de la SBSC. Comportamiento frente a las dimensiones económicas y ambientales	108
Figura 3-22 Desempeño sostenible en el diseño de la cadena de abastecimiento de los Biocombustibles.....	110
Figura 3-23 Categorías del desempeño social sobre la dimensión económica y ambiental	111
Figura 3-24 Diseño de las SBSC y su relación con los desempeño sostenible en sus dimensiones social y económico	112
Figura 3-25 Diseño de las SBSC y su relación con los desempeño sostenible en sus dimensiones ambiental y económico.....	113
Figura 3-26 Escenarios de curvas de adaptabilidad del cultivo durante el horizonte de planeación	114
Figura 3-27 Influencia de la curva de adaptabilidad del cultivo e inicio de operaciones de la biorefinería sobre el desempeño económico del eslabón agrícola de la SBSC.....	115
Figura 3-28 Influencia de la curva de adaptabilidad del cultivo e inicio de operaciones de la biorefinería sobre el esquema de adquisición de tierras para el desarrollo del cultivo.....	116
Figura 3-29 Influencia de la curva de adaptabilidad del cultivo e inicio de operaciones de la BR en el diseño y gestión de la SBSC.....	117
Figura 3-30 Sensibilidad sobre los frentes de cosecha y siembra durante el desarrollo agrícola ..	118
Figura 3-31 Influencia de la maquinaria agrícola en el diseño y gestión de la SBSC.....	118
Figura 3-32 Escenarios de costo de compra de terrenos modelados por medio del crecimiento logístico	119
Figura 3-33 Escenarios de precios de caña de azúcar basados en los precios históricos del etanol	120
Figura 3-34 Sensibilidad sobre los precios de la caña de azúcar y del costo de adquisición de tierras	121
Figura 3-35 Influencia sobre el tamaño del cultivo de los cambios sobre los precios de la caña de azúcar y del costo de adquisición de tierras	121
Figura 3-36 Influencia de la distancia en el desempeño sostenible. Desagregando el desempeño social.....	123
Figura 3-37 Influencia de la distancia en las decisiones de diseño y gestión de la SBSC y su	

desempeño sostenible.....	124
Figura 3-38 Influencia del precio de caña en el desempeño sostenible. Desagregando el desempeño social.....	126
Figura 3-39 Influencia del precio de caña de azúcar en las decisiones de diseño y gestión de la SBSC y su desempeño sostenible.....	129
Figura 3-40 Combinación de decisiones estratégicas y tácticas en el diseño y gestión de operaciones de la SBSC optimizando el desempeño sostenible bajo condiciones de incertidumbre.....	133

Lista de Tablas

Tabla 1-1 Componentes utilizados en las ecuaciones de búsqueda.....	37
Tabla 2-1 Modelos computacionales generados a partir del modelo conceptual.....	58
Tabla 3-1 Fuentes de información usadas en el proceso de estructuración del caso de estudio	86
Tabla 3-2 Resumen de resultados del modelo MAg.....	92
Tabla 3-3 Comparación de los desempeños económicos para cada uno de los modelos considerados.....	95
Tabla 3-4 Inversiones realizadas para los modelos MABE y MABV.....	96
Tabla 3-5 Comparación entre los modelos MABE y MA-MAB, evaluando el desempeño EVA... ..	99
Tabla 3-6 Complejidad de los modelos M-MAB y MA-MAB respecto al número de escenarios estocásticos y número de fincas.....	100
Tabla 3-7 Indicador social, factores usados y niveles de importancia.....	105
Tabla 3-8 Matriz de impactos ambientales unitarios para las operaciones principales de la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar.....	107

Introducción

En los últimos años, uno de los principales problemas que amenaza la supervivencia de la humanidad es el cambio climático. Múltiples organismos internacionales han implementado esfuerzos para tratar de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, principal causante del calentamiento de la atmósfera. Por esta razón, el interés en el desarrollo de la industria de los biocombustibles se ha incrementado, por ser una fuente de energía renovable que resulte económicamente viable, socialmente responsable y amigable con el medio ambiente (Rosa, 2017; UN, 2017). El objetivo es lograr la reducción de emisiones contaminantes provenientes del consumo de combustibles fósiles, dado el crecimiento de las necesidades energéticas en el transporte, la industria, y otras actividades de las sociedades contemporáneas (Ebadian et al., 2020).

Para atender esta problemática han sido consideradas múltiples opciones; entre ellas se destaca la utilización de biomasa como fuente renovable de energía, convirtiéndose en una opción atractiva y efectiva para combatir el calentamiento global, no solo por considerarse un producto renovable, sino también, por la versatilidad de extraer energía aprovechable, tanto en el cultivo, como en los residuos agrícolas, entre otras (Martinez-Hernandez, 2017). En ese sentido, el desarrollo tecnológico alrededor del aprovechamiento de la biomasa para la producción de energía ha venido creciendo, desarrollando nuevos métodos de producción con una variada gama de materias primas, lo cual ofrece beneficios pero también desafíos, no solo desde la dimensión económica, sino también desde las dimensiones ambiental y social (Budzianowski & Postawa, 2016).

Actualmente, existen cuatro tecnologías de producción de biocombustibles: de primera, segunda, tercera y cuarta generación. Respecto al primero, es una tecnología que utiliza como materia prima biomasa con valor alimenticio y alto contenido energético, entre ellas caña de azúcar, maíz, remolacha, entre otros. Las otras tecnologías consideran mayor complejidad en sus procesos, tal como los biocombustibles de segunda generación que involucran el aprovechamiento del contenido lignocelulósico de las materias primas para la refinación del combustible. Con relación a la tercera y cuarta generación, involucran procesos producción a través de algas y micro algas, los cuales han demostrado ser costosos y aun en desarrollo (Joelsson et al., 2016; Zahraee, 2020; Ziolkowska, 2020).

Debido a los mejores resultados en términos de eficiencia, la producción de biocombustibles de primera generación, ha ganado mayor protagonismo a nivel mundial, principalmente a partir de maíz y caña de azúcar (Karp et al., 2021; Scully et al., 2021). En particular, estas materias primas ofrecen un alto contenido energético, un proceso de producción menos complejo y un mayor nivel de maduración tecnológica. Desde la óptica del proceso, la producción de biocombustibles se convierte en una alternativa para combatir el cambio climático en el escenario que su producción logre disminuir la huella ambiental durante el proceso de consumo energético. Por un lado, reduciendo la liberación de gases de efecto invernadero ocasionado por los combustibles fósiles, al ser reemplazado por una fuente renovable de energía que, aunque genera emisiones, durante el proceso de producción agrícola captura CO_2 . Por otro lado, su adecuado sistema de producción debe estar inmerso en un proceso ambientalmente amigable en el aprovechamiento de la biomasa, que tenga preocupación por el desarrollo social de las comunidades rurales, así como, factibilidad económica (Budzianowski & Postawa, 2016; van den Wall Bake et al., 2009).

Aunque la utilización de biomasa parece ser una solución viable para el reemplazo de combustibles

fósiles, este tipo de industria involucra una serie de retos en torno a la complejidad implícita en el diseño de su cadena de abastecimiento y sus efectos en las dimensiones ambiental y social. Desde la perspectiva del diseño de la cadena de abastecimiento, los retos giran en torno a decisiones de tipo estructural tales como: selección de la tecnología, abastecimiento de materia prima, localización de instalaciones, tipo de cosecha y esquemas de transporte (modos, medios, rutas), entre otros. Desde el punto de vista ambiental, el incremento de los cultivos para la producción de biocombustibles genera un impacto importante en el consumo de agua, la ocupación de tierras, la destrucción de vida salvaje y el aumento de contaminación de cuerpos de agua. Por otro lado, la operación logística y las instalaciones de procesamiento consumen combustible y generan emisiones. Aunque la producción de biocombustibles puede generar beneficios sociales tales como la reducción de la migración rural, aumento de ingresos en zonas vulnerables rurales, desarrollo regional y generación de empleo, existen serias preocupaciones respecto a sus efectos en el desplazamiento de cultivos con valor alimenticio y, por tanto, en la seguridad alimentaria (Budzianowski & Postawa, 2016; Sowlati, 2016).

En particular, la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, se ha convertido en una alternativa de alta importancia para los gobiernos y sus políticas orientadas al desarrollo de fuentes alternativas de energía (van Eijck et al., 2014). Sin embargo, las preocupaciones respecto a la seguridad alimentaria, exigen abordar una perspectiva sostenible en diseño y gestión de su cadena de abastecimiento (Alonso-Pippo et al., 2013). La producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, desde el cultivo de biomasa hasta la obtención del producto final, entraña una alta complejidad, no solo en el diseño de la cadena de abastecimiento, al tener que combinar una serie de decisiones estratégicas, sino también en la gestión de operaciones tanto agrícolas como industriales (Higgins et al., 2007; Plà et al., 2014). Aspectos como las condiciones climáticas también influyen en la calidad y el rendimiento de los cultivos, así como su accesibilidad, afectando la continuidad en las operaciones de las biorefinerías (Bezuidenhout & Singels, 2007b; Espinoza-Pérez et al., 2017; Sun et al., 2018).

En la cadena de abastecimientos para la producción de biocombustibles (*BSC, Biofuels Supply Chain*), existe un conjunto de operaciones, procesos y actores. De estos últimos, se identifican claramente los cultivadores de biomasa, los transportadores, los procesadores (biorefinerías) y los centros de mezclado. Dada la diversidad de actores involucrados, el estudio de la BSC involucra múltiples decisiones que abarcan desde la estructura de la red (instalaciones, transporte, inventarios), hasta factores relacionados con el medio ambiente (contaminación de aguas, generación de gases, contaminación de suelos, afectación a zonas silvestres) y afectaciones comunidades circundantes (seguridad alimentaria, empleo, desarrollo económico). En consecuencia, el diseño de la BSC a partir de caña de azúcar debe también ser abordado considerando tales factores, con el fin de equilibrar los intereses de las distintas partes interesadas; esto es, una BSC sostenible (Alonso-Pippo et al., 2013; Budzianowski & Postawa, 2016; Eskandarpour et al., 2015).

Uno de los enfoques más utilizados para abordar el diseño de BSC es a través del modelamiento matemático de las operaciones involucradas (Das et al., 2020). Dicho enfoque también es el más usado para modelar el desempeño sostenible en las cadenas de abastecimiento de diversos tipos (Barbosa-Póvoa et al., 2017; Eskandarpour et al., 2015). Sin embargo, las BSC a partir de biomasa de primera generación, entrañan un alto nivel de complejidad matemática, explicado principalmente por las múltiples fuentes de incertidumbre, al involucrar operaciones agrícolas afectadas por factores no controlables (p.e. el clima), múltiples actores y partes interesadas con objetivos no

comunes y cambios en el mercado, entre otros (Plà et al., 2014; Yue et al., 2014; Zandi Atashbar et al., 2018).

Más aún, dado que las BSC funcionan con el suministro de biomasa vegetal, estas se ubican en el contexto de las denominadas cadenas de abastecimiento agrícola (Ahumada & Villalobos, 2009; Soto-Silva et al., 2016; Zandi Atashbar et al., 2018). En particular, en este tipo de cadenas no resulta fácil la sincronización de operaciones de cultivo con las de producción del biocombustible. En el caso de la BSC a partir de caña de azúcar, el ciclo de vida del cultivo, las condiciones climáticas de la región, los límites difusos entre las decisiones estratégicas y tácticas, y las operaciones de transporte y procesamiento, industriales, entre otras, aumenta aún más la complejidad implícita en su modelación (Zahraee, 2020). Lo anterior con el fin de capturar el desempeño real del sistema y evaluar su factibilidad en las dimensiones del desempeño sostenible.

Adicionalmente, las cadenas de abastecimiento agrícola son afectadas por múltiples aspectos tales como regímenes de lluvia, calidad de suelos, estacionalidad climática, topografía, entre otros, los cuales, al incrementar la variabilidad en los rendimientos de la cosecha, dificultan la caracterización del sistema y la toma de decisiones. En esta vía, Baghalian et al. (2013) identificaron el efecto de las fuentes de incertidumbre en los sistemas agrícolas, incrementando su impacto sobre el desempeño en ambientes de múltiples actores. Borodin et al., (2016) y Kusumastuti et al. (2016) también identificaron la necesidad de involucrar las fuentes de incertidumbre en las cadenas de abastecimiento agrícolas, para facilitar la toma de decisiones en condiciones más realistas. De manera complementaria, Soto-Silva et al., (2016) plantean la importancia de considerar la relación entre el desempeño sostenible y las fuentes de incertidumbre en el diseño de las cadenas de abastecimiento agrícolas.

Colombia no ha sido ajena a la política mundial para combatir el cambio climático. El país tiene establecidas varias estrategias para la producción de biocombustibles; entre ellas, la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar y biodiesel a partir de palma de aceite. Estas estrategias vienen formulándose desde hace dos décadas. Inicialmente por medio de la ley 693 del 2001, se crea el marco normativo y se proponen incentivos para la producción de etanol; de igual manera, por medio de la ley 939 del 2004 se generó el marco jurídico para la producción de biodiesel en Colombia. Particularmente para el caso del bioetanol, en el país la materia prima principal es la caña de azúcar. Aunque existe una industria de caña de azúcar consolidada en el país, ésta se ha enfocado mayormente en la producción de azúcar, en la zona sur-occidente, alrededor del río Cauca, una región con pocas posibilidades de expansión agrícola y que cuenta con 232 mil hectáreas cultivadas con caña (Ramirez, 2021b).

A pesar que la industria de la caña de azúcar produce 394 millones de litros de bioetanol por año, esta cantidad es insuficiente dada una creciente demanda que ha generado la necesidad de importar 252 millones de litros, según datos oficiales de Asocaña para el año 2020 (Ramirez, 2021a). Por esta razón, el Gobierno Nacional promueve nuevas zonas de expansión agrícola, para el desarrollo de la industria de los biocombustibles (Asocaña, 2017). Sin embargo, los proyectos de producción de biocombustibles deben ser diseñados en el marco del desarrollo sostenible, buscando ampliar los cultivos de biomasa en el país para diversificar la canasta energética, pero bajo un sano equilibrio económico, social y de protección al medio ambiente (Ley 1715, Congreso de Colombia, 2014; Conpes 3510, Departamento Nacional de Planeación, 2008).

Por esta vía, el Gobierno Colombiano a través de la política pública (Conpes 3510 del 2008) ha

identificado que, de no adoptarse criterios tecnológicos y ambientales adecuados, pueden ocasionarse impactos negativos al medio ambiente. En ese sentido, el desarrollo de la industria de los biocombustibles debe enmarcarse desde la perspectiva sostenible. Al mismo tiempo, este se constituye como una de las estrategias del país para combatir el calentamiento global, al remplazar el consumo de combustibles fósiles por una fuente renovable de energía y, además, para la seguridad energética del país. Adicionalmente, el gobierno busca contribuir con el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestas por las Naciones Unidas, específicamente en la transformación energética, la seguridad alimentaria, entre otras (Ley 1955, Congreso de Colombia, 2019; Departamento Nacional de Planeación, 2008). Complementariamente, la Política de Ciencia, Tecnología e Innovación se ha alineado con el desarrollo de la industria de biocombustibles, identificándola como área estratégica de investigación (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2019). Por todo lo anterior, abordar la industria de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar desde el enfoque de sostenibilidad es de alta pertinencia para el desarrollo nacional.

A pesar de existir un ambiente propicio para la generación de nuevos proyectos de biocombustibles en el país, solo ha sido posible la expansión de los ingenios azucareros actuales, con la conversión a plantas duales para la producción de etanol, sin involucrar el crecimiento de los cultivos de caña actual. Desde el año 2011, en Colombia solo se tenían planteados dos proyectos de producción en nuevas zonas de expansión agrícola, en el departamento Magdalena y en el Meta, de los cuales solo uno ha podido iniciar producción con un sin número de dificultades (Rojas, 2011; Ramírez, 2021b). Entre los problemas más significativos se encuentran: costos de producción agrícola elevados, bajo rendimiento de los cultivos de caña de azúcar, variabilidades climáticas, largas distancias entre los cultivos y la refinería, retrasos en la construcción de la planta, y falta de sincronización de los periodos de maduración de la caña, la temporada de cosecha y la puesta en marcha de la operación (El Espectador, 2021).

La conducción de investigación científica alrededor del diseño de las BSC a partir de la caña de azúcar desde la perspectiva de sostenibilidad se justifica, desde un enfoque práctico, a través de los siguientes aspectos: 1) con el reconocimiento de la existencia de una problemática alrededor de la baja producción de biocombustibles en el país; 2) con la urgencia por la reducción de la importación de etanol, dado que esto conlleva operaciones que ponen en riesgo la competitividad del sector y efectos negativos al ambiente; 3) por la necesidad de sustituir el consumo de combustibles fósiles; 4) por la existencia de un marco normativo que incentiva el desarrollo de la industria de los biocombustibles en nuevas zonas de expansión agrícola. Además, un enfoque de evaluación de nuevos proyectos de inversión en la industria de biocombustibles es una necesidad a nivel local y global.

Con base en los planteamientos anteriores, es posible identificar varios elementos que componen la situación problemática que ha sido abordada en la presente investigación doctoral, la cual puede ser sintetizada la necesidad de abordar el problema de diseño y gestión de operaciones de nuevos proyectos agroindustriales, orientados a la producción de BSC a partir de caña de azúcar, considerando, no solo las condiciones de incertidumbre que los afectan, sino también la importancia de equilibrar las metas económicas de los inversionistas con las exigencias de tipo ambiental y social que imponen otras partes interesadas. Desde esta perspectiva, aspectos que complejizan el diseño y gestión de las BSC, relacionados con la integración de las decisiones estratégicas y tácticas, la vinculación de las operaciones agrícolas junto a las operaciones industriales, la integración entre los actores relevantes de la cadena (cultivadores y plantas de procesamiento), las condiciones climáticas como fuente de incertidumbre, y las múltiples indicadores de desempeño sostenible,

representan oportunidades de investigación desde la perspectiva de la modelación matemática, en el contexto de las BSC a partir de caña azúcar.

La situación problemática descrita anteriormente, corresponde a un vacío de conocimiento para la literatura especializada. En consecuencia, es posible afirmar que esta tesis doctoral se enfrenta a un problema científico no solo en torno a la complejidad implícita en la modelación matemática para apoyar las decisiones de diseño y gestión de las BSC, sino también en torno a la metodología de solución que debe ser adoptada.

Con base en lo anterior, la pregunta general de investigación se formuló de la siguiente manera:

¿Cómo se deben combinar las decisiones estratégicas y tácticas involucradas en el diseño y gestión de la cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar, de tal manera que se optimice el desempeño sostenible, considerando los efectos de la incertidumbre?

Teniendo en cuenta los ejes estructurantes de la pregunta de investigación (diseño y gestión de la cadena de abastecimiento, desempeño sostenible y fuentes de incertidumbre), así como su relación con el objeto de estudio, se propuso la siguiente hipótesis para guiar la investigación:

Una combinación apropiada de decisiones de diseño y gestión, apoyada en un proceso de modelación matemática que considere la complejidad computacional y la incertidumbre, permitirá optimizar el desempeño de la cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar, en términos de sus dimensiones de sostenibilidad.

En esta hipótesis, se definió como variable independiente la combinación de decisiones estratégicas y tácticas para la cadena de abastecimiento lo cual, dada la complejidad que implica evaluar todas las combinaciones posibles, exige el diseño de un modelo matemático que considere todos los aspectos que afectan la toma de decisiones. Por su parte, la variable dependiente se planteó en términos del desempeño de la cadena de abastecimiento respecto a las dimensiones económica, ambiental y social (perspectiva de sostenibilidad). Finalmente, se involucró una variable moderadora que indica las perturbaciones en dicho desempeño debido a la influencia de las fuentes de incertidumbre presentes en las cadenas agrícolas.

Para dar respuesta al problema de investigación y lograr la comprobación de la hipótesis, se propuso el siguiente objetivo general:

Determinar, a través de modelamiento matemático, la combinación de decisiones estratégicas y tácticas involucradas en el diseño y gestión de la cadena de suministro de biocombustibles a partir de la caña de azúcar, con miras a optimizar el desempeño sostenible, en términos económicos, ambientales y sociales, considerando los efectos de la incertidumbre, y las particularidades de Colombia como caso de estudio.

El problema de investigación se sistematizó a partir de las siguientes sub-preguntas:

1. *¿Cuáles son las operaciones y decisiones estratégicas y tácticas, así como, las medidas de desempeño a considerar en la modelación matemática de la cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de caña de azúcar para facilitar la integración de decisiones desde la perspectiva sostenible?*

2. *¿Cuáles son los aspectos que deben ser considerados para representar la incertidumbre en la modelación matemática de una cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar?*
3. *¿Cómo se debe estructurar la medida de desempeño sostenible, en sus dimensiones económica, ambiental y social, en la modelación matemática que sustente el diseño y gestión de la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar?*
4. *¿Cuáles son los objetivos, variables, parámetros y restricciones que debe incorporar en el modelamiento matemático de las decisiones de diseño y gestión de la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar teniendo en cuenta los efectos de la incertidumbre?*
5. *¿Qué metodología de solución resultaría más apropiada para abordar la complejidad computacional del modelo obtenido?*
6. *¿Cuáles son los factores críticos que afectan la estructura de la cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar, teniendo en cuenta el desempeño sostenible y los efectos de la incertidumbre?*

El objetivo general, en articulación con las subpreguntas de investigación, se desglosó en los siguientes objetivos específicos:

1. *Identificar en el estado del arte los aspectos estructurales del diseño y gestión de la cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar, considerando la integración de decisiones; las fuentes de incertidumbre y las técnicas para manejarla, y los indicadores de desempeño sostenible en sus dimensiones económicas, ambientales y sociales.*
2. *Determinar los objetivos, variables, parámetros y restricciones necesarios para el modelamiento matemático orientado al diseño y gestión de la cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar, considerando los fenómenos de incertidumbre.*
3. *Desarrollar una estrategia de solución que permita ofrecer soluciones en un tiempo razonable dadas las complejidades computacionales que caracterizan los modelos a gran escala.*
4. *Validar el desempeño del modelo propuesto y su estrategia de solución mediante su aplicación y contextualización en un caso de estudio en Colombia.*
5. *Realizar el análisis de sensibilidad sobre los aspectos más relevantes que afectan el desempeño sostenible de la cadena objeto de estudio con miras a evaluar diversos escenarios de decisión y probar la hipótesis de investigación.*

El desarrollo de esta tesis doctoral se enmarca en un paradigma de investigación de carácter cuantitativo, en el dominio de la investigación de operaciones como campo disciplinar, el cual se caracteriza por su enfoque axiomático y normativo. Este enfoque se sustenta en la abstracción de la realidad a través de un modelamiento matemático, identificando variables, elementos y sus relaciones causales con el fin de predecir su desempeño. Adicionalmente, el modelo se aplicó a un caso de estudio como medio para validar la representatividad de la realidad estudiada. Desde el enfoque de investigación utilizado, el modelo propuesto y sus resultados, ofrecen señales, principios y predicciones generalizables sobre la situación problemática antes enunciada.

Esta tesis doctoral también propone un modelo conceptual que involucra los elementos estructurales del problema científico considerado, el cual permitió derivar cinco modelos de programación matemática, cada uno con una intensidad específica. El primero modela el eslabón agrícola, identificando factores relevantes que influyen en el desempeño económico. En el segundo y tercer modelos, se involucran el eslabón agrícola y la biorefinería con el objetivo de encontrar el

indicador que maximiza el valor para los actores de la cadena, desde la perspectiva económica. El cuarto involucra aspectos de distancia y localización de fincas, de una forma más detallada, identificando problemas de complejidad computacional. Finalmente, el quinto modelo, propone una reducción en la dimensión y complejidad computacional, en instancias de dimensión real del caso de estudio, permitiendo involucrar todos los elementos del modelo conceptual propuesto.

El caso de estudio seleccionado corresponde a una nueva zona de expansión agrícola en los llanos orientales de Colombia, en donde se está ejecutando un proyecto de producción de biocombustibles, por lo que fue posible considerar información real y detallada para su construcción. En esta zona se logró identificar la influencia que tienen las condiciones climáticas sobre el rendimiento de los cultivos de caña y la duración de la temporada de cosecha como fuentes de incertidumbre. Para afrontarla, se propone un modelo de cadena de Markov con el fin de representar la realización de las variables aleatorias, de manera correlacionada, durante el horizonte de planificación. La generación de la instancia del caso de estudio, y los modelos matemáticos propuestos fueron codificados en Python 3, por medio del paquete de optimización Gurobi 9. Adicionalmente, se surtieron las fases de verificación y validación de los modelos, por medio de la comparación con el sistema objeto de estudio. Finalmente, con la solución de los modelos validados y la conducción de múltiples experimentos se logró recolectar la suficiente información para comprobar la hipótesis de investigación.

La novedad científica de esta investigación se sustenta en las contribuciones que permiten llenar los vacíos de conocimiento detectados. Los aportes más relevantes de esta tesis doctoral, se resumen de la manera siguiente:

- Un conjunto de modelos de programación estocástica, multi-periodo y multi-objetivo que consideran las decisiones de diseño y gestión de operaciones de la BSC a partir de la caña de azúcar, desde la perspectiva de sostenibilidad, lidiando con su consecuente complejidad computacional.
- Un modelo de cadena de Markov que permite involucrar los efectos de incertidumbre sobre el rendimiento del cultivo de caña de azúcar y la duración de la temporada de cosecha ocasionados por las condiciones climáticas. El modelo fue incorporado desde un enfoque de optimización estocástica basada en escenarios, teniendo en cuenta el eslabón agrícola y la biorefinería.
- Un enfoque de evaluación del desempeño económico a través de la Valor Económico Agregado (EVA) que optimiza las inversiones realizadas por los accionistas de la BSC. Complementariamente, al considerar los flujos económicos en el largo plazo, el EVA ofrece una medida de robustez financiera en armonía con los aspectos técnicos de la BSC en comparación con los enfoques clásicos basados en el Valor Presente Neto (VPN) de la utilidad neta.
- Un modelo que permite la localización de fincas y asignación de cultivos utilizando un enfoque de modelamiento que evita la utilización de variables binarias, reduciendo la complejidad computacional para derivar una solución óptima.
- La medición del desempeño desde la perspectiva sostenible en sus tres dimensiones: económica (EVA); ambiental (LCA y ReCiPe2016) y social (Social-LCA), en un horizonte de largo plazo, considerando técnicas de optimización multi-objetivo.
- Un modelo que involucra la distribución justa de los beneficios económicos entre los actores de la BSC a partir de caña de azúcar, con el fin de garantizar la factibilidad económica de sus miembros en el largo plazo y aportar en la sostenibilidad social de la cadena.
- La identificación de factores críticos para el diseño y gestión de operaciones de la BSC que

inciden en el desempeño (adaptabilidad del cultivo, retraso en la construcción de la biorefinería, cantidad de maquinaria agrícola, precio de caña de azúcar, precio de adquisición de tierras, distancia entre la biorefinería y las fincas).

Con base en lo anterior, el valor teórico de la presente investigación radica en la conceptualización y contextualización de las BSC a partir de caña de azúcar, desde la perspectiva sostenible y las fuentes de incertidumbre. De igual manera, la identificación del estado del arte y el vacío de conocimiento detectado, ofrece un marco de trabajo factible para la conducción de investigación científica alrededor del objeto de estudio. Por otro lado, los resultados permitieron también identificar los factores que mayormente influyen en la factibilidad de un proyecto de inversión en BSC a partir de caña de azúcar, lo cual arroja nuevos elementos a considerar en procesos de modelación que persigan mayor realismo y solidez en la toma de decisiones en el campo del diseño y gestión de cadenas de abastecimiento.

El valor metodológico, se sustenta a través de una herramienta de apoyo a la decisión para la evaluación de proyectos de inversión agroindustriales, el cual se aplicó en el contexto de la producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar. Adicionalmente, esta herramienta puede ser aplicada en otros contextos geográficos, y es extensible a cadenas de abastecimiento en otros sectores económicos. Desde lo metodológico se resalta también la formulación matemática utilizada en los modelos propuestos, lo cual permite: 1) diseñar la BSC a partir de caña de azúcar en un ambiente multi-objetivo y multi-periodo; 2) involucrar el desempeño individual de múltiples actores de la cadena, a lo largo de un periodo de inversión en el cual, de manera simultánea, se ejecuta la construcción de la biorefinería y se desarrollan los cultivos de caña de azúcar; 3) integrar las operaciones agrícolas e industriales bajo los efectos de las fuentes de incertidumbre ocasionadas por las condiciones climáticas; 4) reducir la complejidad computacional evitando el uso de variables binarias y enteras, por medio de la utilización de desigualdades lineales válidas fundamentadas en restricciones del desempeño económico. Finalmente, al enfoque de evaluación de la dimensión social de la sostenibilidad de diversos indicadores, a través de la técnica de programación compromiso, la cual puede ser generalizada a otros contextos de cadenas de abastecimiento.

Finalmente, el valor práctico de la investigación se demuestra en el sentido de la evaluación de la factibilidad desde la perspectiva del desempeño sostenible para el caso de estudio analizado. Los resultados permitieron identificar múltiples factores que inciden en el diseño de la BSC. Por un lado, la evaluación de los aspectos financieros, permite proyectar los niveles de inversión, las necesidades de recursos, y los niveles óptimos de endeudamiento y capitalización, lo cual resulta de valía para inversionistas interesados en este tipo de proyectos. Aunque los resultados evidencian una factibilidad económica a nivel general para la BSC a partir de caña de azúcar, a nivel individual se presenta infactibilidad para el eslabón agrícola. Adicionalmente, los resultados muestran altos niveles de impacto ambiental, y una alta desviación del indicador social, por lo que resulta imperativo la búsqueda de un necesario y sano equilibrio entre las dimensiones del desempeño sostenible.

El valor teórico, metodológico y práctico de esta investigación doctoral, así como las contribuciones científicas aquí declaradas, se reflejan no solo en el contenido del presente documento, sino además en una serie de actividades de difusión de resultados de investigación que se resumen de la siguiente manera: dos artículos científicos publicados y uno sometido a una revista clasificada en el cuartil 1 (Q1) del SJR y en categoría A1 según Minciencias; cuatro ponencias presentadas en eventos nacionales e internacionales, un capítulo de libro y un informe final de pasantía internacional en el

MIT-Zaragoza Logistics Center.

Para su presentación, esta tesis doctoral se ha estructurado de la manera siguiente:

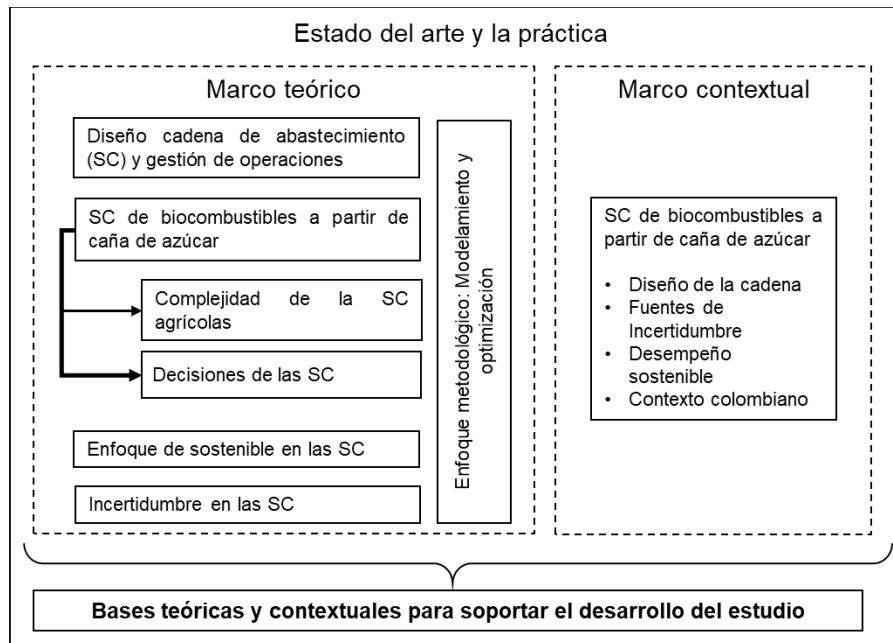
El Capítulo uno corresponde al marco teórico y contextual, en el cual se expone la revisión de conceptos alrededor de la situación problemática, el estado del arte y la declaración del vacío de conocimiento. Seguidamente, en el Capítulo 2, se expone el modelo matemático, en el cual son introducidos los modelos propuestos y la definición del procedimiento de medición del desempeño económico, social y ambiental. En el Capítulo 3 se discuten los resultados obtenidos y sus respectivos análisis de sensibilidad en las dimensiones de sostenibilidad. Aunque en cada uno de los capítulos se presentan conclusiones parciales, en el Capítulo 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones generales de la investigación. Finalmente, se presentan un conjunto de anexos y la bibliografía utilizada en el desarrollo de esta investigación doctoral.

1. Capítulo 1. Marco teórico y contextual de la investigación

En este capítulo se abordan los tópicos principales de la investigación: cadena de suministro de biocombustibles, desempeño sostenible y fuentes de incertidumbre; estos fueron estudiados siguiendo el hilo conductor que se expone en **Figura 1-1**, con la finalidad de ofrecer un marco conceptual y contextual para la investigación. En ese sentido, se presentan los conceptos de diseño y gestión de operaciones de la cadena de abastecimiento (**SC**, *Supply Chains*), en particular las cadenas agrícolas, así como las BSC a partir de la caña de azúcar. Además, se identifican aspectos relevantes del desempeño sostenible presentes en los procesos de toma de decisiones en las SC y algunas fuentes de incertidumbre que afectan su desempeño. Por otro lado, se analizan un conjunto de técnicas de modelación y optimización, las cuales han sido utilizadas para determinar el diseño de las SC. Adicionalmente, se analizan los resultados de la revisión sistemática de literatura con el objetivo de identificar los vacíos de conocimiento que sustentan el problema de investigación científico de esta tesis.

Paralelamente, se llevó a cabo la construcción del marco contextual, el cual compila las características exhibidas por la SBSC, respecto a su alcance, diseño, las fuentes de incertidumbre que influyen en varios puntos de la cadena, y la naturaleza de su desempeño, teniendo en cuenta las dimensiones de la sostenibilidad. Finalmente, se considera el contexto en donde se desarrolla la situación problemática estudiada, contexto colombiano. Este componente del estudio es de suma importancia, pues genera el marco de trabajo y ofrece el punto de partida para la construcción del caso de estudio con el cual se llevó a cabo la fase experimental de la investigación.

Figura 1-1 Hilo conductor del marco teórico y contextual para el estudio de las SBSC



Fuente: Elaboración propia.

1.1. Marco conceptual

Las necesidades de productos y servicios han estimulado la investigación científica y la producción de tecnología para diferentes sectores económicos; al mismo tiempo, y de manera conexas, se ha venido desarrollando el estudio de las cadenas de abastecimiento con el fin de que los productos y/o servicios sean ofrecidos al cliente con calidad y oportunidad, pero con rentabilidad para las compañías. Sin embargo, el medio ambiente y la sociedad últimamente han ganado terreno como dimensiones de desempeño relevantes. En el sector de energético, las cadenas de abastecimiento inician en la producción primaria, ya sea minería o agricultura, pasando por múltiples operaciones intermedias, hasta llegar al cliente final, exhibiendo variados retos respecto a decisiones de inversión inmersas en el diseño de la cadena de abastecimiento.

Para el caso particular de las **BSC**, su estudio implica el análisis de la cadena desde la fuente de materia prima hasta el consumidor final, teniendo en cuenta el cuidado del medio ambiente, la afinidad con el entorno social y su rentabilidad económica; es decir, desde una perspectiva de sostenibilidad. Sin embargo, el contexto en el que se desarrolla la BSC a partir de biomasa vegetal, se enfrenta a múltiples fuentes de incertidumbre tales como, el origen agrícola de la materia prima, la incidencia del clima, la infraestructura rural, las distancias a recorrer y los factores económicos que, entre otros, hacen complejo el proceso de diseño y gestión de la cadena. En este sentido, y desde el punto de vista teórico, se identifican al menos 4 desafíos en el campo de estudio, desde la perspectiva de la modelación matemática: 1) el diseño y gestión de las SC de tipo agroindustrial; 2) el desempeño sostenible; 3) las fuentes de incertidumbre; y 4) los enfoques de solución.

1.1.1. Diseño y gestión de las cadenas de abastecimiento

Las SC se pueden definir como un conjunto de organizaciones inter-relacionadas que ofrecen productos y servicios, involucrando desde los productores de materias primas hasta el consumidor final. En la red de la SC se pueden identificar flujos de materiales, productos, dinero e información, entre un conjunto de actores interconectados, con el objetivo de generar valor para los clientes y demás partes interesadas. Adicionalmente, su nivel de complejidad depende de la naturaleza de las actividades y el número de actores que la componen (CSCMP, 2017; Oliveira et al., 2016).

El estudio de las SC presenta diversas perspectivas; dos de ellas son el diseño de la red (**SCND**, *Supply Chain Network Design*) y la gestión de operaciones. Las decisiones de SCND pertenecen al nivel estratégico de la toma de decisiones; en consecuencia, estas implican inversiones de alto impacto en la supervivencia a largo plazo de la compañía. Entre las decisiones comúnmente abordadas en el SCND se encuentran: la localización, número y capacidad de instalaciones; selección de tecnologías de producción; selección de fuentes de abastecimiento; y selección de modos y medios de transporte, entre otros. Por lo tanto, las decisiones de SCND entrañan un problema combinatorio complejo (Simchi-Levi et al., 2005). Por otro lado, la gestión de operaciones en la SC se enfoca en planificar las actividades, de manera sincronizada entre los actores de la cadena, en horizontes de planeación de mediano (tácticas) y corto plazo (operativas) (Esteso et al., 2018).

Las decisiones de mediano plazo, o de nivel táctico, tienen que ver con la planificación de operaciones de aprovisionamiento, planeación agregada de la producción y planeación de requerimiento de materiales, políticas de revisión de stocks, utilización del almacenamiento y decisiones de distribución como la segmentación de clientes, los modos de transporte, el tamaño de los despachos, así como la tecnología para el seguimiento y ruteo. Por su parte, las decisiones de

corto plazo se relacionan con la programación detallada de la producción, tales como, la secuenciación para el procesamiento de pedidos; selección de pedidos y reaprovisionamiento y la planificación de entregas, en las que se destacan la programación y ruteo de vehículos para distribución de pedidos, entre otras (Caixeta-Filho, 2006; Ballou, 2007; Melo et al., 2009).

Aunque gran parte de la investigación sobre modelamiento matemático se ha concentrado en el problema de SCND, debido a los diversos contextos particulares de aplicación, aún existen múltiples oportunidades por abordar, por lo cual este problema representa un campo de estudio con gran potencial de investigación, particularmente en presencia de condiciones de incertidumbre (Melo et al., 2009; Govindan et al., 2017). Lo anterior, se fundamenta en que el problema de SCND presenta diversidad de características que aumentan su complejidad no solo en la modelación, sino también en su implementación computacional. Entre tales características están: múltiples periodos de planificación, integración entre niveles de decisión (estratégico-táctico-operativo), medidas de desempeño con múltiples objetivos, integración de decisiones y múltiples fuentes de incertidumbre. En particular, se requiere el uso de modelos matemáticos avanzados para encontrar soluciones óptimas en tiempos prudentes (esfuerzo computacional racional) (Baghalian et al., 2013; Hasani & Khosrojerdi, 2016; Govindan et al., 2017).

El problema de SCND ha sido abordado ampliamente en la literatura debido a la importancia de las decisiones estratégicas y su impacto en el desempeño; así como, por la complejidad intrínseca de la combinación de las decisiones estructurales de la cadena. Una de las decisiones más frecuentes en este problema corresponde a la localización de instalaciones, tema en el cual proliferan las contribuciones (Hasani & Khosrojerdi, 2016). Diferentes autores han incluido enfoques multi-periodo en el problema SCND, por la importancia de involucrar la variable tiempo en el proceso de planificación estratégica. Una consecuencia de lo anterior, es el incremento significativo de la complejidad matemática, lo que dificulta encontrar la solución al problema (Longinidis & Georgiadis, 2011; Baghalian et al., 2013; Osmani & Zhang, 2013). Otro aspecto que añade complejidad es la consideración de fuentes de incertidumbre en los coeficientes tecnológicos y/o en la disponibilidad de recursos (*p.e.* demanda, tiempos de transporte, etc.), lo cual exige el uso de técnicas especiales para optimizar el desempeño de la cadena (Longinidis & Georgiadis, 2014; Borodin et al., 2016).

Aunque el problema de SCND implica un alto impacto en la supervivencia a largo plazo de la organización (nivel estratégico), diferentes autores consideran que las decisiones tácticas también influyen en el desempeño de manera significativa; esto se debe a que, por medio de ellas, se asegura el flujo adecuado de materiales para cumplir las metas de desempeño. Sin embargo, integrar las decisiones estratégicas y tácticas en el problema SCND incrementa la dificultad de la modelación y el esfuerzo computacional en el proceso de optimización (Ahumada & Villalobos, 2009; Farahani et al., 2014; Tsolakis et al., 2014; Kusumastuti et al., 2016). En los trabajos de Govindan et al. (2017) y Soto-Silva et al. (2016), se identificó la necesidad de desarrollar investigaciones orientadas a la integración de decisiones estratégicas, tácticas y operativas en el diseño de la cadena de abastecimiento, involucrando, en particular, escenarios de planeación multi-periodo. Lo anterior, bajo la presunción de que la combinación de los niveles de decisión permitirá lograr estructuras de cadena de abastecimiento con mejor desempeño.

1.1.2. Las cadenas de abastecimiento de biocombustibles

Para la producción de biocombustibles, existen cuatro tecnologías de producción, las cuales dependen de la materia prima seleccionada. Los biocombustibles de primera generación se

obtienen de los azúcares y aceites contenidos en la materia prima; en este caso, el biocombustible es obtenido por medio de un proceso tecnológico sencillo usando materias prima provenientes de cultivos alimenticios tales como la caña de azúcar, el maíz, la palma, entre otros (Ghaderi et al., 2016; Joelsson et al., 2016). Los de segunda generación son obtenidos de materias primas sin valor alimenticio, tales como la biomasa lignocelulósica, madera, residuos y subproductos agrícolas. Este tipo de biocombustible requiere un proceso de producción más difícil, dado que deben realizar operaciones adicionales de pretratamiento de la materia prima, con el fin de convertir la celulosa en monómeros de azúcar. Los biocombustibles de tercera generación son producidos a través de algas que son capaces de capturar CO_2 y convertirlo en combustible, aunque tiene múltiples características deseables, desde el punto de vista ambiental son más los beneficios que los impactos al medio (huella ambiental con balance neutral); además, los costos de producción son elevados comparadas con otras fuentes combustible, y difícilmente factibles, económicamente. Por último, los de cuarta generación se obtienen a partir de bacterias genéticamente modificadas para maximizar la captura de CO_2 durante la fase de producción, así como durante la fase de consumo; sin embargo es un tecnología aun en desarrollo (Zahraee, 2020; Ziolkowska, 2020).

Cada tipo de biocombustible requiere una SC particular que depende del tipo de materia prima, de la tecnología utilizada y de su forma de consumo. A manera de ejemplo, la producción de bio-etanol a partir de caña de azúcar, es elaborado a partir de tecnología de primera generación, considerando cultivos dedicados a la producción de caña y su distribución y consumo dependen del tipo de mezcla que se realice con la gasolina. Bajo este escenario, una de las premisas de la cadena es la interdependencia entre la producción de biomasa (materia prima) y el eslabón de producción. Como se mencionó previamente, este tipo de relaciones se han estudiado en la literatura desde la perspectiva de las BSC. En ese sentido, se identifican múltiples procesos en la cadena tales como, la producción de biomasa, la cosecha y recolección, transporte, consolidación, procesamiento, transporte a centros de mezcla, mezclado y distribución (Zandi Atashbar et al., 2018). Sin embargo, luego que el biocombustible inicia su distribución desde la planta de procesamiento, se convierte en un insumo de la SC de combustibles líquidos (Sun et al., 2018). Adicionalmente, se identifican múltiples decisiones en el diseño de las BSC, entre ellas, la localización, capacidad y tipo de tecnología de las plantas de producción (Biorefinerías), así como las decisiones de abastecimiento, asignación de fuentes de materia prima y la selección de múltiples materias primas, las cuales influyen en el tipo de tecnología de procesamiento (Yue et al. 2014).

La BSC presenta múltiples retos a nivel de las decisiones estratégicas y tácticas, debido a que la materia prima se encuentra geográficamente dispersa y está sujeta a las consideraciones temporales de los ciclos de producción agrícola, a los efectos de las condiciones climáticas, y a la interdependencia con otras SC particularmente cuando se utilizan residuos agrícolas y forestales. De estas últimas, más ligadas a los biocombustibles de segunda generación, se le ha dado la importancia a la disponibilidad de la materia prima, pues estas afectan las decisiones de asignación y localización de plantas industriales (Budzianowski & Postawa, 2016; Ghaderi et al., 2016). En los biocombustibles de primera generación es muy importante incluir los ciclos de producción de la materia prima, dado que involucra altas inversiones en un horizonte de tiempo de largo plazo, ciclos de producción largos y múltiples fuentes de incertidumbre, principalmente por la naturaleza biológica; así mismo, se deben considerar la ambigüedad entre las decisiones de inversión y operación de los sistemas agrícolas, así como los dilemas éticos respecto a la seguridad alimentaria y los impactos al medio ambiente (Borodin et al., 2016; Soto-Silva et al., 2016; Yue et al., 2014; Zandi Atashbar et al., 2018).

1.1.2.1. Relación compleja entre las BSC y las cadenas de abastecimiento agrícolas

Dada la conexión de las BSC con el componente agrícola, es posible identificar un conjunto de características que complejizan los procesos de diseño y gestión de la cadena. Entre las más significativas están los aspectos biológicos de la producción de biomasa, los cuales afectan directamente la continuidad de las operaciones en la biorefinería. Por otro lado, las decisiones de la BSC tienen injerencia en varios niveles del horizonte de planificación, en particular las relacionadas con el eslabón agrícola de la producción de biomasa.

Las BSC han sido estudiadas desde la perspectiva del diseño de la red, enfocadas en las decisiones de localización de instalaciones y el establecimiento de los flujos de materiales entre los miembros de la cadena. Sin embargo, muy poco se ha avanzado en las complejidades propias del proceso de producción de la biomasa desde sus implicaciones logísticas (Santibañez-Aguilar et al., 2014; Fattahi & Govindan, 2018). No obstante, algunos autores han manifestado la importancia de avanzar en el estudio de SC cuya materia prima provenga de los campos agrícolas y sus efectos en las operaciones asociadas a la producción (Ahumada & Villalobos, 2009; Lowe & Preckel, 2004; Soto-Silva et al., 2016). Esta perspectiva también aplica para en la producción de biomasa para biocombustibles, pues su obtención es altamente dependiente de la adecuada sincronización entre los cultivos agrícolas y las biorefinerías (Ghaderi et al., 2016; Zandi Atashbar et al., 2018).

En ese sentido, es imperativo estudiar a las BSC a partir de biomasa vegetal desde la perspectiva de una cadena de abastecimiento agrícola (**ASC**, *Agricultural Supply Chain*), el cual, en si mismo, es todo un campo de estudio que ha ganado interés científico y empresarial, debido complejidades intrínsecas, tales como largos tiempos de producción en el eslabón agrícola (Soto-Silva et al., 2017), afectaciones climáticas sobre los cultivos y las operaciones (Valin et al., 2014), variabilidad en la cantidad y calidad de los rendimientos de cosecha (Ahumada et al., 2012), alta perecibilidad y uso de equipo especializado (Bhattacharya, 2006). Por otro lado, el aumento de la demanda de los productos agrícolas para ventas en fresco o como insumos industriales, presiona por mayores avances en investigación (Borodin et al., 2016). En ese sentido, la vinculación de las operaciones agrícolas junto a su industrialización, han incrementado la complejidad de los procesos de planificación, más aun, al considerar sistemas de abastecimiento altamente descentralizado, dispersos geográficamente y afectados por múltiples fuentes de incertidumbre, entre otros.

Desde la perspectiva de una ASC, las SBSC se componen por diferentes operaciones, entre las cuales se destacan el desarrollo de cultivos, cosecha, transporte, procesamiento y distribución (Carvajal et al., 2019). Para el desarrollo de los cultivos se identifican múltiples decisiones, como la determinación del tamaño del cultivo, selección de variedades, planeación de la siembra y el control de fertilización y control de plagas, entre otros. Los cultivos tienen un ciclo de producción largo, el cual es determinado por el nivel de maduración de los productos agrícolas. La siguiente operación es la cosecha, la cual involucra múltiples actividades, tales como el corte o recolección de los productos agrícolas y el transporte hacia el sitio de almacenaje o al punto de procesamiento (Higgins & Muchow, 2003; Colin, 2009; de Oliveira Florentino et al., 2018). La cosecha también involucra múltiples recursos como maquinaria especializada, personal y tiempo (Jena & Poggi, 2013). Otro aspecto relevante corresponde a las condiciones climáticas que influyen en las operaciones, la infraestructura, y los niveles de maduración de los cultivos (Sun et al., 2018). Esta situación que, usualmente se traduce en fuentes de incertidumbre, hace más complejo el proceso de planeación y programación de operaciones de la ASC (Kusumastuti et al., 2016), lo cual aplica perfectamente para el caso de las SBSC.

En la misma vía, el ciclo de vida de los productos agrícolas es una particularidad que aumenta la complejidad de las ASC, y por tanto de las SBSC, en la medida en que limita el tiempo de siembra, cosecha y almacenamiento, y restringe las operaciones de transporte y procesamiento. Por lo anterior, tales operaciones deben estar sincronizadas, pues si se presentan falencias en la planificación, la productividad de la cadena tiende a reducirse. Típicamente, las pérdidas de productividad se miden en términos de calidad y/o cantidad, y se reflejan en reducción de ingresos para los agricultores y en desperdicios que afectan al medio ambiente. En el estudio propuesto por Shukla & Jharkharia (2013), se encontró que el nivel de residuos generados durante las operaciones agrícolas fluctúa entre un 20% y un 60%, lo cual es ocasionado por una débil sincronización entre los actores de la cadena. Particularmente, para el caso de la caña de azúcar, las ventanas de tiempo para la cosecha determinan su nivel de aprovechamiento dado que, si la caña excede su maduración, su proceso de floración reduce los contenidos de azúcar y la calidad de la biomasa para suministrar a la biorefinería. Esta situación genera desperdicios, lo cual es un aspecto determinante en las operaciones de cosecha y suministro (van den Wall Bake et al., 2009; Carvajal et al., 2019).

Adicionalmente, las condiciones climáticas determinan la estacionalidad de las operaciones de siembra y cosecha, lo que representa un incremento adicional en la complejidad de su planificación (Tsolakis et al., 2014). Yue et al. (2014) identificó las dificultades operativas que representan las condiciones climáticas, las cuales someten a las operaciones de siembra y cosecha a unas temporadas ideales y a otras prohibitivas. Estas actividades usualmente se ven afectadas por el incremento de las lluvias, o por fuertes nevadas, o por la variabilidad de los rendimientos de los cultivos por efecto de los niveles de lluvia o radiación solar. Para Sowlati (2016), las condiciones climáticas son una fuente de incertidumbre de alta relevancia en el diseño y gestión de las BSC, imprimiendo mayor nivel de complejidad a los procesos de planificación.

Por otro lado, y como cualquier otra cadena de abastecimiento, los procesos de planificación de las diversas actividades de la SBSC pueden ser clasificados en tres tipos de niveles de decisión, relacionadas con el alcance del horizonte de planificación (Espinoza-Pérez et al., 2017). Desde la perspectiva estratégica se cubren decisiones de largo plazo, en las que sobresale la localización, capacidad y selección de tecnologías para las biorefinerías, así como las fuentes de suministro y su localización. Las decisiones de tipo táctico tienen un efecto a mediano plazo y se relacionan con los planes de suministro, inventario, producción y los sistemas de administración de transporte. Por último, las decisiones operacionales o de corto plazo, se refieren a la ejecución de las actividades misionales de la cadena. De manera complementaria, al asumir la SBSC como una ASC, se añaden un conjunto de decisiones según su nivel jerárquico. A continuación, se presentan algunas de ellas.

- *Decisiones estratégicas:* Localización y compra de terrenos, asignación de cultivos, selección de equipos, selección de tecnología agrícola, planeación financiera de recursos, diseño de la red logística, administración de reservorios, evaluación de cultivos perennes, estrategias de rotación de cultivos, nivel de integración, estrategias de fijación de precios, aseguramiento de la sostenibilidad (Costa et al., 2011; de Oliveira Florentino et al., 2018; Carvajal et al., 2019; de Oliveira Florentino et al., 2020).
- *Decisiones tácticas:* Planeación de cultivos, siembras y cosechas, asignación de cultivos a lotes, distribución de agua, planeación de transporte, planeación de niveles de personal en campo, planeación de operaciones de post-cosecha, administración de equipos, planificación de operaciones logísticas en campo (Bhattacharya, 2006; Caixeta-Filho, 2006; Blanco et al., 2010; Ahumada & Villalobos, 2011; Ahumada et al., 2012; Sahebi et al., 2014).

- *Decisiones operativas*: Secuenciación de operaciones de cosecha, secuenciación y ruteo de maquinaria agrícola, distribución de agua en sistemas de riego, preparación de tierras, transporte y distribución de productos agrícolas, secuenciación de actividades de post-cosecha (Higgins, 2006; Jena & Poggi, 2013; Kittilertpaisan & Pathumnakul, 2017).

Las complejidades adicionales presentes en los sistemas agrícolas, dificultan los procesos de planificación. Por un lado, existe dificultad para establecer límites que separen la jerarquía de decisiones, pues en algunos productos agrícolas las decisiones sobre la siembra inciden a nivel estratégico (inversiones a largo plazo) y táctico dado que involucran ciclos de producción de mediano plazo. Al mismo tiempo, las decisiones de cosecha involucran decisiones tácticas y operativas, relacionadas con las fechas de siembra y los periodos de madurez de los productos agrícolas. Por otro lado, el número de actores presentes en las SBSC y el factor distancia, son considerados aspectos relevantes que afectan la toma de decisiones (Sun et al., 2018).

1.1.3. Desempeño Sostenible en la SC

El consumo excesivo de combustibles fósiles y la utilización de fertilizantes sintéticos han generado una liberación y acumulación exagerada de gases de efecto invernadero en la atmósfera, convirtiéndose en una de las principales causas del calentamiento global y el cambio climático (Martinez-Hernandez, 2017). Desde esta problemática, el diseño y gestión de cadenas de abastecimiento sostenibles (**SSC**, *Sustainable Supply Chains*), se presenta como una alternativa para que la producción de bienes y servicios sea amigable con el medio ambiente, socialmente responsable y financieramente rentable. Esto es, diseñar una SC teniendo en cuenta el cumplimiento de las necesidades actuales, sin comprometer las necesidades futuras (Espinoza-Pérez et al., 2017; Rosa, 2017).

El enfoque de sostenibilidad se presentó por primera vez con la denominada Triple Línea Base (**TBL**, *Triple-Bottom-Line*) propuesta por Elkington (1997). Desde el enfoque TBL, se entiende la sostenibilidad como el equilibrio entre el desempeño económico, ambiental y social. Este enfoque exige considerar, en el diseño y gestión de operaciones de la cadena de abastecimiento, un sano equilibrio entre las metas económicas de los accionistas y los impactos en el medio ambiente y la sociedad (Chen et al., 2018; Maxwell & van der Vorst, 2003; Soysal et al., 2012). En este sentido, se observa una tendencia creciente en el diseño de SSC utilizando enfoques de modelación que enfrentan un mayor nivel de complejidad al tener en cuenta múltiples medidas de desempeño, las cuales generalmente están en conflicto y, en la mayoría de los casos, las decisiones que minimizan los impactos ambientales, afectan la generación de valor económico y social (Reynolds et al., 2014; Giannakis & Papadopoulos, 2016; Budzianowski & Postawa, 2016; Espinoza-Pérez et al., 2017).

El diseño de una SSC implica encontrar la mejor configuración en la cadena de abastecimiento (estrategia de instalaciones, transporte e inventarios) que equilibre las tres metas de desempeño. Respecto a las metas económicas, frecuentemente se considera la reducción de costos o la maximización de utilidades; sin embargo, estas deben lograrse en equilibrio con los impactos ambientales potenciales, tales como la generación de gases de efecto invernadero, el consumo de energía y agua, la polución, etc. Más allá, los objetivos sociales deben buscar un sano equilibrio con los intereses de las comunidades y otras partes interesadas en aspectos tales como la generación y preservación del empleo, la seguridad alimentaria, la calidad de vida, entre otras (Mota et al., 2015).

1.1.3.1. Los tres pilares de la sostenibilidad en la cadena de abastecimiento

Para cada una de las perspectivas de la sostenibilidad se derivan un conjunto de criterios o indicadores representativos. Para la dimensión económica, tradicionalmente, se ha abordado la optimización del costo como principal medida de desempeño; le sigue la optimización de la utilidad; en menor frecuencia, el Valor Presente Neto (VPN) de la utilidad, en este caso, asociado a enfoques de múltiples periodos. También, se han estudiado medidas de riesgo económico y medidas de nivel de servicio (Barbosa-Póvoa et al., 2017; Espinoza-Pérez et al., 2017; Zandi Atashbar et al., 2018). Y en algunos casos específicos, en los que se involucran decisiones de financiación y apalancamiento, el valor económico agregado (EVA, por sus siglas en inglés), es considerado como medida de sostenibilidad financiera (Liu & Papageorgiou, 2018; Longinidis & Georgiadis, 2011; Mohammadi et al., 2017).

Desde la perspectiva ambiental, son múltiples los espacios en los que la operación de una cadena de abastecimiento puede llegar a generar contaminación. Adicionalmente, las fases de diseño de producto y de su sistema de producción determina el nivel de impacto ambiental al cual se puede llegar (Budzianowski & Postawa, 2016). Sumado a lo anterior, se encuentran las presiones que generan los clientes y las comunidades que requieren productos y servicios cada vez más amigables con el medio ambiente, no solo desde la perspectiva del reciclaje y del reúso, sino del impacto que puede llegar a generar de manera colateral, como la contaminación de cuerpos de agua, la contaminación del aire y las afectaciones a la salud humana, entre otras (Maxwell & van der Vorst, 2003; Reynolds et al., 2014; Jaehn, 2016).

Otro aspecto que ha generado una fuerte tensión por el componente ambiental es el avance del calentamiento global, lo que ha impactado fuertemente en el cambio climático, asociado principalmente a las actividades industriales y su consumo de combustibles fósiles (Meza-Palacios et al., 2019). En esa dirección los gobiernos y la comunidad científica buscan desarrollar alternativas para frenar las emisiones de GHG, a través del desarrollo de cadenas de abastecimiento eficientes que reduzcan los impactos ambientales. En ese sentido, se identifican diversas formas de medición de los impactos ambientales de una manera holística, haciendo uso de técnicas que involucren desde la fuente de generación de las materias primas, hasta la disposición final de los productos.

La perspectiva social en las cadenas de abastecimiento es un aspecto que ha sido poco estudiado, en menor proporción desde el enfoque cuantitativo, y recientemente, se han generado algunos avances desde la perspectiva conceptual (Seuring & Müller, 2008; Eizenberg & Jabareen, 2017). Desde la perspectiva cuantitativa del desempeño social, la generación de puestos de trabajo ha sido uno de los indicadores más usados para medir el desempeño en las cadenas de abastecimiento, seguido por condiciones seguras de trabajo, mejores salarios y condiciones de vida (Messmann et al., 2020). Principalmente, esta dimensión se enfoca en el empleado a pesar que desde la perspectiva ontológica la sostenibilidad social implica un marco de trabajo más amplio, reconoce múltiples actores vulnerables de los impactos y sujetos de protección (Bubicz et al., 2019). En esa misma vía, Henao et al. (2021) reafirma la importancia de la dimensión social en las SC, principalmente por las presiones que generan los múltiples grupos que participan en la cadena. En ese sentido, se requiere de enfoques de medición que involucre, de manera integral, los diversos impactos sociales generados en las cadenas de abastecimiento (Mota et al., 2015).

1.1.3.2. Métricas para medir la sostenibilidad

En la evaluación de las dimensiones del enfoque TBL, se han propuesto diversas métricas o medios

equivalentes de medición. Desde el punto de vista económico, múltiples medidas de desempeño pueden ser abordadas, principalmente asociadas al alcance de las decisiones que se involucran en la SC. Para el caso de la dimensión ambiental, la valoración del ciclo de vida de los impactos al medio ambiente (LCA) es uno de los enfoques más utilizados. Así mismo, la extensión de este marco de trabajo para la valoración de los impactos sociales es incluido por el Social-LCA.

Perspectiva económica

Para el caso del desempeño económico, su optimización busca asegurar la capacidad que tiene la cadena de abastecimiento para generar recursos económicos suficientes y, así, permanecer en el mercado en el largo plazo (Jaehn, 2016). El costo representa la principal función objetivo que se ha abordado en la modelación de las SC; respecto a las decisiones de gestión de operaciones, entre muchas, se destacan la definición de planes de transporte, inventario y distribución (Barbosa-Póvoa et al., 2017; Yue et al., 2014). La utilidad neta aparece como una de las métricas comunes al abordar decisiones de diseño de la SC, usualmente involucrando decisiones de capacidad y de localización de instalaciones. La utilidad busca involucrar los costos e ingresos asociados al cubrimiento de la demanda junto con los costos de inversión derivadas por las decisiones de diseño (Jaehn, 2016).

El valor presente neto (VPN) es usualmente abordado cuando se involucran múltiples periodos estratégicos como horizonte de evaluación del diseño de la SC. Este enfoque justifica su aplicación cuando se desea involucrar los costos de las inversiones durante el horizonte de planificación; además, tiene en cuenta los costos e ingresos obtenidos con el diseño de la SC. Adicionalmente, indicadores de riesgo financiero también hacen parte de esta dimensión de desempeño. Sin embargo, algunas métricas de naturaleza no financiera se pueden considerar desde la perspectiva económica, entre ellos los niveles de servicio, y aspectos de calidad de producto y/o proceso.

Perspectiva ambiental y LCA (Life Cycle Assessment)

La medición de la dimensión ambiental en las cadenas de abastecimiento ha involucrado aspectos como el cambio climático, el calentamiento global y los requerimientos de consumidores más preocupados por el medio ambiente. En ese sentido, métricas como los gases de efecto invernadero, el CO₂, CO₂ equivalente (huella de carbono) (Sarkar et al., 2021), así como indicadores más elaborados tales como: el potencial de generación de calentamiento global o GWP, han sido las apuestas por la mitigación de los impactos ambientales. En campos como las cadenas agrícolas, factores como contaminación de agua, consumo excesivo de agua (Huella de agua), el uso de grandes extensiones de tierra (Huella de tierra), la destrucción de la biodiversidad y el desplazamiento de especies nativas han sido tenidas en cuenta en la medición del desempeño ambiental (Rebitzer et al., 2004; Campos-Guzmán et al., 2019).

Desde un punto de vista holístico, el enfoque LCA evalúa los impactos sobre el medio ambiente de todos los eslabones de la cadena de abastecimiento durante el ciclo de vida de un producto. LCA actúa desde la fase inicial de extracción de materias primas hasta la etapa final de disposición y/o reciclaje del producto, o según alcance que sea definido; además, sigue cuatro etapas definidas por las normas ISO 14040 y 14044 (Rebitzer et al., 2004). La primera etapa establece los objetivos principales del estudio; durante la segunda etapa se analiza el inventario de impactos, en el cual son considerados los flujos de productos a lo largo de la SC; la tercera etapa evalúa los impactos en función de todas las emisiones identificadas; y en la cuarta etapa, se realiza la interpretación de resultados de la medición. En las fases iniciales del LCA es muy importante la definición del alcance del sistema que se evalúa, el cual puede ser: *“de la cuna a la tumba” (cradle-to-grave)*, *“de la cuna*

a la puerta” (*cradle-to-gate*), o “puerta a puerta” (*gate-to-gate*), estableciendo qué eslabones de la SC hacen parte del estudio (Campos-Guzmán et al., 2019). En esta misma vía, Khan et al. (2021) coincide en la necesidad de involucrar aspectos que involucren decisiones de diseño de las SSC, desde el punto de vista sistémico, a lo largo de la cadena, y no desde la implementación de prácticas o actividades, ya que no tienen un gran impacto en la sostenibilidad general.

Para la valoración de impactos en LCA, Eskandarpour et al. (2015) ha identificado algunos métodos tales como: Eco-indicator 99 (EI99), Impact2002+, y el ReCiPe. Respecto al EI99, este método incluye 11 impactos que son clasificados en tres categorías de afectación (salud humana, calidad del ecosistema y recursos naturales); esta medida genera una calificación general, apropiada comúnmente para sistemas *cradle-to-gate*. El método Impact2002+ aborda 14 impactos clasificados en cuatro categorías de afectaciones (salud humana, calidad de los ecosistemas, cambio climático, agotamiento de recursos naturales); aquí el resultado final de la evaluación corresponde a la suma de los impactos de todas las unidades funcionales analizadas. Finalmente, ReCiPe tiene 18 grupos de impactos clasificados en 3 categorías de afectación (salud humana, ecosistema, costos de superávit de recursos); este método genera un resultado final que puede ser fácilmente modelado, desde el punto de vista matemático, y es recomendado para realizar la medición y optimización de la perspectiva ambiental, de manera simultánea (Barbosa-Póvoa et al., 2017).

Perspectiva social

Como se mencionó previamente, uno de los indicadores más usados para capturar el desempeño social de una SC es la generación de empleo. Este indicador tiene tres intencionalidades; la primera, sujeta a inversiones de las cuales se deriva la creación de múltiples empleos temporales; la segunda, busca la generación puestos de trabajo directo respecto a la operación recurrente de la SC; y la tercera, corresponde al trabajo indirecto, generado por actividades de soporte de las operaciones (Fattahi & Govindan, 2018). También se han investigado aspectos de seguridad alimentaria en conjunto con la generación de empleo (Santibañez-Aguilar et al., 2014; Fathollahi-Fard et al., 2018; Morales Chavez et al., 2020).

En este sentido, Bubicz et al. (2019) confirma la utilización de estos indicadores en los procesos de toma de decisiones alrededor de las SC desde la perspectiva estratégica, táctica y operativa. Así mismo, Messmann et al., (2020) identifica los indicadores sociales mayormente usados en las SC. El indicador principal es la creación de puestos de trabajo, derivados del desarrollo económico de la región, trabajo seguro, calidad de vida, seguridad y satisfacción del cliente, así como calidad de empleo. Más recientemente, Meemken et al. (2021) identificó a los agricultores como los principales contribuyentes de los esfuerzos por alcanzar la sostenibilidad, aunque no perciben ningún tipo de beneficio por ello, aspecto que no garantiza un comercio justo frente a los actores de la cadena aguas abajo, considerándose un aspecto a ser incluido desde la perspectiva social.

Otra propuesta interesante desde el punto de vista holístico de la evaluación del desempeño social, corresponde al Social-LCA el cual utiliza las mismas etapas del LCA (Benoît et al., 2010). Las categorías son establecidas dependiendo del sistema social que se ve afectado por la SC, entre ellas: empleados, clientes, comunidad local, sociedad general, actores de la cadena (sin incluir los clientes); también, pueden existir indicadores de medición cualitativos y cuantitativos. Este enfoque trata de minimizar el carácter subjetivo de la naturaleza cualitativa de algunas de las categorías evaluadas; sin embargo, se le añade complejidad al proceso de diseño las SC (Kravanja & Čuček, 2013; Brandenburg et al., 2014; Bubicz et al., 2019). Dada la naturaleza multidimensional y

cuantitativa, es necesario establecer un sistema de medición o de puntuación, que permita evaluar la sostenibilidad social, tal como se evidencia en Fathollahi-Fard et al. (2018) quienes por medio de criterios de expertos estiman la ponderación de los impactos (importancia relativa) y la calificación obtenida por la SC. Finalmente, las técnicas de optimización más usadas para abordar la dimensión social, se presentan: Épsilon-restricciones, meta-heurísticas, y técnicas multi-criterio como la programación por metas, lógica difusa, suma ponderada, min-max y lexicográfica (Bubicz et al., 2019).

1.1.4. Condiciones de Incertidumbre en la SC

Diferentes autores señalan que los fenómenos de incertidumbre afectan considerablemente el desempeño de la SC (Bot et al., 2015; Borodin et al., 2016; Govindan et al., 2017; Estes et al., 2018). El fenómeno es atribuido a la incapacidad de capturar toda la información para soportar los procesos de decisión de tipo estratégico, táctico y operativo, lo que dificulta la planeación y control de actividades, y aumenta la complejidad en la modelación del sistema. La incertidumbre en la cadena de abastecimiento se presenta por diversas causas. En primer lugar, se pueden identificar aquellas que son inherentes al sistema, debido a las fluctuaciones en la demanda, el abastecimiento, el transporte y otras operaciones involucradas. En segundo lugar, se pueden enumerar factores externos, tales como cambios en las condiciones climáticas, precios, productos sustitutos, desarrollo de tecnologías, competidores y regulaciones gubernamentales. Finalmente, existen también otras causas relacionadas con las características de la SC tales como: la capacidad variable en las instalaciones, la estructura organizacional y los sistemas de información (Borodin et al., 2016; Osmani & Zhang, 2013).

En el contexto de las ASC, se presentan incertidumbres alrededor de la producción de materias primas, relacionada principalmente con la variabilidad en el rendimiento de los cultivos en términos de calidad y cantidad (Ahumada & Villalobos, 2009). Aspectos relacionados con las condiciones climáticas afectan el desempeño de la red logística de los productos agrícolas (Bezuidenhout & Singels, 2007b; Yue et al., 2014). Así mismo, las ASC están compuestas por un número elevado de cultivadores, muchos de ellos pequeños granjeros con baja tecnificación en sus operaciones, lo cual aumenta la incertidumbre en el suministro de materia prima (Borodin et al., 2016; Cardoso et al., 2015). En caso particular de las BSC, múltiples fuentes de incertidumbre afectan sensiblemente las decisiones de capacidad y de ubicación (Higgins et al., 2007). Adicionalmente, desde la perspectiva metodológica, abordar la BSC es una tarea retadora que complejiza los procesos de toma de decisiones, más aun cuando se involucran las condiciones de incertidumbre en el largo plazo, o sobre decisiones de tipo estratégico que afectan de manera diferente al sistema a lo largo del horizonte de planificación (Borodin et al., 2016; Ghaderi et al., 2016).

Por otro lado, la incertidumbre también se presenta en las actividades de transporte, dado el estado de la infraestructura disponible en diferentes campos agrícolas, la cual depende en gran mayoría del clima. A manera de ejemplo, al presentarse mayor precipitación, la operación de transporte será más ineficiente debido a la inestabilidad del terreno. Las actividades de producción también se verán afectadas por aspectos relativos a la adopción de tecnología, capacitación técnica y actividades de mantenimiento. Así mismo, el fenómeno impacta fuertemente a los precios y la demanda de los productos que, por condiciones de mercado, generan volatilidad en los precios afectando la cadena de manera integral. Además, aspectos gubernamentales afectan los precios de los productos como resultado de políticas públicas de alcance local y/o nacional generando un ambiente de variabilidad en los precios (Bot et al., 2015). A manera de ejemplo, para el caso

colombiano, como el de otros países en vía de desarrollo de la industria, los precios de los biocombustibles son fijados por el gobierno, con el fin de estimular la producción, y puede variar las necesidades de mezcla de etanol y gasolina, la producción interna y la importación, afectando la planificación de la SC en variados escenarios.

Respecto al fenómeno de incertidumbre, Baghalian et al., (2013) sugieren incluir su efecto en el diseño de la SC, el cual se potencializa en ambientes descentralizados, típicos en cadenas de suministro con un número elevado de actores, tal y como sucede en las operaciones agrícolas. Además, Soto-Silva et al., (2016) identificaron la necesidad de involucrar los efectos de la incertidumbre en el diseño de las ASC con el objetivo optimizar el desempeño sostenible y dotar a los interesados de la cadena de herramientas más realistas. Lo anterior, se alinea con un enfoque holístico requerido en el diseño de las BSC, que involucre a los diferentes grupos de interés y equilibre los desempeños en las dimensiones económica, ambiental y social (Borodin et al., 2016).

Respecto a la naturaleza de los parámetros de incertidumbre y su efecto sobre el problema SCND, se pueden identificar algunas técnicas específicas. Respecto a los parámetros de naturaleza continuos, se ha utilizado programación lineal y no lineal acompañada de relajación lagrangiana. Para el caso de la incertidumbre es asociada al cumplimiento de una restricción, el enfoque más utilizado corresponde a la programación probabilística o Chance-constrained programming. Por otro lado, considerando los parámetros discretos se encuentran las metodologías basadas en escenarios. Éstas se componen por la programación estocástica de dos etapas, y de múltiples etapas; aunque son muy buenas aproximaciones para capturar el efecto de la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones, es posible que presente múltiples complicaciones para generar los escenarios correlacionados y, para entornos reales de SCND, la cantidad de escenarios conlleve al aumento de la complejidad computacional (Borodin et al., 2016; Govindan, Fattahi, et al., 2017; Sun et al., 2018).

1.1.5. Enfoques de solución

Los problemas de planificación estratégica y gestión de operaciones de la SC han sido frecuentemente abordados desde la perspectiva cuantitativa de la investigación de operaciones. Por un lado, por la necesidad de optimizar el desempeño de las SC y por otro, debido a la necesidad de relacionar los múltiples elementos que las componen, con el fin de predecir el comportamiento del sistema (Bertrand & Fransoo, 2002). Melo et al. (2009) proponen un marco general para abordar el problema de SCND, a partir de dos enfoques metodológicos: *General solver* y *Specific algorithm*. El primero se trata del uso de software de propósito general de programación matemática, el cual se utiliza directamente programación lineal y métodos de branch and bound (ramificación y acotamiento) para obtener una solución óptima o, por el contrario, desde una aproximación heurística, usualmente referenciadas en la literatura. El segundo enfoque, corresponde a algoritmos diseñados para dar soluciones precisas, usualmente bajo problemas de alta complejidad computacional; entre estos se presentan las técnicas de generación de columnas, branch and cut, métodos de descomposición, meta-heurísticas, heurísticas personalizadas a los problemas abordados, entre otros.

Desde la perspectiva del desempeño sostenible es posible identificar múltiples métodos para dar solución a los modelos de optimización. De cierta manera depende del enfoque de modelamiento de las dimensiones para seleccionar una técnica a utilizar. Usualmente la dimensión económica es abordada desde la función objetivo, dándole una mayor priorización a ésta (Jaehn, 2016; Henao

et al., 2019). Frecuentemente, las dimensiones sociales y ambientales son involucradas desde las restricciones imponiendo límites mínimos y máximos a los impactos de ambas dimensiones; bajo ese escenario, los modelos propuestos exhiben una función objetivo económica sujetos a establecimiento de límites a los impactos sociales y ambientales. En este tipo de enfoques sobresalen las metodologías como: programación lineal, programación por metas, min-max, lexicográficas (Eskandarpour et al., 2015).

Por otro lado, cuando las dimensiones de sostenibilidad son abordadas por medio de funciones objetivo, se presentan variadas técnicas (Barbosa-Póvoa et al., 2017). La suma ponderada requiere el establecimiento de pesos relativos para cada uno de las funciones objetivos y realiza una búsqueda iterativa de la frontera de Pareto. El método Épsilon-restricciones, permite construir de una manera más objetiva la frontera de Pareto; inicialmente, se obtienen soluciones óptimas para cada una de las funciones objetivo, luego una de ellas es seleccionada como objetivo primario, se obtienen saltos para las demás funciones basados en los límites obtenidos y, de manera iterativa, se incluyen las funciones como restricciones desde el límite indeseable hasta el deseable considerando los saltos de manera constante. Respecto a los enfoques meta-heurísticos para modelos multi-objetivo, los más destacados son: algoritmos genéticos (GA), algoritmos meméticos (MA), búsqueda de vecindad variable (VNS), optimización por enjambre de partículas (PSO), en sus versiones multi objetivo. Finalmente, desde el enfoque multi-criterio es posible encontrar métodos tales como el proceso analítico jerárquico (AHP), proceso analítico en red (ANP), Promethee, Electre, Técnica de preferencia de orden de similitud con la solución ideal (TOPSIS), entre otras. (Barbosa-Póvoa et al., 2017; Brandenburg et al., 2014; Fahimnia et al., 2015; Govindan et al., 2017).

Por otro lado, las técnicas de solución dependen, en gran medida, de la complejidad computacional de los modelos de optimización implementados. Por un lado, la complejidad se incrementa en cuando: a) se utilizan variables enteras y binarias; b) se modelan múltiples periodos; c) se utilizan múltiples funciones objetivo; d) se involucran múltiples operaciones de manera simultánea; e) se incluyen múltiples actores en la SC y f) se involucran múltiples escenarios en ambientes de incertidumbre (Brandenburg et al., 2014; Hall et al., 2012; Higgins et al., 2004; Seuring & Müller, 2008). Por tal razón, dependiendo de la complejidad computacional exhibida por el modelo, es posible ir abordando técnicas con el fin de mediar entre el tiempo computacional requerido y la calidad de los resultados. Un marco de trabajo frecuentemente usado es: (1) uso de métodos exactos (programación lineal, MLIP, MINLP) en instancia pequeñas; (2) uso de técnicas de descomposición para estudiar el problema aplicando métodos exactos; (3) utilización de técnicas aproximadas (Castaño et al., 2014; Plà et al., 2014; Hasani & Khosrojerdi, 2016; Castaño et al., 2019).

La complejidad del problema de diseño de las BSC desde la perspectiva de las ASC, exige el uso de modelos de gran dimensión y de gran complejidad computacional. Lo anterior se ha convertido en un reto de investigación, por lo que se han propuesto diversos enfoques de solución y múltiples herramientas para abordar la problemática. En esta vía, Soto-Silva et al., (2016) plantean que la mayoría de los artículos utilizan la programación lineal como enfoque de solución, seguido de la simulación de eventos discretos y, con menor frecuencia, técnicas heurísticas, estocásticas, multi-objetivo. Además, esta problemática coincide con el hecho de que las contribuciones existentes se han enfocado más en decisiones operativas, para uno o dos eslabones de la cadena, usando parámetros determinísticos. Sin embargo, al involucrar fuentes de incertidumbre y decisiones estratégicas, el escenario cambia completamente por el incremento de la complejidad, evidenciando la necesidad de aplicar otros enfoques de solución tales como programación estocástica, métodos híbridos, heurísticas y meta-heurísticas, entre otros (Santibañez-Aguilar et al.,

2014; F. Sun et al., 2018; Zandi Atashbar et al., 2018).

Finalmente, el diseño y gestión operaciones de la BSC a partir de la caña de azúcar, contempla la complejidad innata del SCND que, al considerar las fuentes de incertidumbre y las operaciones de las ASC, la dimensión del problema de optimización se incrementa de forma representativa. En este sentido, es de esperar que la complejidad computacional también se incremente, y más aún si se involucra la perspectiva del desempeño sostenible que requiere de un enfoque multi-objetivo bajo situaciones de incertidumbre.

1.2. Marco Contextual: cadenas de abastecimiento de los biocombustibles a partir de caña azúcar

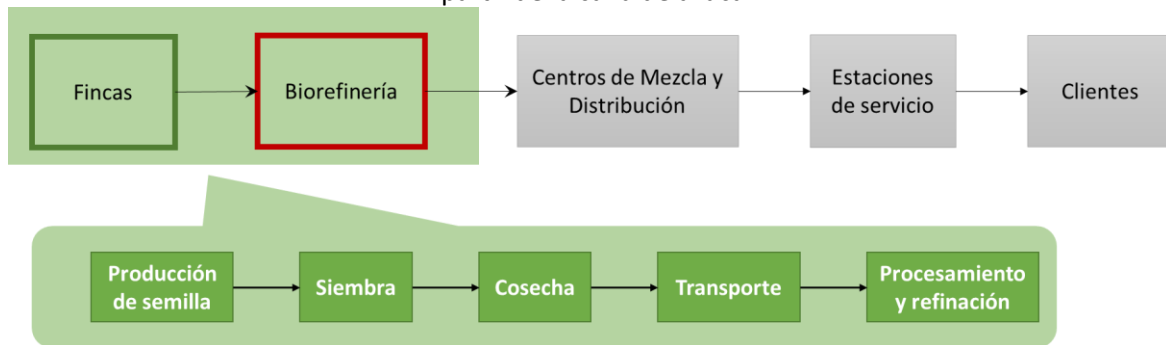
La industria global de energía renovable se ha visto liderada por la producción de biocombustibles de primera generación, particularmente, a base de las materias primas como maíz y caña de azúcar, y en menor proporción, los de segunda generación utilizando una gran variedad de biomásas (Ziolkowska, 2020). Adicionalmente, se ha identificado a la caña de azúcar como la materia prima más eficiente en la conversión de biomasa en energía (van Eijck et al., 2014). En este sentido, la industria de los biocombustibles a base de caña se ha convertido en una estrategia de alta importancia para gobiernos y compañías del sector energético, por ser una alternativa viable en la búsqueda de fuentes de energía renovable, y por sus bondades para la reducción de impactos ambientales y mejoramiento de la seguridad energética (Alonso Pippo et al., 2011). Aunque persiste la preocupación frente a los desafíos de la seguridad alimentaria, dado que el azúcar es un producto básico en la canasta familiar.

La industria de bioetanol de primera generación consiste en una serie de procesos industriales en los que se obtienen energía eléctrica, biocombustibles, productos químicos, entre otros, utilizando como fuente de materia prima caña de azúcar (Illukpitiya et al., 2013). La biomasa utilizada en el proceso tiene como característica la disponibilidad de manera estacional (ventana de tiempo) y la dispersión geográfica de los campos agrícolas. Esta situación genera altos costos de transporte, debido a que la dispersión geográfica los cultivos respecto a la localización de la biorefinería genera las largas distancias, así como un volumen heterogéneo de la biomasa transportada (Espinoza-Pérez et al., 2017).

La producción de etanol está inmersa en una SC que abarca desde los campos de cultivo hasta las zonas de consumo. La cadena de abastecimiento del biocombustible a partir de la caña de azúcar (SBSC, Sugar-based Biofuel Supply Chain) está compuesta por una serie de actores que interactúan para suplir la demanda de los clientes (ver Figura 1-2). Entre los actores más relevantes se identifican a: 1) las fincas, encargadas de las operación de producción de semilla, siembra, cosecha, transporte, y en general, de la producción de la caña de azúcar (suministradores de materia prima); 2) las biorefinerías (plantas de conversión), las cuales pueden ser productoras de azúcar, biocombustible (bioetanol) o de ambos y 3) los centros de mezcla y distribución, que se encargan de mezclar el biocombustible con la gasolina para distribuir a las estaciones de servicio; según la exigencia del Gobierno Colombiano, la mezcla está establecida en 10% (Resolución 40185, Ministerio Minas y Energía, 2018); 4) las estaciones de servicio, encargadas de distribuir los combustibles líquidos directamente hacia los clientes (Kostin et al., 2011; Illukpitiya et al., 2013; Cardoso et al., 2015; Carvajal et al., 2019).

La producción de caña de azúcar se basa en un conjunto de operaciones que requieren ser planificadas y gestionadas de manera simultánea con la biorefinería. La cadena inicia con el proceso de producción de semilla, la cual es extraída de los cultivos jóvenes (provenientes del primer y segundo corte). Luego que la semilla ha sido cosechada, se realiza la operación de siembra por medio de un dispositivo mecánico, no sin antes la adecuación y preparar el terreno. Seguidamente, la caña empieza su proceso de germinación y crecimiento alimentándose de los nutrientes del suelo, el agua lluvia, el riego planificado y la fertilización por parte del agricultor. Cuando la caña adquiere un crecimiento de entre 7 a 11 meses, ya está lista para ser cosechada con el objetivo de producir semilla; esto aplica para el primer y segundo corte.

Figura 1-2 Estructura general de la cadena de abastecimiento del biocombustible (bioetanol) a partir de la caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

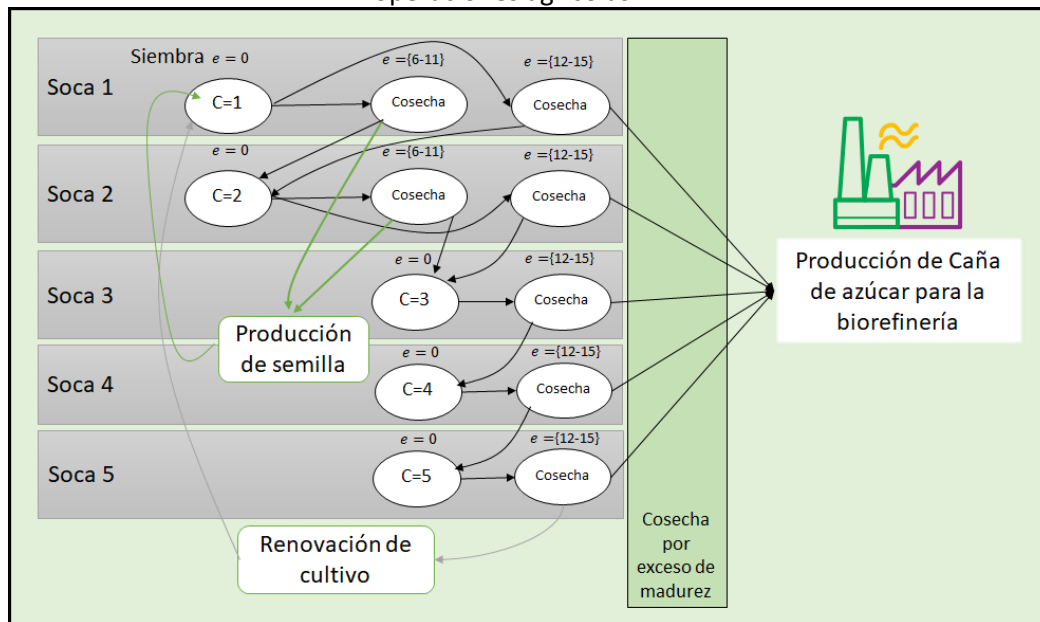
Por otro lado, las cañas con edades entre 12 y 15 meses se encuentran en su etapa de maduración, en donde el contenido de azúcar fermentable se encuentra maximizado y, por tanto, debe ser cosechada. Después de cosechada, la caña es transportada inmediatamente a la biorefinería con el fin de minimizar la degradación de los azúcares totales. En esta parte del proceso, la caña es muestreada con el fin de evaluar su calidad e, inmediatamente, comenzar la etapa de procesamiento industrial. Durante la fase de extracción es separado el jugo y el bagazo; el jugo es clarificado y alimenta los fermentadores, mientras que el bagazo es aprovechado para la producción de energía eléctrica y calor para el proceso. En la fermentación se empieza a producir el bioetanol el cual es separado de la vinaza; esta última es concentrada y conformado el biofertilizante. Por último, el etanol es concentrado y desnaturalizado para su distribución (de Souza Dias et al., 2015; Mele et al., 2011; van den Wall Bake et al., 2009).

Respecto al ciclo de producción de la caña de azúcar es posible identificar un comportamiento de transición entre diferentes estados del cultivo. Como se observa en la Figura 1-3, el cultivo inicia su proceso de crecimiento en la edad ($e = 0$) y el cultivo se clasifica como soca 1 ($C = 1$) dado que al alcanzar su maduración recibirá el primer corte. Una vez sembrado, inicia el primer crecimiento durante un periodo de 6 meses, entrando en disponibilidad de ser cosechado con el fin de producir semilla, con una ventana de tiempo de 5 meses. La otra opción considera un crecimiento durante 12 meses, periodo en el cual puede ser cosechado con el fin de suministrar la materia prima para la biorefinería. Una vez es el cultivo es cosechado, se reinicia el proceso de crecimiento de la caña de azúcar, entrando así a la siguiente soca ($C = 2$); este corte es similar al anterior, y en él es posible producir semilla. Los cortes siguientes (socas 3, 4, 5), no producen semilla debido al debilitamiento cultural. Luego de la quinta soca, el cultivo entra en proceso de renovación, debido a que la productividad de la biomasa se reduce de manera significativa, por lo que no es factible conservar una soca adicional. Es posible que un cultivo se extienda más de los 15 meses de edad durante una soca; sin embargo, por las condiciones ambientales la caña entra en proceso de floración utilizando el azúcar contenido en ella para este proceso; este exceso de madurez la caña reduce el interés para su aprovechamiento agro-industrial (Muchow et al., 1998; Colin, 2009; de Oliveira Florentino et al., 2018; Carvajal et al., 2019).

Por otro lado, existe un periodo del año caracterizado por niveles de lluvia adecuados, que benefician las condiciones físicas del suelo, las cuales permiten el desarrollo de las actividades de siembra y genera buenas condiciones para el desarrollo de la germinación (Darby-Dowman et al., 2000; Bezuidenhout & Singels, 2007a; de Oliveira Florentino et al., 2020). En ese sentido, se habla de ventana de tiempo para desarrollar las actividades de siembra. De manera análoga, existen

condiciones de la ventana de tiempo para el desarrollo de la cosecha, caracterizadas por bajos niveles de lluvia que facilitan las operaciones y evita que se ponga en riesgo el cultivo. Sin embargo, existen implicaciones mayores para la actividad de cosecha que se relacionan con la industria, y corresponde al hecho de que una biorefinería no puede parar de un día para otro, mientras mejoran las condiciones climáticas y volver a iniciar nuevamente, dado que existen condiciones técnicas que restringen los paradas espontáneas (Paiva & Morabito, 2009; da Silva & Marins, 2014). Finalmente, la ventana de tiempo para la cosecha se establece en un rango de tiempo constante durante el año en el cual no se presentan paradas, lo que define así la temporada de cosecha (Lopez Milan et al., 2006; Higgins et al., 2007; Jena & Poggi, 2013).

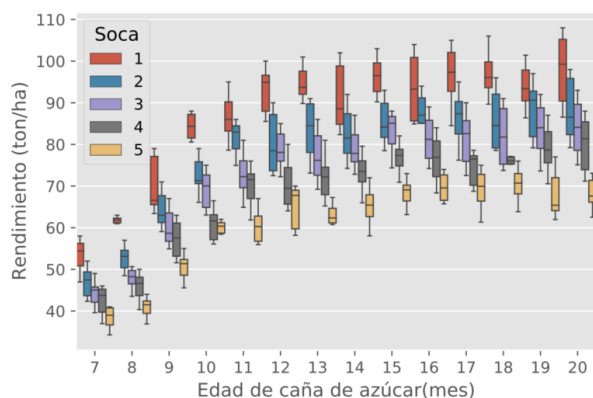
Figura 1-3 Diagrama de transición del ciclo de vida del cultivo de caña de azúcar en función de las operaciones agrícolas



Fuente: Elaboración propia.

Un factor importante de los cultivos de caña de azúcar es el rendimiento de la biomasa en toneladas por hectárea, el cual depende de dos aspectos fundamentales: a) la edad del cultivo (en meses), medida desde la fecha en que fueron sembrados y, b) el número de socas (cosechas) que ha tenido (ver Figura 1-4). Dado lo anterior, considerar la planificación de las operaciones agrícolas, siembra y cosecha, en el proceso de diseño de la SBSC puede incrementar la precisión respecto al desempeño de la producción agrícola. Sin embargo, al incluir el rendimiento de los cultivos en función de la edad y las socas se incrementa en la complejidad de la modelación del problema (Carvajal et al., 2019; Colin, 2009; Florentino et al., 2020). De manera complementaria, es posible visualizar en la figura 1.4 que, para cada edad por cada soca, se tiene un valor medio, una desviación y unos límites superiores e inferiores, como consecuencia de múltiples fuentes de incertidumbre que afectan de alguna manera el rendimiento. En trabajos propuestos por Darby-Dowman et al. (2000); Bezuidenhout & Singels (2007a) y Carvajal et al. (2019), una de las mayores fuentes de incertidumbre que incide en el rendimiento, corresponde a las condiciones climáticas exhibidas en la región donde se desarrolla el cultivo.

Figura 1-4 Rendimiento del cultivo de caña de azúcar por cada soca del desarrollo del cultivo



Fuente: Elaboración propia.

La SBSC involucra una serie de características a ser consideradas en el proceso de planificación y un conjunto de operaciones que determinan su alcance; entre ellas están: 1) las operaciones de las fincas y la biorefinería, 2) el ciclo de vida y producción de la caña de azúcar, 3) las ventanas de tiempo de la siembra y la cosecha, 4) el ciclo de producción de la biorefinería. El alcance de la SBSC establece la relación entre las decisiones estratégicas y tácticas de la planificación de la cadena, de manera tal que las decisiones de inversión y de operación se deban tomar de manera sincronizada, a fin de obtener un mejor desempeño. Por un lado, si la cadena hiciera parte de una sola compañía, las decisiones se podrían tomar desde un enfoque centralizado. Por el otro, si cada una de las partes obedece a un actor independiente, el enfoque de cadena de abastecimiento debe garantizar que las decisiones se tomen de manera integrada en un ambiente de beneficio colectivo e individual.

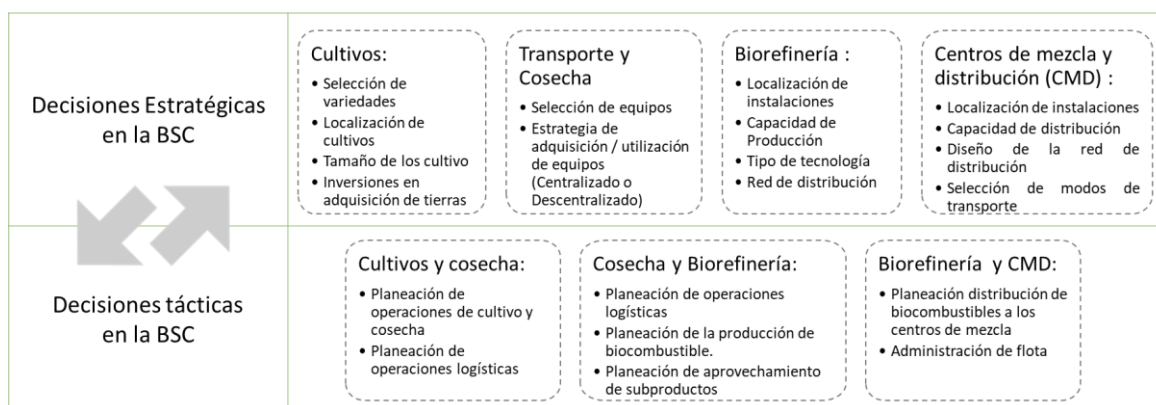
1.2.1. Decisiones estratégicas y tácticas en las SBSC

Según la jerarquía de decisiones que afectan a las cadenas de suministro, el diseño de la red logística, hace parte de las decisiones estratégicas de la SBSC. Estas decisiones son la base estructural de la red para facilitar el aprovisionamiento, la producción y la distribución de los productos, cuya operación es planificada a través de las decisiones tácticas, que establecen el flujo de materiales dentro de cada eslabón y entre los demás actores del sistema. Como se aprecia en la *Figura 1-5*, las decisiones estratégicas representan estructuras y direccionamientos a largo plazo que permiten la producción de biocombustibles para suplir las necesidades de los clientes (Higgins et al., 2007). Estas decisiones son usualmente modeladas matemáticamente con variables de decisión discretas y/o binarias, por lo que muestran cierto grado de complejidad matemática, la cual crece en función del tamaño del problema.

En las SBSC las decisiones estratégicas de los diferentes eslabones tienen una relación de interdependencia. Por ejemplo, la capacidad de producción de la biorefinería depende del tamaño de los cultivos, la selección de variedades, las decisiones de inversión en terrenos agrícolas, ya sea a través de compra o alquiler, y de la demanda en la zona de influencia de los clientes (Sartori et al., 2001; de Oliveira Florentino & Pato, 2014; Carvajal et al., 2019). Las decisiones de localización de los cultivos y la biorefinería también inciden en la selección de equipos de cosecha y transporte y en su estrategia de adquisición. Lo anterior se relaciona con la localización de los centros de mezcla y distribución, en los cuales se consolida la demanda de biocombustibles que serán ofertados a los consumidores (Sun et al., 2018; Yue et al., 2014). Esta situación particular es un ejemplo claro de la

necesidad de integración de las decisiones estratégicas en la SBSC.

Figura 1-5 Jerarquía de decisiones de la SBSC



Fuente: Elaboración propia.

Complementariamente, la planificación de operaciones en la SBSC se ve afectada por las condiciones biológicas de la materia prima y las condiciones climáticas de la región. En concreto, las operaciones de siembra y cosecha dependen de la estacionalidad del clima, en el cual el exceso de lluvia afecta las actividades vinculadas al campo cañero. De la disponibilidad de materia prima, se desprende la planificación de la producción en la biorefinería, así como la distribución de biocombustible hacia los centros de mezcla, evidenciando la necesidad de integrar las decisiones en toda la cadena para mejorar el desempeño global (Simchi-Levi et al., 2005). Por otro lado, el ciclo de vida de la caña de azúcar influye en la producción de la biomasa, ya que un cultivo puede llegar a tener 5 ciclos (socas) de producción y, con cada uno de ellos, el rendimiento se reduce; por tanto, es importante contrarrestar la reducción del rendimiento con cultivos más jóvenes (Colin, 2009). Lo anterior, de nuevo ilustra la estrecha relación entre las decisiones estratégicas y tácticas en el cultivo de caña de azúcar, y su influencia en el desempeño en la cadena de abastecimiento.

Considerando los actores de la SBSC y las decisiones a niveles estratégicos y tácticos, el desempeño de la cadena dependerá del nivel de sincronización que exhiba. En ese sentido, una planificación de los cultivos de caña de azúcar de forma óptima, para una finca en particular, puede generar efectos globales negativos. Sí cada una de las fincas actúa de manera individual optimizando su función de utilidad, puede llegar a generar picos de oferta de caña de azúcar, que coincidan con picos de otras fincas, causando una sobre oferta de caña de azúcar, la cual no puede ser procesado por la biorefinería. De igual manera, generará un periodo de tiempo en el que no habrá suficiente caña para soportar la operación mínima del molino, considerándose un problema estructural para la SBSC. De allí nace la necesidad de involucrar la sincronización de las operaciones entre los actores de la cadena, estableciendo contratos de suministro en diferentes etapas en el tiempo. De igual manera ocurren con los equipos para la operación de la cosecha, los cuales deben ser asignados a los diferentes campos agrícolas para realizar el corte y transporte de caña, considerando el clima, la distancia, la disponibilidad de equipos, entre otros. En ese sentido, se identifica al eslabón de procesamiento como el actor principal el cual debe asumir un rol de liderazgo frente a la integración y sincronización de las operaciones (Blanco et al., 2010; Rota et al., 2018).

Partiendo del escenario de una industria madura, en la cual existe una zona agroindustrial establecida y con varios procesadores de caña, la sincronización se realiza con múltiples actores en

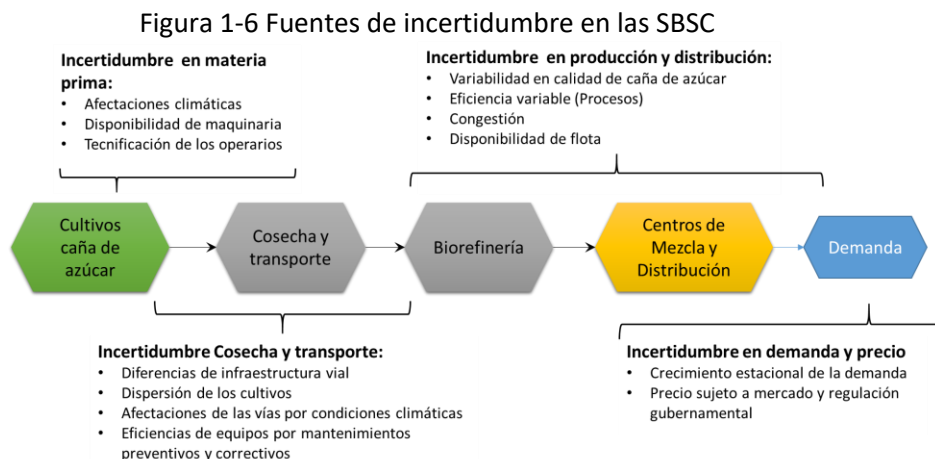
los que se reduce el riesgo operativo de tener excesos y faltantes de caña. Sin embargo, cuando se diseña una SBSC en una nueva zona de expansión agrícola, el riesgo operativo permea en las decisiones estratégicas que vinculan el desarrollo agrícola e industrial, tal como lo muestra (Colin, 2009; Carvajal et al., 2019). En ese sentido, múltiples esquemas de integración vertical de actores pueden ser detectados, entre ellos: Integración vertical total, en el cual la biorefinería es dueña de los cultivos y ejerce un control total sobre la producción agrícola; por otro lado, la industria establece contratos con agricultores para el suministro de caña de azúcar; y finalmente, una combinación entre las dos estrategias previas. Cada estrategia exige un nivel de decisión y exhibe unos riesgos operativos que contribuyen en el desempeño económico, ambiental y social de la cadena. Esto último ha sido uno de los desafíos más grandes en el desarrollo de nuevos proyectos de biocombustibles en Colombia durante los últimos años, generando grandes incertidumbres en la producción y aumentando la necesidad de importación de biocombustibles (Asocaña, 2017; Ramirez, 2021a).

1.2.2. La incertidumbre y su efecto en el desempeño de la SBSC

Como se mencionó anteriormente, las fuentes de incertidumbre afectan los procesos de diseño y gestión de operaciones en la SCND dado la gran cantidad de información, la fiabilidad en el proceso de captura, y muchas veces, la imposibilidad su recolección (Govindan et al., 2017). Para el caso de las ASC, el panorama se incrementa debido a la influencia de otras fuentes de incertidumbre como los aspectos biológicos de la producción agrícola, el clima, las variabilidades en la calidad de suelo, la infraestructura rural de transporte (Borodin et al., 2016). En ese sentido, la SBSC no es ajena a esa situación dado que, la mayoría de los parámetros corresponden a datos experimentales, opiniones de expertos, y además está sujeta a múltiples variables exógenas que dificultan su certeza.

Para el caso particular de la SBSC, es posible identificar un conjunto de fuentes de incertidumbre que pueden afectar de manera significativa su planificación (ver

Figura 1-6). Respecto a las incertidumbres en la materia prima se reconoce aspectos que influyen directamente en la producción de materia prima, en calidad y cantidad de biomasa obtenida (Darby-Dowman et al., 2000; Carvajal et al., 2019). Incertidumbre en el proceso de cosecha y transporte el cual puede impactar en los tiempos de traslado de la caña desde los campos hasta la biorefinería o, también, en las distancias por el cierre de vías por mala condición (Hahn & Ribeiro, 1999; Faria et al., 2015).



Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de producción y distribución se detectan variabilidades en las tasas de producción y en el inventario de productos a ser distribuido, afectando el nivel de oferta (da Silva & Marins, 2014; Álvarez-Rodríguez et al., 2017). Por último, se observa variabilidad en la demanda y el precio, los cuales afectan el desempeño de la SBSC (Kostin et al., 2010; Kostin et al., 2012). En ese sentido, Higgins et al. (2007) identifica la importancia de reconocer la existencia de estas fuentes de incertidumbre en la SBSC, pues ellas inciden en las decisiones de diseño y de operaciones de la cadena a lo largo del todo el horizonte de planeación. A manera de ejemplo, la variabilidad del tiempo de transporte tiene un efecto de corto plazo que, al ser considerado en un enfoque estratégico, podría no generar una afectación significativa pero si un incremento en la complejidad del modelo; por otro lado, el efecto que tiene la duración de la temporada de cosecha afecta todos los niveles de decisión (Carvajal et al., 2019). De allí la necesidad de plasmar un panorama general con el fin de evidenciar cuáles fuentes de incertidumbre pueden llegar a afectar el diseño y gestión de operaciones de la SBSC (Simchi-Levi et al., 2005; Birge & Louveaux, 2011; Kulkarni, 2016).

Como se ha mencionado las condiciones climáticas corresponden a una fuente de incertidumbre que puede impactar tanto en la producción agrícola, como en la temporada de cosecha, afectándola positiva y negativamente. En el caso particular de Colombia, las condiciones de lluvia alta benefician la generación de biomasa en la producción de caña de azúcar, sin embargo, genera el efecto contrario al exhibir temporadas sin lluvias más extensas de las normales. Por otro lado, existen varios patrones climáticos en Colombia, algunos marcados por largas sequías y periodos con abundantes lluvias, característica constante de las nuevas zonas de expansión agrícola; por otro lado, existen otro tipo de región en donde las lluvias son más constantes durante el largo de los años, tal como la zona cañera del país, la cual se encuentra a lo largo de la cordillera central y oriental. No obstante, para los casos de las nuevas zonas, las condiciones climáticas representan un desafío de incertidumbre durante la fase de desarrollo de los cultivos.

1.2.3. El desempeño sostenible en las SBSC

Una SBSC sostenible puede definirse como la planificación estratégica y la gestión de las operaciones de producción biocombustibles a partir de caña de azúcar, teniendo en cuenta los flujos de materiales, información y capital, por medio de la cooperación de múltiples compañías a lo largo de la cadena, mientras se cumplen las metas desarrollo sostenible, en sus dimensiones económica, ambiental y social, considerando los requerimientos de los clientes y los inversionistas (Seuring & Müller, 2008; O. Sun & Fan, 2020). En ese sentido, se evidencian diferentes actividades (inversiones y operaciones) que pueden impactar las tres dimensiones del TBL para el caso de la SBSC.

Dado que la SBSC presenta un desafío en la combinación de las decisiones estratégicas y tácticas, la medición del desempeño económico puede estar relacionada con los flujos de ingresos, costos e inversiones a lo largo del horizonte de planificación. Según la tendencia de la literatura, el VPN de la utilidad es una opción válida para la optimización de la SBSC; sin embargo, no es la única opción pues también es posible considerar un desempeño económico más robusto. Además, la SBSC involucra decisiones de inversión bastante considerables, por lo tanto, las decisiones de financiación inciden en el desempeño económico, contribuyendo a la reducción de impuestos y a la distribución del riesgo. Por otro lado, al considerar la SBSC como una cadena de importancia para el desarrollo económico de una región, así como la mitigación de impactos ambientales y los altos costos de inversión, es posible abordar su desempeño como un proyecto de relevancia gubernamental.

Al reunir los aspectos anteriores, el diseño de la SBSC puede verse como un proyecto de inversión de gran impacto regional, el cual puede ser estudiado desde el *Project Finance* la cual es una estrategia de financiación en donde la garantía del préstamo está sujeta a los flujos futuros potenciales generados por el mismo proyecto (Grimsey & Lewis, 2007; Borgonovo et al., 2010; Gatti, 2013). Por lo tanto, es posible involucrar la estrategia de financiación junto con la combinación de las decisiones estratégicas y tácticas de la SBSC. En esa vía, múltiples autores han demostrado que incluir las decisiones de financiación en el problema de SCND mejoran el desempeño para los accionistas si es optimizado por medio del valor económico agregado (EVA) (Longinidis & Georgiadis, 2013; Ramezani et al., 2014; Jin et al., 2017; Polo et al., 2018).

Con relación a la dimensión ambiental existen diversas maneras de evaluar el impacto causado por una SBSC debido a que existen múltiples actividades que pueden impactar, la frecuencia de ocurrencia y la dimensión del daño causado (Bekkering et al., 2010). Para tratar de reducir la subjetividad de la medición de la dimensión ambiental, es posible utilizar el análisis de ciclo de vida (LCA) como herramienta de valoración de impactos, con el fin de evaluar el potencial de afectación y realizar una medición estandarizada (Brandenburg et al., 2014; Barbosa-Póvoa et al., 2017; O. Sun & Fan, 2020). En el contexto de la SBSC, durante el proceso de producción de caña de azúcar, existen múltiples actividades con potenciales impactos ambientales, tales como:

En el **establecimiento de un cultivo** se impacta en términos de : ocupación del suelo, pérdida de especies y agotamiento de la materia orgánica del suelo, contaminación de aguas, consumo de agua, (GHG, GreenHouse Gases), agotamiento del ozono (Gheewala et al., 2014; Prasara-A & Gheewala, 2016).

En la **cosecha y transporte de caña** se generan: emisión de partículas, GHG, derramamiento de aceites y líquido hidráulico, compactación de suelos, ocupación de tierras por las zonas de parqueo, entre otros (Gnansounou et al., 2020; Meza-Palacios et al., 2019; Prasara-A & Gheewala, 2016).

En la **producción biocombustibles**, el principal impacto se da durante la construcción de la biorefinería, la cual constituye una alteración fuerte de la vida silvestre. Por otro lado, durante la fase de operación de la planta existen múltiples impactos por consumo de productos químicos, emisiones, manejo de vinazas, manejo del bagazo y consumo de energía (Ometto et al., 2009; Mele et al., 2011; Macowski et al., 2020).

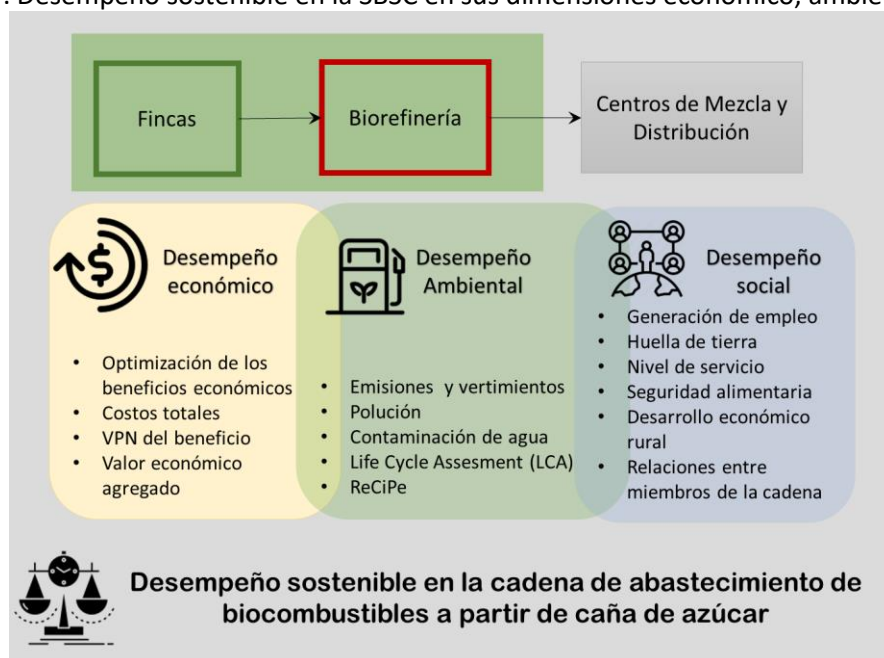
Con base en las etapas del LCA, las anteriores operaciones agregadas pueden ser un punto de partida en la definición y alcance; dichas operaciones se definen como sus fuentes de generación de impactos ambientales para la SBSC. Además, es posible contabilizar el inventario de operaciones durante un horizonte de planificación, así como su impacto ambiental unitario; para finalmente, determinar el impacto ambiental total generado en la SBSC durante su horizonte de planeación (Mele et al., 2011). Con relación a la fase de valoración de los impactos ambientales de la SBSC, en los trabajos propuestos por Mele et al., (2011), Gheewala et al. (2014) y Macowski et al. (2020), es probable concertar un marco de evaluación conceptual sobre los impactos potenciales que tiene la cadena. Estas mediciones dependen del tipo de actividad, tipo de tecnología, tipo de materia prima, y la forma en como los subproductos son manejados (Prasara-A & Gheewala, 2016). En ese sentido, la definición del sistema, su alcance, sus actores, operaciones, entre otros, es importante en la medición del desempeño ambiental.

Respecto al desempeño social de la SBSC, existen múltiples indicadores que impactan a diversos grupos sociales a lo largo y ancho de la cadena, entre ellos: la generación de empleo (Santibañez-

Aguilar et al., 2014), la responsabilidad social (Alonso-Pippo et al., 2013; Chen et al., 2018), la conservación de la naturaleza y la mediación respecto a la seguridad alimentaria, al considerarse un dilema ético, para la producción de biocombustibles a partir de materias primas de primera generación (Yue et al., 2014; Budzianowski & Postawa, 2016). Otro de los grupos sociales de gran importancia son los consumidores de la SBSC, aquí se puede identificar el nivel de servicio como uno de los objetivos sociales recurrentes (Baghalian et al., 2013; Das et al., 2020). Por otro lado, los actores de la cadena son considerados como otro grupo sujeto de impactos sociales; los cuales pueden ser impactados en términos de su relacionamiento, la selección de proveedores, las condiciones de negociación, el nivel de integración entre los actores y la distribución justa de los beneficios económicos y sociales (Eizenberg & Jabareen, 2017; Kusumastuti et al., 2016; S. Liu & Papageorgiou, 2018).

Basados en la identificación de las fuentes de impacto en la estructuración y operación de la SBSC, es posible conformar un marco de evaluación del desempeño sostenible en sus tres dimensiones, económica, ambiental y social, tal como se observa en la Figura 1-7. En ella, se resumen los múltiples indicadores o enfoques de medición que miden el desempeño, y que también, están sujetos a la mediación o a la búsqueda del equilibrio.

Figura 1-7. Desempeño sostenible en la SBSC en sus dimensiones económico, ambiental y social



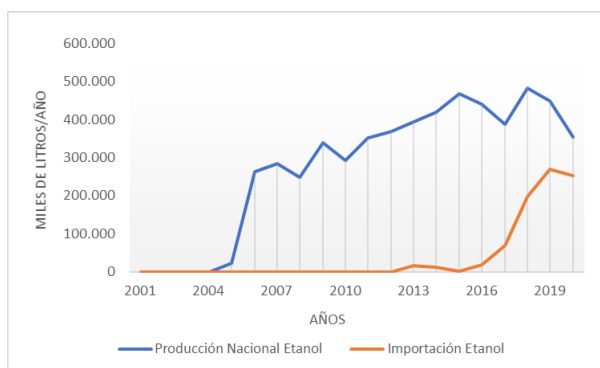
Fuente: Elaboración propia

1.2.4. La SBSC en Colombia

La producción de biocombustibles en Colombia se ha dado principalmente por bioetanol de primera generación a partir de caña de azúcar, por medio de 7 biorefinerías distribuidas en el territorio nacional, las cuales tienen una capacidad instalada de 2.15 millones de litros por día. Adicionalmente, para la zona sur-occidente del país, compuesta por los departamentos de Cauca, Valle del Cauca y Risaralda, tienen un área de 232 mil hectáreas cultivadas con caña de azúcar y, para el caso del departamento del Meta, cuenta con 20 mil hectáreas de cultivo, generando una producción nacional de 354 millones de litros para el año 2020 (Ramirez, 2021b). Sin embargo, esta

producción no ha sido suficiente para satisfacer la demanda interna, obligando al gobierno a importar 252 millones de litros bioetanol (41% del volumen consumido) para el año 2020 (ver Figura 1-8). El panorama de producción nacional de biocombustibles está sujeta a la capacidad instalada y a la producción nacional de azúcar que, dependiendo de los niveles de precio, incrementa o reduce su producción, afectando la oferta de biocombustibles (Procaña, 2018).

Figura 1-8 Producción e importación de bioetanol en Colombia



Fuente: Elaborado a partir de datos de Ramirez (2021a)

La industria de los biocombustibles en Colombia se encuentra anexa a la industria del azúcar y, en ese sentido, la mayoría de las biorefinerías produce el etanol utilizando mieles y melazas, subproducto de la producción de azúcar. Solo una de las biorefinerías está destinada a la producción a partir del jugo de caña de azúcar (Ramirez, 2017). El Gobierno Colombiano ha sido consciente de la problemática mundial del calentamiento global y de las estrategias de sustitución de combustibles fósiles, uno de los principales generadores de emisiones de GHG. Desde el año 2001 en la ley 693 se establecen la normatividad inicial que permite el uso de etanol como combustible creando además estímulos para su producción, comercialización y consumo. Luego en el año 2008 se propone el documento de Conpes 3510, estableciendo la política pública para la producción sostenible de biocombustibles en Colombia, con el fin de ser una estrategia efectiva para combatir el cambio climático. En el año 2014, se promulga la ley 1715 por la cual se involucran a los biocombustibles como una línea estratégica de energías renovables y lo integra a la red energética nacional. Más recientemente, en el año 2018 se expide la resolución 40185 la cual establece el porcentaje de mezcla entre biocombustible y gasolina en todo el territorio nacional en 10% (E10) (Fedebiocombustibles, 2021).

Aunque se estableció la mezcla E10 en el país, han sido múltiples ocasiones en los que se priorizan centros urbanos con más de 500.000 mil habitantes para la comercialización de la gasolina oxigenada con E10, dados los bajos niveles de oferta, la necesidad de importación y los periodos de lluvias que dificultan la producción (UPME, 2018). Varios han sido los ejemplos de la modificación de los niveles de mezcla debido a los problemas antes mencionados; por ejemplo, la resolución 40100 del 2021 emitida por los Ministerios de Agricultura, Minas y Energía, y Ambiente, la cual declara la reducción del porcentaje de mezcla por aumentos en las precipitaciones, impactando en la oferta nacional de biocombustibles.

Aparte de todo el marco normativo para la producción de biocombustibles en Colombia, se encuentra la articulación de la política pública de los planes de desarrollo propuestos en los últimos dos gobiernos. La Ley 1753 de 2015, que establece el plan nacional de desarrollo 2014-2018,

propone dos ejes temáticos referente a la “*agregación de valor a recursos renovables y no renovables*” y “*crecimiento verde*”, los cuales tienen una relación muy estrecha con la producción de biocombustibles desde una perspectiva de sostenibilidad. En ese sentido, se exhorta al desarrollo de investigación científica en estas temáticas priorizadas. De igual manera ocurre con el Plan Nacional de Desarrollo actual, ley 1955 de 2019, en el cual se prioriza la energía sostenible, la producción agrícola sostenible, la bioprospección y los bioprocesos, y la industria 4.0, generando el marco temático para el desarrollo de económico y de investigación científica del país. Respecto a la operacionalización del plan de desarrollo, una de las líneas de acción corresponde a la optimización de procesos para la sustitución de combustibles fósiles (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2019).

Por otro lado, el Gobierno Colombiano ha identificado nuevas zonas con potencial de aprovechamiento agrícola con el fin de desarrollar su política de biocombustibles, y a largo plazo, aumentar el nivel de mezcla hasta el E80. Estas zonas de expansión tienen una característica sobre el aprovechamiento económico actual de la tierra, ganadería extensiva, la cual puede llegar a ser una actividad ineficiente por la subutilización de los terrenos. Así, estas zonas representan oportunidades para el aprovechamiento agrícola sin generar deforestación o poner en riesgo la seguridad alimentaria del país (Asocaña, 2017). Aunque se promueve el crecimiento de la industria de los biocombustibles, el Gobierno también ha identificado que el crecimiento sin responsabilidad ambiental y social puede llegar a ser muy peligroso, por los efectos negativos que puede generar. En ese sentido, se promueve la producción de biocombustibles dentro del marco del desarrollo sostenible (Departamento Nacional de Planeación, 2008).

Con la articulación entre la política pública y la de ciencia, tecnología e innovación, se logran identificar varias líneas de priorización que ayudan a justificar el desarrollo de la industria de los biocombustibles en el país (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2019). Las más sobresalientes, con una vinculación directa con la presente tesis doctoral, son:

- **Bioprocesos.** Mejora y desarrollo de procesos de aprovechamiento y conversión de biomasa, procesos responsables con el ambiente.
- **Producción agropecuaria sostenible.** Desarrollo de modelos para adaptar los sistemas de producción a los efectos del cambio y variabilidad climática, así como la producción sostenible.
- **Energía sostenible,** optimización de procesos para la sustitución de combustibles fósiles.
- **Industria 4.0,** integración tecnológica en la cadena de abastecimiento con miras a la optimización de los procesos.

Considerando el marco regulatorio, la política pública respecto al componente de desarrollo económico y de investigación científica, se suma el compromiso del país para contribuir al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible acordados en las Naciones Unidas, en la cual uno de los estandartes es combatir el calentamiento global.

Una vez, se reúnen el marco normativo, la política pública, la oferta nacional de biocombustibles, y las importaciones de bioetanol, se identifica la necesidad que tiene el país de ampliar su oferta de bioetanol con el objetivo de combatir el cambio climático, con la sustitución del consumo de combustibles fósiles, con fuentes renovables y con una producción sostenible. Por un lado, las importaciones de bioetanol, no están considerando los impactos ambientales producto del transporte transnacional, los cuales pueden aumentar la huella de carbono (Leduc et al., 2010). Por

el otro, la producción interna puede ayudar a reducir los costos de transporte, el aprovechamiento de tierras de baja actividad agrícola, e incentivar el desarrollo económico del sector rural en múltiples zonas del país. Finalmente, a pesar del marco normativo, los estímulos y la disponibilidad de territorios, los proyectos de producción de bioetanol en Colombia han sido escasos y, para algunos casos, no han tenido éxito en su ejecución.

El desarrollo de la industria de los biocombustibles en nuevas zonas de expansión agrícola se puede analizar desde dos momentos. El primero durante la fase de inversión, en la cual los cultivos y la biorefinería es establecida; y el segundo, luego de la puesta en marcha de las operaciones industriales y agrícolas de manera simultánea. Durante la primera fase el desarrollo del cultivo inicia con el establecimiento de un semillero de caña experimental, con el objetivo de identificar las variedades que mejor se adaptan al clima y tipo de suelo de la región, luego inicia el tiempo de desarrollo de los cultivos los cuales deben ser suficientes y con la madurez requerida, y una vez la planta esté construida, ésta inicie sus operaciones. Durante esta fase de desarrollo agrícola y construcción industrial se generan múltiples retos que afectan la sincronización para un inicio de operaciones correcto. Usualmente la construcción toma un tiempo de entre tres a cuatro años, depende de la complejidad tecnológica. Sin embargo, un crecimiento de caña acelerado, puede ocasionar un gran desperdicio de caña de azúcar, cultivo de edad avanzada, con gran extensión por renovación. Si el crecimiento del cultivo es lento, la capacidad de la planta no se aprovecharía de forma correcta, poniendo en riesgo el componente económico, a pesar de reducir los desperdicios de caña de azúcar.

El desperdicio de caña de azúcar se genera porque no toda la caña producida puede ser utilizada como semilla, por lo tanto, se debería dar un uso industrial, pero como no existe industria desarrollada en la zona cercan, éstas se deben disponer con el fin de no alterar las producciones futuras del cultivo. El desperdicio se incrementa si existe algún tipo de retraso en la construcción, aumentando el tiempo de inicio de operaciones y alterando la sincronización del cultivo. En los proyectos actuales en Colombia, éste ha sido uno de los principales problemas, el ajustar de manera adecuada los planes agrícolas, con el fin de garantizar la sincronización entre el desarrollo de los cultivos de caña de azúcar y la construcción de la planta industrial. Por otro lado, el desarrollo de los cultivos requiere de una extensión importante de terrenos para ser establecido, sin embargo, con el fin de ser financieramente viables, los predios deben ser adquiridos basados en la sincronización del cultivo y la construcción de la industria. En ese sentido, un retraso en la adquisición de predios, puede llegar a impactar la fecha de inicio de operaciones por no contar el suministro suficiente de materia prima. Por el contrario, un retraso en la construcción me lleva a que invierta dinero en un predio de manera anticipada, impactando el flujo de inversión y la factibilidad económica.

Sumado a lo anterior, se puede generar un conflicto entre los diversos cultivadores de caña y la biorefinería al momento de generarse un retraso en la construcción, ubicando a cada uno de los cultivadores en una posición desfavorable, desde el punto de vista económico y social. Durante el establecimiento de un contrato de suministro de materia prima, el cultivador acepta una fecha de inicio de suministro, acepta un nivel de riesgo y genera una planificación de inversión. Sin embargo, una vez la fecha de inicio es pospuesta, inicia el desequilibrio financiero, y el cual aumenta con la reducción de la escala del cultivo que, para el caso colombiano, los cultivadores son pequeños y medianos, en su mayoría. Durante dicha etapa, la gestión de la cadena de suministro debe enfocarse en mantener la sincronización de las operaciones y realizar los ajustes pertinentes con el fin de dar inicio a las operaciones de la SBSC.

Durante la fase de operación, el problema de la sincronización de las operaciones agrícolas e industriales se mantiene, haciendo frente a la variabilidad del clima, a la contracción y expansión de la temporada de cosecha y a los rendimientos variables de los cultivos. En ese sentido, las actividades de planificación de cultivo en el largo plazo, se relacionan estrechamente con las operaciones de la cosecha, las distancias, el transporte, las necesidades de tierras, y la necesidad de expandir el cultivo como medida de remediación de una baja productividad de los cultivos. En ese sentido, durante la fase de operación, las decisiones sobre el cultivo son medidas de contingencia y remediación sobre el riesgo de desabastecimiento de la planta. Como se mencionó, la integración de los actores de la cadena toma un rol importante dado que deben ser coordinados con el fin de garantizar el flujo de biomasa y la producción de biocombustibles, desde la perspectiva sostenible, alineándose la práctica del desarrollo de la industria con el marco normativo exigido.

1.3. Estado del Arte

Una vez establecidos el marco conceptual y contextual de las SBSC, es necesario identificar el alcance que ha tenido la investigación científica sobre la situación problemática estudiada. Por lo tanto, en esta sección se exponen los resultados de la revisión sistemática de la literatura, con el propósito de identificar los avances en el campo de estudio, las oportunidades de investigación, y de igual manera, derivar el estado del arte alrededor de los componentes estructurales abordados en este trabajo. La metodología implementada es similar a la utilizada por Oliveira et al. (2016) y Behzadi et al. (2017), y se compone de los siguientes pasos: 1) definición del propósito y los objetivos de la revisión; 2) localización, selección y evaluación de los artículos científicos; 3) análisis de resultados; 4) identificación del vacío de conocimiento.

Como se mencionó previamente, los 3 ejes temáticos de esta tesis doctoral son: 1) cadenas de abastecimiento de biocombustibles a partir de caña de azúcar; 2) la perspectiva sostenible en cadenas de abastecimiento, y 3) la incertidumbre en la modelación de cadenas de abastecimiento. Con estos tres componentes se derivaron cuatro preguntas de investigación (PI), para guiar la revisión de literatura:

- PI 1. ¿Hasta dónde se ha estudiado el problema de integración en el diseño y gestión de las operaciones de la SBSC?
- PI 2. ¿Qué fuentes de incertidumbre han sido identificadas y estudiadas en el diseño y gestión de operaciones de la SBSC?
- PI 3. ¿Cómo se ha abordado el criterio de sostenibilidad en el diseño y gestión de operaciones de la SBSC?
- PI 4. ¿Qué avances de investigación se han realizado en relación con diseño y gestión de operaciones de la SBSC, considerando la integración de decisiones, el desempeño sostenible y los efectos de la incertidumbre?

Con el fin de obtener una base de datos fiable y representativa, la selección de documentos se basó en 5 criterios: (1) artículos alojados en las bases de datos SCOPUS y Web of Science (WoS); (2) únicamente artículos de revistas científicas; (3) trabajos en idioma inglés; (4) estrecha relación con los ejes temáticos; (5) estudios en el campo de la investigación de operaciones. Además, teniendo en cuenta los ejes temáticos y el enfoque de la revisión se establecieron los siguientes componentes: cadena de abastecimiento (C_1); perspectiva de investigación de operaciones (C_2); materia prima (caña de azúcar) (C_3); Producto final (biocombustible) (C_4); perspectiva sostenible (C_5) y fuentes de incertidumbre (C_6). Consecuentemente, en la Tabla 1-1 se presentan los componentes de manera ampliada, a través de sus palabras claves. Estos son utilizados para la construcción de las ecuaciones de búsqueda, las cuales son estructuradas de manera tal, que los artículos obtenidos puedan dar respuesta a las preguntas de investigación (ver Figura 1-9).

Tabla 1-1 Componentes utilizados en las ecuaciones de búsqueda

ID	Componente	Palabras claves representativas
C1	Cadenas de abastecimiento	"Supply Chain Network design" OR "Supply Chain" OR logistics OR transport OR sowing OR harvest OR planting OR growing

ID	Componente	Palabras claves representativas
C2	Investigación de operaciones	Optimization OR "Operational research" OR "Operations Research" OR Planning
C3	Caña de azúcar	Sugarcane OR "sugar cane"
C4	Biocombustibles	Biofuels OR Bioenergy OR bioethanol
C5	Sostenibilidad	Sustain*
C6	Incertidumbre	Uncertain* OR Robust OR Stochastic OR Fuzzy

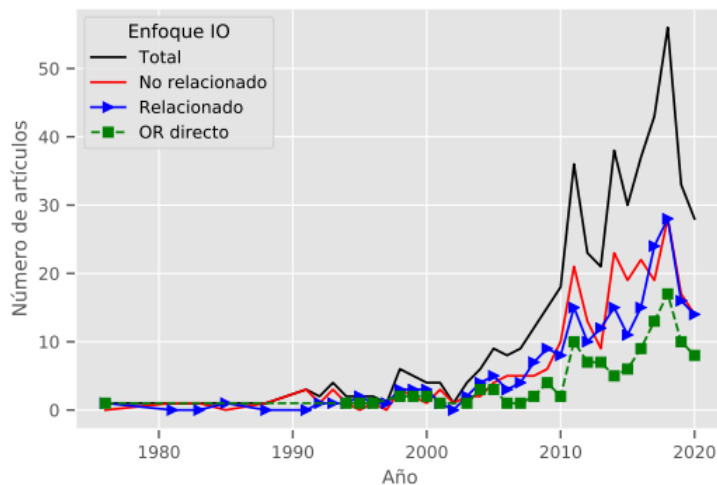
Figura 1-9 Estructuración de las ecuaciones de búsqueda basados en los componentes



Fuente: Elaboración propia

La base de datos inicialmente obtenida estuvo compuesta por 467 artículos; esta fue filtrada utilizando los criterios de inclusión 1, 2 y 3, dando como resultado un conjunto de 221 trabajos. Se aplicaron los criterios de exclusión 4 y 5, permitiendo que la base de datos fuera refinada hasta 120 estudios relacionados. Como se observa en la Figura 1.10, los trabajos identificados muestran una tendencia creciente en investigación y se aprecia un alto interés por el tema objeto de estudio por parte de la comunidad científica (ver Figura 1-10).

Figura 1-10 Tendencia de publicaciones en torno al tema de las SC de la caña de azúcar y biocombustibles

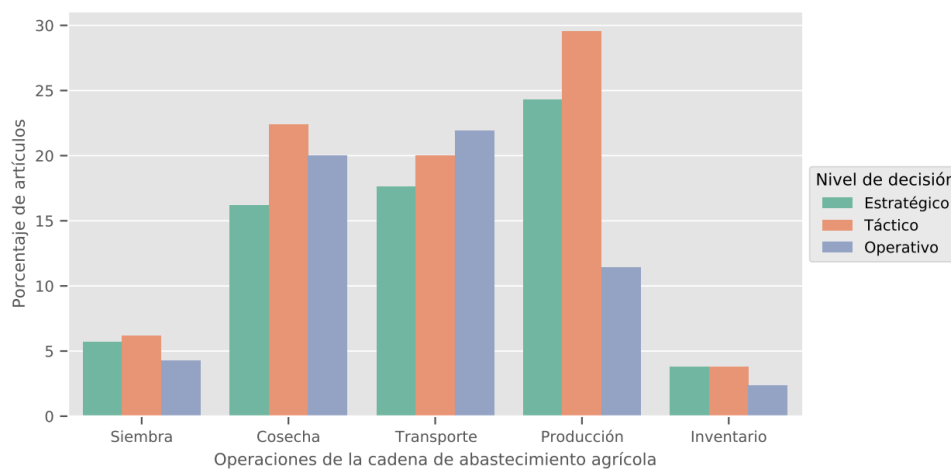


Fuente: Elaboración propia.

1.3.1. Integración de decisiones en la ASC de la caña de azúcar

Con el objetivo de dar respuesta a la pregunta de investigación 1 (PI_1), se aplicó la ecuación de búsqueda EB_1 , y se encontraron dos categorías respecto al alcance de las decisiones y las operaciones involucradas: 1) el horizonte de planeación: estratégico, táctico y operacional; 2) las operaciones involucradas en la cadena: siembra, cosecha, transporte, producción industrial, inventario y distribución. Se realizó una relación cruzada entre las dos categorías previas, tal como se muestra en la Figura 1-11. Allí se puede observar que una porción significativa de los trabajos analizados estudia decisiones de cosecha, transporte de caña y producción en todos los niveles de decisión; de manera contraria, las operaciones relacionadas con siembra e inventarios son escasamente abordadas. Para el eslabón de producción, sobresalen los trabajos con relación a las decisiones estratégicas y tácticas, sobre las operacionales; y para las operaciones de cosecha y transporte, frecuentemente consideradas de manera conjunta, la proporción de trabajos tiene mayor frecuencia en las decisiones tácticas y operacionales.

Figura 1-11 Relación de artículos que estudian la jerarquía de decisiones y las operaciones de la cadena de abastecimiento de la caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de identificar más detalladamente el nivel de integración de operaciones en la SBSC de la caña de azúcar, se construyó el Anexo A, en el cual se presentan las contribuciones que involucran más de una de las operaciones mencionadas. Además, en este mismo Anexo, se incluye el alcance de planificación, ya sea estratégico, táctico u operacional. Otro conjunto de columnas incluye las operaciones de la cadena agrícola, tales como: siembra, cosecha, transporte, producción e inventario. Se incluyó también un identificador que denota si la contribución abordó el rendimiento de los cultivos como un parámetro (valor de entrada) o como variable de decisión. En la Anexo A se puede observar que las decisiones estratégicas son consideradas en el 38% de los artículos; las tácticas en el 44% y las operacionales en el 51%. De otro lado, el 12% estudió de manera conjunta las decisiones estratégicas y tácticas, y las tácticas junto a las operativas se consideran el 23% de los casos. Por último, solo un trabajo relaciona los tres niveles de decisión, involucrando el ruteo y asignación de la cosechadora mecánica para los campos agrícolas (Kittilertpaisan & Pathumnakul, 2017).

Respecto a las operaciones de la cadena, el 77% de los artículos estudian la operación de cosecha; el 56% el transporte, el 28% la producción; el 23% las actividades relacionadas con siembra, y

finalmente, el 13% la operación de inventario y distribución. Se realizó un análisis cruzado entre las operaciones, encontrando que varias contribuciones involucran más de una operación de forma simultánea. En ese sentido, las operaciones de cosecha y transporte representan el 41% de las contribuciones. De igual manera, el transporte de caña y la producción industrial son considerados por el 21% de los artículos. La siembra y la cosecha son incluidas en el 18% de la muestra, y además, la producción e, inventario y distribución, son tenidas en cuenta de manera conjunta el 13% de los artículos. Por último, el 82% de los trabajos han estudiado el rendimiento de caña de azúcar como un parámetro de entrada, aspecto que resta realismo a la modelación y reduce la precisión en la medición del desempeño de la cadena.

En resumen, la integración de decisiones en el diseño y gestión de la SC de la caña de azúcar, es aún un tópico de investigación abierto que requiere mayor profundización respecto al estudio de las decisiones conjuntas a niveles estratégicos y tácticos. Se requiere también más investigaciones que logren integrar las operaciones agrícolas e industriales de tal forma que se pueda llegar a cabo una medición holística del desempeño de la cadena de abastecimiento.

1.3.2. Integración de operaciones en la SBSC

Teniendo en cuenta la base de datos obtenida con la EB_1 , se incluyó el componente C_4 para refinar la búsqueda detallada sobre la vinculación de la materia prima (caña de azúcar) con la producción de biocombustibles. Se obtuvo así, otro conjunto de artículos, refinada con la EB_2 , obteniendo 33 contribuciones. Se encontró que el 100% abordan las decisiones tácticas, el 91% las decisiones estratégicas y el 39% las operativas. Igualmente, el 85% de los trabajos considera la operación de producción industrial, 30% la cosecha, 24% la operación de transporte, el 9% la siembra y el 3% las operaciones de inventario y distribución. Con relación a la integración de las operaciones que el 21% estudian la integración entre la producción y el transporte; el 15% integra la cosecha y el transporte; la siembra y la cosecha en un 9% de los casos y, en menor proporción, la producción y el inventario con el 3% de los trabajos.

Cuando se consideran las SBSC, los estudios sobre la caña de azúcar se limitan a las decisiones de producción industrial y su interacción entre la biorefinería y los cultivos por medio de las operaciones de cosecha. Por otro lado, el 9% de los trabajos abarcan las operaciones de siembra y cosecha para el suministro de la producción industrial (Colin, 2009; Carvajal et al., 2019; Florentino et al., 2020). Estos artículos tienen una particularidad y es que son los únicos que involucran desempeño de los cultivos de caña de azúcar como variable que depende de las socas y la edad del cultivo; también, se incluye el ciclo de vida del cultivo desde la siembra y sus múltiples cortes. Adicionalmente, en la revisión sistemática realizada por Teixeira et al. (2021) se identifican solo tres artículos en los últimos 10 años en los cuales se involucran las actividades de siembra y cosecha (Carvajal et al., 2019; Florentino et al., 2020; Poltroniere et al., 2021).

Estos tres artículos reúnen diversas características sobre la SBSC. Por un lado, la selección de variedades propuesta por Florentino et al. (2020), en donde se consideran las fechas de siembra y cosecha, así como su impacto en la producción de caña de azúcar durante un ciclo de vida del cultivo. Así mismo, se incluyen las decisiones sobre un conjunto de lotes, y un rango de productividades variables dependiendo de las fechas de siembra y cosecha. Estos autores proponen un modelo de programación lineal entera mixta (MILP); sin embargo, debido a la complejidad computacional para obtener una solución, proponen un algoritmo genético para derivar soluciones en instancias reales del problema. Dicho trabajo se limita a maximizar la productividad de los cultivos sin considerar los

costos, inversiones, distancias, y un horizonte de planificación de mediano plazo. Por su parte, Colin (2009) incluye un modelo estratégico sobre el desarrollo del cultivo en un horizonte de planificación de largo plazo que involucra el desempeño variable del cultivo en función de las socas, que minimiza la desviación entre la caña producida y la requerida, con el fin de evitar la sobreproducción, o el desabastecimiento. Seguidamente, evalúa el impacto de la solución obtenida considerando los componentes de inversión, costos e ingresos, desde un enfoque de VPN.

En el trabajo publicado por Carvajal et al. (2019) como parte de los avances de investigación de esta tesis doctoral, se va un poco más allá, pues se estudia la integración de las decisiones de cultivo, cosecha, producción de semilla, renovación de cultivo y adquisición de tierras, involucrando el desempeño del cultivo variable, en función de la edad y la socas. Adicionalmente, se aplica un enfoque de valoración de las inversiones a largo plazo, optimizando el VPN de las inversiones, los costos, gastos e ingresos esperados, en un ambiente de incertidumbre sobre el rendimiento de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha. Dicho trabajo, identificó la importancia del desempeño variable de cultivo como un aspecto que genera gran valor a la SBSC y a la ASC de la caña de azúcar, asunto que ha sido poco estudiado. Así mismo, la vinculación entre las operaciones agrícolas, de siembra y cosecha, junto a las operaciones de producción industrial de manera sincrónica, fueron identificadas como un aspecto que requiere más investigación científica, lo cual se explica, por un lado, por los beneficios potenciales desde múltiples dimensiones; y por otro, la alta complejidad computacional que representa su modelación matemática.

1.3.3. Fuentes de incertidumbre en la ASC de la caña de azúcar y las SBSC

Con el objetivo de conocer el estado del arte respecto a las fuentes de incertidumbre que han sido estudiadas en el desempeño de las ASC de la caña de azúcar, y dar respuesta a la pregunta de investigación 2 (PI_2), se aplicó la ecuación de búsqueda 3 (EB_3), añadiendo el componente C_6 a la EB_1 , con la cual se obtuvo un conjunto de 20 artículos. En el Anexo B se agrupan las contribuciones que abordan las fuentes de incertidumbre que han sido estudiadas en las ASC de la caña de azúcar y, particularmente, en la SBSC. Allí se identifican las operaciones estudiadas, así como las fuentes de incertidumbre involucradas y los métodos de optimización utilizados para darle manejo al componente de incertidumbre.

Entre las fuentes de incertidumbre relevantes estudiadas en las ASC de la caña de azúcar, se destacan: tasa de producción en el eslabón de industrial (Mutran et al. 2020)); tiempos asociados a las operaciones de cosecha y transporte (Hahn & Ribeiro, 1999; Higgins & Davies, 2005) y rendimientos del cultivo durante las operaciones agrícolas (Pathumnakul & Nakrachata-Amon, 2015). Desde un punto de vista de los aspectos exógenos de la cadena, se identifican fuentes asociadas con la demanda y precios de venta de los productos; entre ellos, azúcar (Gilani & Sahebi, 2020), biocombustible (Kostin et al., 2012) y energía eléctrica (Guo et al., 2020). También, la duración de la temporada de cosecha, la cual incide directamente en la capacidad de producción de las instalaciones industriales y la capacidad de las operaciones agrícolas (Carvajal et al., 2019).

Adicionalmente, se encontró que la simulación de eventos discretos es una de las herramientas más utilizadas para abordar la incertidumbre en el diseño y gestión de las ASC de caña de azúcar y de la SBSC. Esta metodología se ha aplicado desde dos perspectivas de alcance, diferenciados por las operaciones incluidas en la SC. La primera considera las operaciones de cosecha y transporte de

caña (Hahn & Ribeiro, 1999; Higgins & Davies, 2005); en este se analizan los tiempos de transporte y las fechas de maduración para evaluar la secuenciación de las operaciones de cosecha, se asignan los recursos necesarios y se maximiza la productividad de caña en los cultivos. En Faria et al. (2015) se utiliza la simulación para evaluar el impacto causado por los planes de mantenimiento de maquinaria agrícola, sobre la operación de cosecha de caña de azúcar. En esta misma vía, Marin et al. (2017) abordan las incertidumbres del rendimiento de campo a través de simulación. Además, Pashangpour et al. (2018) consideraron la incertidumbre sobre el consumo de energía y sus impactos ambientales de las actividades de transporte de residuos de cosecha de caña de azúcar. Por su parte Matindi et al. (2018), estudiaron la incertidumbre en los rendimientos de campo en las operaciones de cosecha y transporte de caña de azúcar, las cuales son necesarias para la producción de biocombustibles y energía eléctrica; para resolver el problema planteado, se utilizó un enfoque híbrido entre simulación y metaheurísticas como método de solución.

La segunda perspectiva está conformada por un conjunto de contribuciones que involucran las operaciones de transporte, producción industrial e inventario. Furlan et al. (2012) consideran la incertidumbre sobre las tasas de producción de bio-combustibles. Cardoso et al. (2015) utilizan la simulación para evaluar la productividad de la SBSC en diferentes sistemas de abastecimiento de caña. Álvarez-Rodríguez et al. (2017) y Osaki & Selegim Jr (2017) abordan las incertidumbres sobre las tasas de producción en un enfoque de simulación por escenarios y el otro en un enfoque de optimización simulación, respectivamente. En adición, Mutran et al. (2020) estudiaron la incertidumbre sobre las tasas de producción y los precios de mercado utilizando un enfoque de simulación-optimización. Finalmente, el trabajo propuesto por Guo et al. (2020) estudian la simulación basada en agentes para involucrar las decisiones individuales de los actores de la cadena, así como la utilización de programación lineal entera mixta (MILP), incluyendo a la demanda y la disponibilidad de abastecimiento como fuentes de incertidumbre.

Otro de los enfoques utilizados para el manejo de las fuentes de incertidumbre corresponde a la programación por metas *Goal Programming*, (GP). Esta metodología es utilizada en el trabajo propuesto por de Oliveira Florentino & Pereira Sartori (2003), quienes abordan la incertidumbre sobre los rendimientos de campo, en términos de la materia seca contenida en los residuos de la cosecha, los cuales son utilizados para la producción de energía eléctrica. En el trabajo de Bhattacharya (2006), utilizan GP para darle manejo a las fuentes de incertidumbre generadas por el rendimiento de campo considerando diferentes factores del manejo agrícola, los cuales son usados para predecir el rendimiento de los cultivos. Adicionalmente, da Silva et al. (2015) estudian la incertidumbre sobre los rendimientos de campo en un enfoque de evaluación de selección de variedades de caña de azúcar durante las operaciones de cosecha y transporte. Por último, el trabajo propuesto por da Silva & Marins (2014) abordan los rendimientos de producción industrial a través de la lógica difusa embebida en la GP estocástica.

Finalmente, una de las técnicas menos utilizadas para manejar las fuentes de incertidumbre es la programación estocástica de dos etapas (*Two Stages Stochastic Programming*, **TSSP**). Este enfoque ha sido implementado por varios autores, principalmente en el diseño de las SBSC; no obstante, a excepción del trabajo de Carvajal et al. (2019), la mayoría excluyen el modelamiento de las operaciones agrícolas de producción de caña. En la investigación conducida por Kostin et al. (2012) se abordan las fuentes de incertidumbre sobre el precio y la demanda de los biocombustibles y el azúcar en Argentina. Pathumnakul & Nakrachata-Amon (2015) involucraron la incertidumbre del rendimiento de los campos en las operaciones de cosecha y transporte. Adam et al. (2016) consideran las tasas de producción respecto al azúcar, bioetanol y energía eléctrica generada, en un

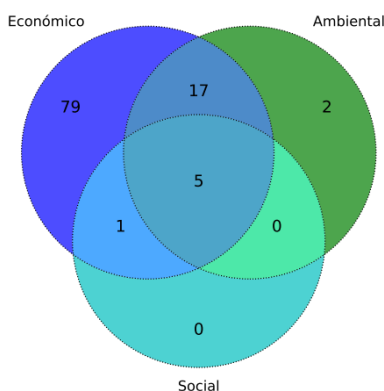
enfoque híbrido que involucra simulación de escenarios y metaheurísticas. Carvajal et al. (2019) estudian la SBSC de forma integrada junto a las fuentes de incertidumbre de rendimientos de campo y la duración de las temporadas de cosecha, en un enfoque que mezcla las cadenas de Markov y TSSP. Por último, Gilani & Sahebi (2020) proponen una variante del TSSP, conocida como programación posibilista, para estudiar las fuente de incertidumbre en el precio de venta y demanda, en el cual se abordan escenarios posiblemente infactibles.

Los hallazgos demuestran que, aspectos como el rendimiento del cultivo, las tasas de producción, tiempos asociados a las operaciones de cosecha y transporte, son las fuentes de incertidumbre que más han sido estudiadas en la literatura de las ASC de caña de azúcar y de la BSC. Para el caso de las operaciones de siembra, han sido abordadas a través de herramientas de simulación y de GP involucrando aspectos de rendimiento de cultivos, con excepción del trabajo de Carvajal et al. (2019), el cual es una contribución de esta tesis doctoral que propone un enfoque de programación estocástica de dos etapas. De igual manera, no se detectaron contribuciones que aborden las operaciones del componente agrícola, simultáneamente con fuentes de incertidumbre en los procesos de diseño y gestión de las cadenas de abastecimiento de caña de azúcar y las SBSC.

1.3.4. Perspectiva sostenible en las ASC en la caña de azúcar

Con el fin de identificar los avances de investigación desde la perspectiva sostenible en la ASC de la caña de azúcar y la SBSC, se utilizó la ecuación de búsqueda 4 (EB_4) que permitió redefinir la base de datos y seleccionar los artículos que involucran las dimensiones económicas, ambientales y sociales de la perspectiva sostenible. En la Figura 1-12 se puede observar el número de contribuciones para cada una de las dimensiones de la sostenibilidad. Como se observa, la mayor parte de los trabajos, el 77% (79 artículos), se han enfocado en la dimensión económica; el 16% (17 artículos) han considerado las dimensiones económica y ambiental de forma simultánea, y solo el 1% la dimensión social y económica.

Figura 1-12 Enfoque de desempeño sostenible en la cadena de suministro de la caña de azúcar y los biocombustibles



Fuente: Elaboración propia.

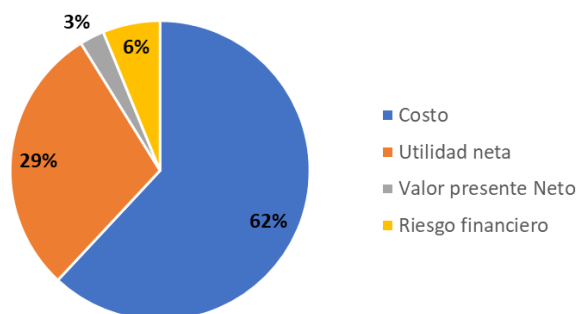
Se encontró que solo 5 artículos abordan las tres dimensiones de sostenibilidad en las ASC, evidenciando que aún existen oportunidades de investigación desde esta perspectiva. En esta vía, Hall et al. (2012) proponen un modelo conceptual para analizar la sostenibilidad en las SBSC como un elemento esencial para alcanzar las metas de desarrollo sostenible de la sociedad. En el trabajo

propuesto por van Eijck et al. (2014), se conduce un estudio comparativo de la producción de biocombustibles obtenidos a partir de diferentes tipos de tecnología y de materias primas. El análisis considera los beneficios y costos, los impactos por deforestación, los cambios en el uso del suelo que generan conflictos respecto a la seguridad alimentaria y la huella de tierra. Martínez-Guido et al. (2016) estudiaron el desempeño sostenible en el diseño y rediseño de la SBSC, considerando la dimensión económica desde el beneficio total de la cadena, la dimensión ambiental a través del LCA usando el eco-indicador 99; y la dimensión social por medio de la creación de puestos de trabajo a lo largo de la SC. Similarmente, Haj Hasan & Avami (2018) evaluaron el diseño de la SC de los biocombustibles de segunda generación a partir de residuos de biomasa. La perspectiva sostenible es evaluada a través de la optimización de los costos totales de la SC, emisiones netas (CO_2 equivalente), y la generación de puestos de trabajo.

Más recientemente, Guo et al. (2020) propusieron el diseño de la BSC desde la LCA en un enfoque multi-criterio, usando técnicas de simulación – optimización. Este trabajo considera la optimización de los costos, las emisiones equivalentes de CO_2 ; y la creación de puestos de trabajo. Gilani & Sahebi (2020) también estudian la SBSC global optimizando la utilidad neta, el LCA y la generación de empleos bajo los efectos de la incertidumbre. Finalmente, Morales-Chavez et al. (2020) involucra decisiones operativas de cosecha y transporte de caña de azúcar, haciendo uso de la programación compromiso para encontrar la solución balanceada entre los costos operacionales, la generación de GHG y la creación de puestos de trabajo.

La dimensión económica corresponde a la función objetivo que más ha sido usada entre los trabajos identificados respecto al diseño y gestión de las ASC de la caña de azúcar y la SBSC. La minimización de los costos de operación ha sido la métrica más usada con el 62% del total de artículos, los cuales consideran decisiones tácticas y operativas en la cadena. La maximización de la utilidad neta es el siguiente indicador más recurrente, 29% de los casos; estos trabajos estudian decisiones de tipo estratégico de diseño o rediseño de la cadena. Con menor frecuencia, están los indicadores sobre la minimización de riesgo financiero abordado por el 6% de los artículos, también asociados a decisiones de diseño de la SC. Finalmente, el 3% de las contribuciones investigan el VPN de la utilidad neta para modelos de diseño de la cadena en un ambiente multi-periodo (ver *Figura 1-13*). Aunque en la literatura de las SC existe una tendencia de abordar el valor económico agregado (EVA) como un indicador de sostenibilidad financiera (Longinidis et al., 2015; Jin et al., 2017; Polo et al., 2018; Jahani et al., 2019), no se logró identificar ninguna contribución al respecto en el contexto de las SBSC.

Figura 1-13 Distribución de los indicadores económicos abordados en al SBSC y las ASC de caña azúcar



Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista de la dimensión ambiental, se encontraron los trabajos de Ferreira et al. (2020), Pereira et al. (2020) y Shafie et al. (2020), quienes proponen modificaciones y ajustes en los procesos industriales para obtener mayores eficiencias en la producción de biocombustibles, reduciendo el nivel de emisiones equivalentes. De igual manera, algunos autores han propuesto incrementar la producción de biocombustibles y energía por cogeneración eléctrica del bagazo, considerando la recolección de la biomasa del campo (residuo de cosecha), así como el residuo de la caña de azúcar (luego de la extracción del jugo) (Mishoe et al., 1979; Sartori et al., 2001; de Oliveira Florentino & Pereira Sartori, 2003; De Oliveira Florentino et al., 2011; de Oliveira Florentino & Pato, 2014).

En esta misma línea, el trabajo de Mallawaarachchi & Quiggin (2001) propone un modelo para la asignación de cultivos de caña de azúcar, balanceando los costos de producción agrícola y la protección del ambiente, involucrando la deforestación y los impactos por contaminación. Qureshi et al. (2008) estudian el aprovechamiento de aguas marítimas y subterráneas para la irrigación de cultivos de caña de azúcar, con el fin de proteger acuíferos de gran valor ambiental y social. Adicionalmente, la dimensión ambiental se ha estudiado desde los impactos generados por las actividades de la ASC y SBSC por medio de la metodología LCA, balanceando los impactos ambientales y la rentabilidad económica de la cadena. Este tipo de enfoques han sido implementados por Mele et al. (2011), Santibañez-Aguilar et al. (2014) y Macowski et al. (2020) a través de la valoración potencial de calentamiento global en un horizonte de 100 años (*GWP100*), el eco-indicador 99 (*EI99*) y la metodología ReCiPe, respectivamente.

Dado el potencial de los residuos de cosecha y el bagazo de caña de azúcar, algunos autores han estudiado los beneficios económicos y ambientales del aprovechamiento de estos residuos para la producción de biocombustibles (2G), así como energía eléctrica por cogeneración (Khatiwada et al., 2016; Rivera-Cadavid et al., 2019). Similarmente, el trabajo propuesto por Mutenurea et al. (2016) considera la localización de instalaciones para la producción de biocombustibles a partir de residuos de caña de azúcar, al mismo tiempo que minimiza las emisiones y el gasto energético en las operaciones de transporte de materia prima. Shafie et al. (2020) proponen un modelo para la localización de instalaciones para la producción de electricidad por cogeneración de residuos agrícolas, minimizando el costo total y las emisiones totales de GHG.

Recientemente se pudieron identificar algunos trabajos que abordan la producción de biocombustibles desde la perspectiva ambiental y económica. Gnansounou et al. (2020) proponen diferentes escenarios de evaluación con el objetivo de cumplir las necesidades energéticas para el sistema de transporte de pasajeros utilizando biocombustibles (2G) y electricidad. Macowski et al. (2020) realizaron una evaluación estratégica de la SC del azúcar y de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar en Brasil, buscando encontrar la mejor combinación de tecnologías de producción (plantas duales, producción de etanol, azúcar), que optimicen el valor desempeño económico y los impactos ambientales, mediante la metodología ReCiPe. Mutran et al. (2020) proponen un modelo que selecciona el tipo de tecnología para la producción de bioenergía, bioetanol y energía eléctrica, optimizando el valor esperado del beneficio neto, y minimizando el valor en riesgos; adicionalmente, recomienda la utilización del bagazo de caña para la producción de energía eléctrica para garantizar la viabilidad económica.

Respecto a la dimensión social en el campo de las SC, la generación de puestos de trabajo parece ser la métrica más usada (Eskandarpour et al., 2015; Barbosa-Póvoa et al., 2017). El trabajo de Mota et al. (2015) establece que en la dimensión social prevalecen las publicaciones de tipo conceptual,

y que existen rezagos notorios desde el enfoque cuantitativo. Este mismo comportamiento se encontró con relación a las ASC de la caña de azúcar y la SBSC, para las cuales la dimensión social ha sido escasamente estudiada. Además, todas contribuciones identificadas por la EB_4 en donde se consideraron aspectos sociales, se basaron únicamente en la creación de puestos de trabajo. Por tanto, el estado del arte revela que la dimensión social en las ASC de caña de azúcar y en la SBSC, es un tópico que requiere más investigación, especialmente vinculando los impactos sociales relacionados con diferentes grupos de interés (Eizenberg & Jabareen, 2017; Govindan et al., 2020; Messmann et al., 2020).

En síntesis, se logró identificar un conjunto de trabajos que han abordado las ASC de la caña de azúcar y las SBSC desde una perspectiva sostenible, ya sea que hayan incluido algunas de las dimensiones, de manera individual o simultánea. Se identificó que predomina la dimensión económica, sobre la ambiental y social, y que la ambiental ha sido más estudiada que la social. Además, se encontró que la dimensión económica ha sido estudiada desde los costos de operación, la utilidad neta y el VPN del beneficio económico; la dimensión ambiental se ha considerado desde el aprovechamiento de los residuos, la minimización de las emisiones de GHG, y a través del análisis del ciclo de vida de los impactos LCA; y, respecto a la dimensión social, desde la generación de puestos de trabajo. Por otro lado, se detectó un reducido número de contribuciones que aborden las tres dimensiones del desempeño sostenible, aspecto que también requiere mayor investigación en el contexto de las SBSC. Por último, no se identificaron contribuciones respecto al diseño de cadenas de abastecimiento de biocombustibles que aborden las tres dimensiones del desempeño sostenible y que, adicionalmente, aborden las operaciones agrícolas de la producción de caña de azúcar de manera simultánea con las operaciones de la biorefinería.

1.3.5. SBSC sostenibles considerando los efectos de la incertidumbre

Finalmente, la última pregunta de investigación PI_4 reúne todos los componentes temáticos de la revisión de literatura tal como se presenta en la Figura 1-9. Luego de ejecutar la búsqueda solo se detectaron dos artículos que involucran el diseño de las SBSC desde la perspectiva del desempeño sostenible bajo fuentes de incertidumbre (Gilani & Sahebi, 2020; Guo et al., 2020). Aunque estas contribuciones abordan la SBSC, no consideran las operaciones del eslabón agrícola. Para el caso de Gilani & Sahebi (2020), las decisiones de la SBSC involucran el transporte de caña, la localización y capacidad de biorefinerías y centros de acopio y la distribución a los diferentes centros de demanda; además, optimizan el desempeño sostenible por medio del balance entre la maximización del beneficio económico, la minimización de las emisiones de CO_2 equivalentes y la maximización de la creación de puestos de trabajo; por último, tienen en cuenta varias fuentes de incertidumbre sobre los precios de venta del bioetanol y su demanda. Por otro lado, Guo et al. (2020) estudiaron la SBSC desde las operaciones de transporte, localización y producción y distribución de bioetanol, considerando fuentes de incertidumbre en el abastecimiento, la demanda. En dicho trabajo se optimizó el ciclo de vida de la sostenibilidad en sus dimensiones de costo, impacto ambiental y social, mediante un enfoque multi-criterio.

Teniendo en cuenta estas dos contribuciones, es posible establecer que existen múltiples aspectos que no han sido abordados aun en la modelación matemática de SBSC y que, por tanto, ofrecen oportunidades de investigación. Algunas de ellas, son los siguientes:

- 1) Estudiar las operaciones agrícolas para la producción de caña de azúcar de manera simultánea con las decisiones de la biorefinería.

- 2) Considerar un horizonte de planificación que incluya el periodo de inversión sobre el diseño de las SBSC.
- 3) Analizar el efecto de fuentes de incertidumbre relacionadas con las condiciones climáticas sobre las decisiones estratégicas de la cadena.
- 4) Valorar el impacto de las inversiones en el flujo de caja y su apalancamiento por medio de fuentes de financiación, las cuales repercuten en el desempeño económico y en la sostenibilidad financiera de los accionistas.
- 5) Evaluar la dimensión social desde múltiples factores que incluya las afectaciones a grupos sociales.
- 6) Evaluar el diseño de la SBSC en ambientes de incertidumbre y desde la perspectiva de sostenibilidad.

1.4. Conclusiones parciales e identificación de vacíos de conocimiento

Con base en la revisión de los aspectos conceptuales y contextuales, así como en la identificación del estado del arte en torno a las BSC y las SBSC, las conclusiones más relevantes son las siguientes:

1. A lo largo del marco conceptual se establecieron los dominios teóricos de la situación problemática estudiada y se logró evidenciar la relevancia de estudiar las operaciones agrícolas de la caña de azúcar y la producción de bioetanol, de manera conjunta. De igual manera, se identificaron los efectos de múltiples fuentes de incertidumbre sobre el desempeño sostenible en las BSC y cómo la vinculación de estos factores afecta el nivel de complejidad matemática del diseño y gestión de la cadena desde la perspectiva de las ASC.
2. Por medio de la ubicación contextual de la situación problemática respecto a su descripción en términos de la SBSC, decisiones estratégicas y tácticas, incertidumbres, medidas de desempeño sostenibles y el marco legal, se logró develar la necesidad de abordar el diseño y gestión de operaciones de la SBSC desde la perspectiva sostenible en los procesos de planificación y evaluación de nuevos proyectos de inversión.
3. En la revisión sistemática de la literatura se detectaron múltiples vacíos de conocimiento en el estudio del diseño de la SBSC, particularmente en la integración de operaciones de los eslabones agrícola e industrial, el alcance de las decisiones a nivel estratégico y táctico, así como la consideración de los rendimientos de campo en función de la edad de los cultivos de caña. En ese sentido, múltiples autores de la literatura coinciden en que abordar estos aspectos de forma simultánea conlleva a beneficios económicos y ambientales para aumentar la productividad de la cadena, su eficiencia económica, la reducción de los desperdicios y de impactos ambientales; por lo que es imperativo tener en cuenta el eslabón agrícola e industrial de manera conjunta en el proceso de diseño y gestión de operaciones de la SBSC.
4. Por otro lado, las fuentes incertidumbre son un aspecto que afecta los procesos de planificación estratégica de la SBSC de manera significativa. Principalmente, se han abordado fuentes de variabilidad asociadas a tasas de producción, demanda y a los precios de venta. No obstante, fenómenos de incertidumbre que afecten tanto las operaciones agrícolas y las industriales de manera simultáneas, tales como las condiciones climáticas, no han sido considerados, y más aún cuando este tipo de afectaciones han sido identificadas como críticas para la SBSC. Respecto a la complejidad computacional al modelar las fuentes

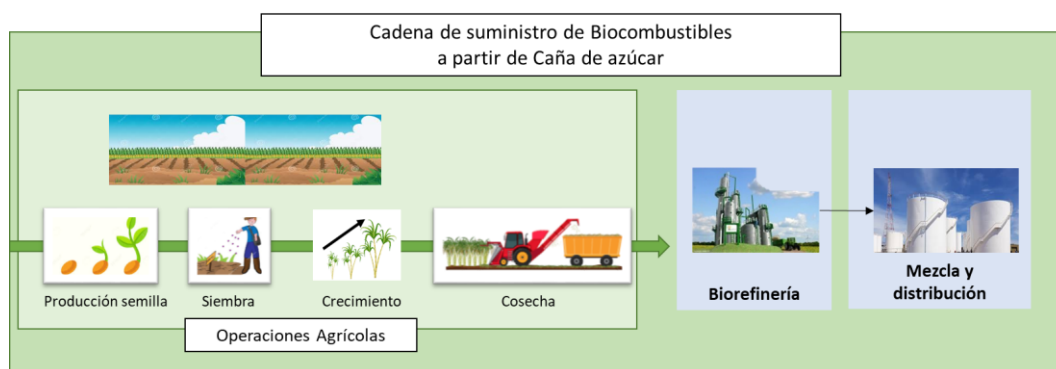
de incertidumbre en la SBSC, se detectó que han sido limitados los avances en este campo, a pesar de que enfoques de programación estocástica de dos etapas (TSSP) se han estudiado en el diseño de la SBSC, aunque con rezagos respecto a la generación de escenarios. Sin embargo, enfoques de simulación-TSSP pueden ayudar en la reducción de la complejidad computacional, generándose una oportunidad de investigación promisorio para las SBSC.

5. Otro de los aspectos es la perspectiva sostenible en el SBSC, la cual se identifica como una línea de investigación poco estudiada, particularmente, respecto a las dimensiones económica y social. Respecto a la dimensión económica prevalece la necesidad de considerar el diseño de la SBSC desde un enfoque de sostenibilidad financiera en el largo plazo; esto incluye la estrategia de financiación de todas las inversiones y su impacto en el flujo de caja; al igual que la fase de inversión en el horizonte de planeación, durante la cual se desarrollan las inversiones y se ven afectados los ingresos.
6. La dimensión ambiental ha tenido un estudio más amplio. A pesar de esto, no se logró identificar contribuciones que involucren las operaciones agrícolas de la producción de caña de azúcar; por lo tanto, se requiere mayor investigación respecto al estudio del impacto ambiental (LCA) de la SBSC incluyendo al eslabón agrícola. Por último, la dimensión social es una de los indicadores menos estudiados en este contexto; por un lado, al ser investigado por un número reducido de contribuciones; y por el otro, solo se tiene en cuenta la generación de puestos de trabajo. Lo anterior evidencia la necesidad de conducir estudios respecto a la sostenibilidad social de la SBSC desde múltiples factores que abarquen a los diversos grupos sociales que se pueden ver afectados a lo largo de la cadena.
7. Aunque se encontraron estudios que involucran la integración de decisiones, el desempeño sostenible y las fuentes de incertidumbre en el diseño y gestión de las SBSC, aún existen múltiples líneas de investigación abiertas, principalmente en la integración de las decisiones estratégicas y tácticas del eslabón agrícola y la biorefinería. Aspectos fuertemente relacionados con los cultivos de caña de azúcar, que afectan de manera general la cadena de abastecimiento, no han sido considerados como fuentes de incertidumbre, tales como las condiciones climáticas que afectan la duración de la temporada de cosecha y el rendimiento del cultivo de caña de azúcar. Finalmente, el desempeño sostenible presenta múltiples desafíos respecto a las dimensiones económica y social.

2. Capítulo 2. Formulación matemática del problema

Considerando los vacíos de conocimiento previamente detectados, en este capítulo se presenta un enfoque de modelamiento de las decisiones relacionadas con el diseño y gestión de la cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar (**SBSC**, *Sugarcane based Biofuel Supply Chain*), incluyendo las operaciones del eslabón agrícola (ver Figura 2-1). Además, se abordan todas las dimensiones del desempeño sostenible, al igual que algunas fuentes de incertidumbre que afectan de manera transversal la SBSC. Dicha cadena se compone de múltiples eslabones desde la producción agrícola hasta el consumidor final. Sin embargo, esta tesis doctoral delimita su estudio a los eslabones agrícolas y la biorefinería (BR), su interacción y los actores más representativos.

Figura 2-1 Cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de caña de azúcar



Fuente: Elaboración propia.

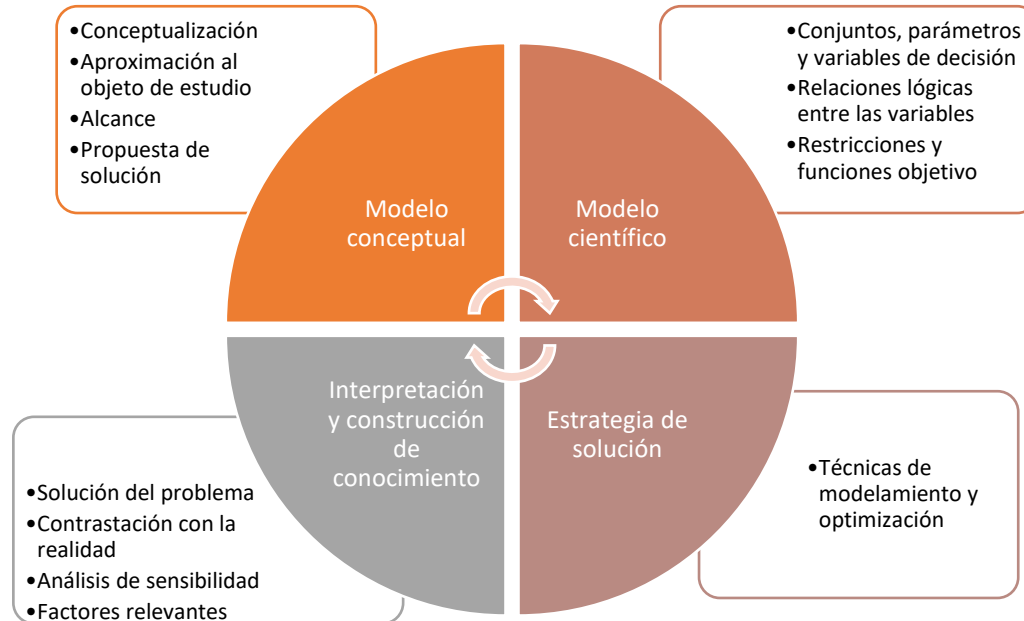
Este trabajo aborda la problemática identificada desde la perspectiva de la investigación de operaciones como campo disciplinar, la cual, a su vez, se caracteriza por seguir un proceso axiomático y normativo. Por lo tanto, desde el punto de vista metodológico, se propone una serie de pasos con miras a resolver el problema científico planteado en esta tesis doctoral. Este proceso se compone de: construcción del modelo conceptual, construcción de un modelo científico, diseño de una estrategia de solución y, por último, interpretación y construcción de conocimiento (ver Figura 2-2).

La primera fase, relacionada con el modelo conceptual, se ha abordado en el Capítulo 1, en el cual se definieron las bases teóricas en torno a la SBSC. Adicionalmente, por medio de un trabajo de campo, se realizó la aproximación al objeto de estudio, se estableció el alcance del estudio y se construyó el modelo conceptual. Seguidamente, se propone el modelo matemático, el cual instrumentaliza el modelo conceptual por medio de la identificación de sus elementos constitutivos (conjuntos, parámetros y variables de decisión), así como las relaciones lógicas que emergen de la interacción de los elementos del sistema, representadas por medio de restricciones y sus medidas de desempeño. El siguiente paso de la metodología propuesta, se enfoca en la estrategia de solución, en el cual se involucra una serie de técnicas para resolver los modelos matemáticos buscando una solución óptima. Finalmente, en la fase de interpretación y construcción de conocimiento, se discuten los resultados y los factores relevantes que inciden en el diseño y gestión

de operaciones de la SBSC.

En ese sentido, el modelo conceptual y los modelos matemáticos se han orientado a validar la hipótesis de investigación planteada, respecto al diseño y gestión de la SBSC con miras a la optimización de su desempeño desde la perspectiva de sostenibilidad en presencia de fuentes de incertidumbre. Todo ello, considerando la complejidad computacional que emerge del propio proceso de modelación.

Figura 2-2 Proceso metodológico de investigación propuesto



Fuente: Adaptado de Bertrand & Fransoo (2002) y Sørensen & Bochtis (2010)

2.1. Modelo conceptual propuesto para abordar el diseño y gestión de operaciones de la SBSC.

Como parte inicial del proceso de construcción del modelo conceptual, se surtió una fase de aproximación al objeto de estudio, por medio de un trabajo de campo en el cual se indagó, de manera exhaustiva, la información relevante del sistema. Durante este proceso se tuvo acercamiento con la gerencia agrícola, el coordinador agrícola, el coordinador de cosecha, la gerencia industrial (de la BR) y la dirección de investigación agrícola de una empresa cultivadora de caña de azúcar con fines de producción de biocombustibles en Colombia. Esta etapa del proceso consistió en la extracción de información que permitiera establecer las operaciones involucradas, la maquinaria requerida, los elementos constitutivos del sistema, así como las limitaciones medioambientales que afectan la planeación y operación de la cadena. El estudio involucró una serie de entrevistas con los diferentes involucrados, reuniones sistemáticas para la identificación de un proceso estandarizado que fuera representativo para el sistema.

La evaluación de la información recolectada fue suficiente para el desarrollo del modelo, recopilando la información técnica sobre las actividades agrícolas, las eficiencias de las operaciones agrícolas y de transporte de caña, así como los rendimientos operativos a escala industrial en el

procesamiento de caña de azúcar para la producción de biocombustibles, energía eléctrica y biofertilizantes. Adicionalmente, se determinaron los niveles de costo para las múltiples operaciones y las inversiones necesarias a nivel agrícola e industrial. Por otro lado, con el equipo de la empresa se identificaron las actividades, procesos y decisiones relevantes en el diseño de la SBSC para el eslabón agrícola y para el componente industrial. Las decisiones relevantes se determinaron de manera aislada con cada uno de los actores, debido a que, para cada eslabón, existe una prioridad diferente, las cuales fueron conciliadas en un único modelo.

2.1.1. Definición del alcance del sistema

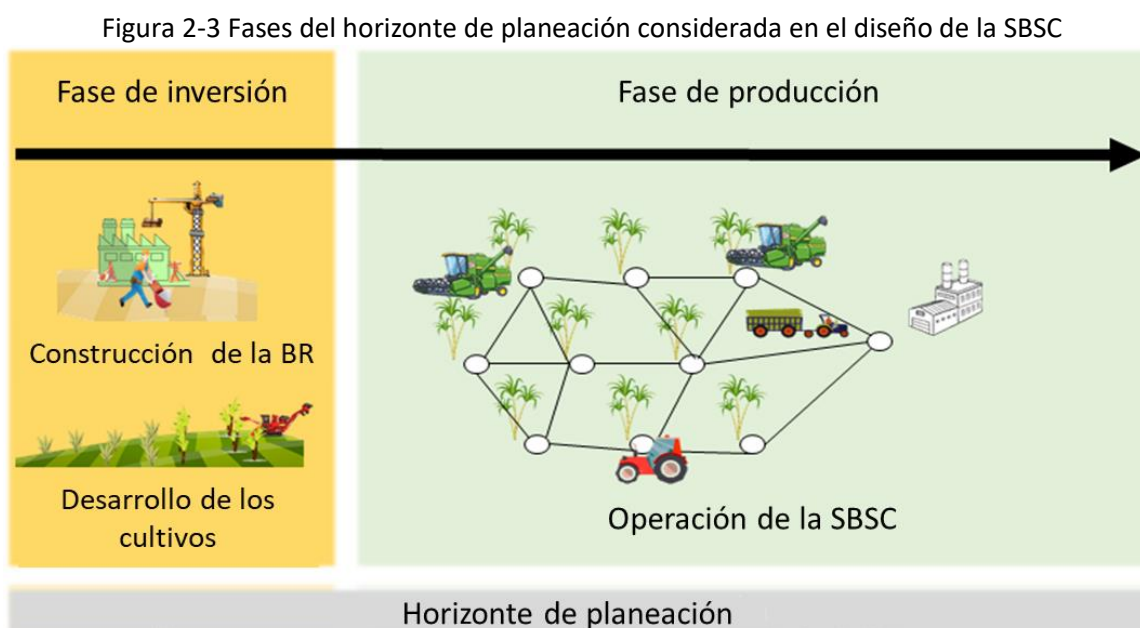
La SBSC en su eslabón agrícola se aborda las operaciones de siembra y cosecha de caña de azúcar; en este eslabón también se produce semilla como insumo para las operaciones de siembra. Además, se deben considerar variables en torno al crecimiento de la caña considerando la edad y las socas que componen el ciclo de vida del cultivo. Así mismo, se considera el eslabón de producción industrial por medio de la biorefinería (BR), involucrando las decisiones de procesamiento de caña y obtención de biocombustibles, energía eléctrica y biofertilizante. Luego que el biocombustible es producido, éste se convierte en un insumo para la cadena de abastecimiento de gasolina, por lo tanto, el eslabón de mezcla y distribución no fueron considerados en las decisiones de diseño y gestión de la SBSC en la presente investigación, pues el objetivo era concentrar el proceso de modelación en los aspectos detallados de la integración entre los eslabones agrícola e industrial.

Las operaciones que generan el relacionamiento entre estos dos eslabones, son la cosecha y transporte de caña de azúcar, los cuales establecen el nivel de suministro de materia prima para la producción de biocombustible. Por un lado, la cantidad de caña cosechada y transportada depende de las operaciones “aguas arriba”, el desempeño de los campos agrícolas y la temporada de cosecha. Por el otro, toda la operación de la BR depende del suministro total efectuado durante la temporada de cosecha. En este sentido, el diseño de una SBSC implica que sean evaluadas decisiones estratégicas y tácticas para los eslabones agrícola e industrial con el fin de establecer la estructura necesaria y planificar los flujos de materiales, dinero e información. Dado lo anterior, es posible reconocer la importancia del rendimiento del cultivo y la temporada de cosecha sobre el diseño y gestión de la SBSC. Sin embargo, estos dos aspectos se consideran altamente afectados por cuenta de las condiciones climáticas exhibidas durante el horizonte de planificación.

El nivel de lluvia es el aspecto más representativo de las condiciones climáticas respecto a la afectación sobre el rendimiento del cultivo y la temporada de cosecha. El cultivo se beneficia al recibir un régimen alto lluvia, pero puede llegar a afectarse en épocas secas. De manera contraria, la duración de la temporada de cosecha se amplía si se presenta niveles de lluvia reducida, pero se reduce con alta cantidad de precipitación. Adicionalmente, la lluvia presenta registros variables en los diferentes periodos del año; aunque no existe certeza absoluta, dado que los registros mensuales de precipitación varían para cada periodo. Sin embargo, sí es posible identificar un patrón de comportamiento estacional. Teniendo en cuenta lo anterior, en esta investigación se incorporó la condición climática como una fuente de incertidumbre que afecta de manera transversal a la SBSC y que debe ser tomada en cuenta el proceso de planificación de la cadena. Otras fuentes de incertidumbre identificadas son: la adaptabilidad del cultivo, los precios de la tierra, el tiempo de construcción de la biorefinería y los precios de los biocombustibles.

El horizonte de planeación se ha reconocido como un aspecto relevante en los procesos de diseño de SBSC por considerar múltiples inversiones en el tiempo que afectan el desempeño de la cadena.

En el capítulo anterior se identificó que la fase de inversión, tiempo en el cual se construye la BR y se desarrollan los cultivos de caña, no ha sido abordada en trabajos previos orientados al diseño de la SBSC. Dado que el tiempo de siembra y la construcción de la BR afectan el desempeño económico de la cadena, esta tesis doctoral aborda un horizonte de planeación que involucra dos fases: fase de inversión y fase de producción (ver Figura 2-3). Durante la fase de inversión, de forma simultánea, se desarrollan los cultivos y se construye la BR en un periodo de tiempo determinado. En esta fase es importante sincronizar el desarrollo de los cultivos de caña de azúcar de tal manera que cuando la BR esté construida, la materia prima tenga la madurez adecuada para iniciar las operaciones de suministro de biomasa. En la segunda fase, la BR comienza a operar y se debe mantener un suministro de caña permanente por parte del eslabón agrícola. Además, durante esta fase se generan ingresos por ventas, lo cual permite apalancar las operaciones con capital de trabajo, así como la generación de excedentes para apalancar las inversiones realizadas. Adicionalmente, en esta etapa, también se generan la mayoría de los impactos ambientales y sociales que conlleva la operación de la SBSC.



Fuente: Elaboración propia.

Como se logró identificar el desempeño sostenible es una perspectiva necesaria para abordar el diseño y gestión de la SBSC, en sus dimensiones económicas, ambientales y sociales. Inicialmente, se maximiza el valor presente (VP) de los índices EVA (Valor Económico Agregado) exhibido en los múltiples periodos del horizonte de planeación. La elección de este indicador se fundamenta en la efectividad que tiene el EVA para ofrecer una solución que balancea la eficiencia económica de los flujos de ingresos y costos de capital de trabajo, los costos de inversión, las estrategias de financiación y la rentabilidad para los accionistas (Longinidis et al., 2015; Polo et al., 2018; Jahani et al., 2019). En ese sentido, es posible encontrar en este indicador una medida de beneficio económico perdurable en tiempo.

Respecto a la dimensión ambiental, se utilizó el LCA como herramienta de medición y valoración, de manera holística, del nivel de riesgo a nivel ecológico, la salud humana y el agotamiento de recursos. Estos impactos en el medio ambiente son ocasionados por las actividades llevadas a cabo durante

la operación de la SBSC, entre ellas: el establecimiento de los cultivos de caña de azúcar, la cosecha mecanizada y el transporte de caña, la producción industrial y la distribución de biocombustible. Diferentes factores de contaminación y toxicidad son reconocidos en este tipo de agroindustria, entre los de mayor impacto y relevancia, es posible mencionar los siguientes (Ometto et al., 2009; Meza-Palacios et al., 2019):

- **El potencial de generación de calentamiento global**, relacionado con la generación de emisiones de CO_2 equivalente para cada una de las actividades representativas de la cadena.
- **El consumo de agua dulce**, respecto a la utilización directa de cuerpos naturales de agua afectando los ciclos naturales.
- **La eutrofización de cuerpos de agua dulce**, relacionado con la contaminación de cuerpos de agua, por el lavado de vehículos, la escorrentía de los cultivos con fertilizantes, entre otros, los cuales aumentan la carga de materia orgánica en los cuerpos de agua, aumentando la demanda química y orgánica de oxígeno, aspecto que afecta la biodiversidad acuática
- **La afectación a la capa de ozono**, por la emisión de GHG que aceleran el agotamiento, lo que se traslada en efectos nocivos a salud humana y animal
- **La utilización de tierras agrícolas** las cuales afectan directamente la vida silvestre al desplazar la fauna presente y la destrucción de la flora autóctona por el establecimiento de cultivos.

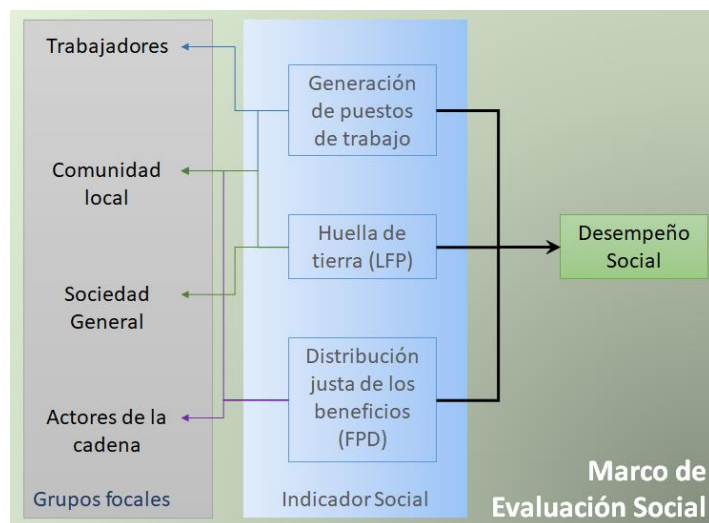
Luego en la fase de valoración e interpretación para los múltiples impactos ambientales se realizó un cálculo estandarizado, por medio de la metodología ReCiPe2016 (Huijbregts et al., 2017). En consecuencia, se obtienen las mediciones sobre los impactos para cada una de las actividades y, junto con el factor de escalación, se calcula el impacto ambiental global generado por la operación de la SBSC, el cual se desea minimizar.

Desde la dimensión social se pueden identificar múltiples grupos focales o comunidades que pueden llegar a ser afectados por la operación de la SBSC; entre otros, los trabajadores, la comunidad local, la sociedad general y los actores de la cadena de abastecimiento, tal como se muestra en la Figura 2-4. Uno de los indicadores más representativos para el evaluar el impacto social ha sido la generación de puestos de trabajo, el cual tiene mayor impacto a la comunidad local, favoreciendo el desarrollo económico de las comunidades rurales, lugar donde se lleva a cabo la operación de la SBSC (Govindan et al., 2020). Este indicador es significativo para las cadenas agrícolas, las cuales ejecutan sus operaciones en zonas rurales que tienen índices bajos de desarrollo económico, bajo nivel de acceso a sistemas de salud, entre otros.

Por otro lado, la huella de tierra es otro de los factores que afecta la comunidad local y la sociedad general. La huella de tierra se define como la cantidad de tierra utilizada para generar una actividad por unidad de tiempo. El uso de tierra tiene diferentes connotaciones, desde lo estético, económico y ecológico (Haberl et al., 2004); sin embargo, tienen un mismo efecto, el cual corresponde a la degradación del suelo, en términos de su calidad y la pérdida del ecosistema (Haberl et al., 2004; Liobikiene et al., 2019). Desde el punto de vista de la sostenibilidad, es posible relacionar la minimización de huella de tierra para la producción de múltiples productos obtenidos por medio de biomasa, en términos ambientales y sociales (Davis et al., 2016; Barrett, 2021). Desde el punto de vista social, la seguridad alimentaria puede ser abordada desde la minimización de la cantidad de tierra cultivada, y en especial para el caso de los biocombustibles, dado que, al reducir la cantidad

de tierra usada en la SBSC, es posible aportar a la seguridad alimentaria. Lo anterior significa que la reducción del uso de tierras arables con fines energéticos, libera predios que pueden ser aprovechados en la producción de alimentos para la región (Morales Chávez et al., 2018). Igualmente, la minimización de la huella de tierra aporta en reducir el dilema ético del aprovechamiento de cultivos alimentarios para la producción de energía (van Eijck et al., 2014).

Figura 2-4 : Estructura del desempeño social y la relación con los grupos sociales de la SBSC



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se detectaron múltiples contribuciones que han abordado el diseño de la SBSC buscando la solución óptima, en términos de la reducción de costos o maximización de beneficios económicos, por medio del enfoque centralizado (Higgins et al., 2007; Plà et al., 2014; de Oliveira Florentino et al., 2018, 2020). Sin embargo, en escenarios reales, los actores de la cadena de suministro se comportan de manera independiente en función de sus propios intereses económicos (Liu et al., 2007; Gao & You, 2019). En ese sentido, el enfoque centralizado en el diseño de la SBSC puede llevar a soluciones de insatisfacción de algunos de los miembros, debido a una distribución de los beneficios de manera injusta, en especial para los pequeños cultivadores, quienes carecen de acceso a la información de la cadena y exhiben un bajo poder de negociación.

En contraste, y desde la perspectiva de la sostenibilidad social, se ha venido desarrollando una corriente de investigación que propone un enfoque de distribución justa de beneficios económicos (**FPD**, *Fairness Profit Distribution*) para soportar las decisiones de diseño de la SC, las cuales tienden a mejorar los beneficios individuales, en un marco de justicia económica para los miembros de la cadena (Yue & You, 2014; S. Liu & Papageorgiou, 2018; Zheng et al., 2019). En consecuencia, el enfoque FPD contribuye a la dimensión social de la sostenibilidad para el diseño y gestión de las SC, al permitir un ambiente de equidad y justicia en las interacciones entre los miembros de la cadena y garantizando la subsistencia de cada uno de ellos. Dado que los miembros de la cadena son uno de los grupos focales identificados en la SBSC, es necesario incluir la maximización del FPD como un indicador prioritario dentro de la evaluación del desempeño social. En ese sentido, el FPD busca garantizar el bienestar económico de los granjeros, quienes, con mayor frecuencia, están expuestos a riesgos por condiciones climáticas y reciben un menor nivel de utilidad; igualmente, es necesario garantizar el beneficio económico de la BR y el cumplimiento de la demanda de biocombustibles.

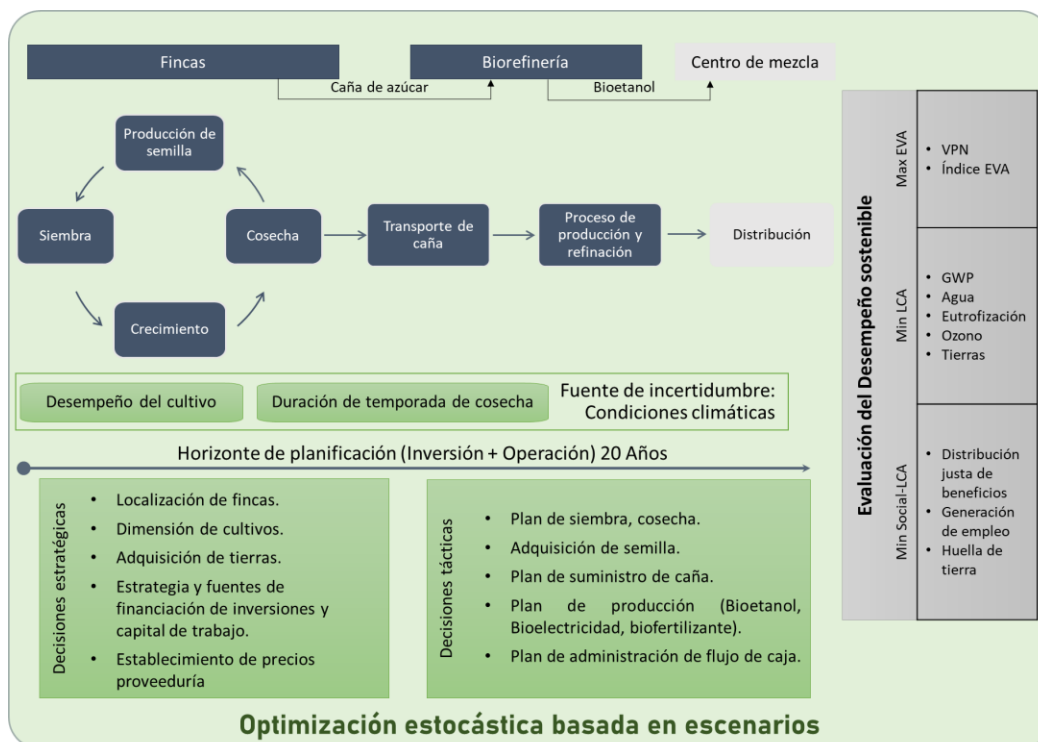
Con base en lo anterior, se aplicó la metodología de Social-LCA con el fin de involucrar múltiples impactos ocasionados por las actividades de las SBSC sobre los diversos grupos sociales alrededor de la cadena (trabajadores, comunidad local, sociedad general y actores de la cadena). En consecuencia, el Social-LCA define un marco de evaluación de impactos sociales con base en tres indicadores presentes en la Figura 2-4, los cuales están orientados hacia maximizar la generación de puestos de trabajo, minimizar la huella de tierra de la producción de biocombustibles y maximizar la distribución justa de los beneficios económicos entre los actores de la cadena. Además, estos capturan los impactos sociales sobre los grupos focales identificados. Por otro lado, con el fin de obtener una medición estandarizada del desempeño social, se propone relacionar las métricas propuestas, por medio de un modelamiento que involucra niveles de importancia, así como reducción de variaciones respecto a límites deseables, y así, mediar entre las direcciones de optimización que se encuentran en conflicto.

2.1.2. Modelo conceptual y su relación con los modelos matemáticos propuestos

Una vez definido el alcance de la SBSC, en términos de sus decisiones, operaciones y actores involucrados, en esta subsección se propone un modelo conceptual que permite reunir las decisiones relacionadas con el diseño y gestión de la SBSC, optimizando el desempeño sostenible en un horizonte de planificación, considerando un periodo de inversión y otro de operación. Además, se consideran las fuentes de incertidumbre asociadas a las condiciones climáticas. Una de las ventajas del modelo conceptual es que permite guiar la construcción de los modelos matemáticos, así como la verificación técnica y la validación respecto a las condiciones reales que representan el caso de estudio. En la Figura 2-5 se presenta el modelo conceptual que conforma un marco general de trabajo para la construcción de la propuesta de solución y con la cual se pretende comprobar la hipótesis de investigación. El modelo involucra la optimización estocástica basada en escenarios como estrategia de optimización, con el fin de abordar las fuentes de incertidumbre, la naturaleza multi-objetivo de la evaluación del desempeño sostenible y reducir la complejidad computacional que exhibe el caso de estudio analizado.

El modelo conceptual abarca la cadena de suministro teniendo en cuenta dos eslabones principales: las fincas productoras de caña de azúcar, y la BR encargada de procesar la caña y producir el bioetanol, la energía eléctrica y el bio-fertilizante. Las operaciones estudiadas son la producción de semilla, la siembra de caña, el crecimiento del cultivo (inventario de biomasa), la cosecha de caña, el transporte y el proceso de producción industrial en la BR. Así mismo, se involucran una serie de decisiones estratégicas y tácticas para ambos eslabones en un horizonte de tiempo que incluye el periodo de inversión para la construcción de la BR y el desarrollo de cultivos, y el periodo de operación en el cual las fincas y la BR se sincronizan en las actividades de cosecha, transporte y operación. Toda la SBSC se desarrolla en un ambiente de incertidumbre ocasionado por las condiciones climáticas que afectan el rendimiento de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha, los cuales inciden en el diseño de la cadena y la ejecución de las operaciones durante todo el horizonte de planeación.

Figura 2-5 Modelo conceptual para solucionar el problema de diseño y gestión de la SBSC desde la perspectiva sostenible, considerando las condiciones climáticas como fuente de incertidumbre



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el modelo involucra al desempeño sostenible a través de las dimensiones económicas, ambientales y sociales, en un enfoque de modelación multi-objetivo. La dimensión económica se aborda desde el VP del EVA durante el horizonte de planeación; esta medida busca ofrecer un indicador que lidere la solvencia económica para los miembros de la cadena, incluidos los clientes, por medio del cumplimiento de la demanda. Así mismo, por medio del LCA se estudian los impactos ocasionados al medio ambiente por cuenta de las diversas operaciones de la SBSC, buscando su minimización. Por su parte, la dimensión social se aborda desde la optimización del Social-LCA, el cual permite la evaluación de impactos positivos y negativos sobre los grupos y/comunidades afectadas por cuenta de la operación de la SBSC. Finalmente, los tres indicadores ofrecen soluciones que pueden considerarse conflictivas de manera aislada, y en ese sentido el enfoque multi-objetivo permite encontrar soluciones al diseño y gestión de la SBSC equilibradas entre las dimensiones de la sostenibilidad.

Del modelo conceptual se derivan 5 modelos matemáticos, los cuales abordan la generalidad de la SBSC, hasta un nivel de granularidad específico que modela particularidades de los eslabones agrícola e industrial (fincas y BR), con sus respectivas interconexiones (ver Tabla 2-1). Cada uno de los modelos tiene la intencionalidad de facilitar procesos de experimentación parcial de cara al problema de investigación identificado en esta tesis doctoral, hasta llegar a un modelo capaz de ofrecer una solución global que permita lidiar con su complejidad computacional. Todos los modelos matemáticos propuestos son formulados como problemas de programación estocástica de dos etapas teniendo en cuenta el desempeño del cultivo y duración de la temporada de cosecha como variables estocásticas. Adicionalmente, se consideran la combinación de decisiones estratégicas y

tácticas en un horizonte de planeación de 20 años, así como un conjunto de escenarios representativos del caso de estudio. A continuación, se detalla el propósito de cada modelo y cómo cada uno de estos aportan a la comprobación de la hipótesis.

Modelo agrícola (MAG). El objetivo de este modelo es evaluar el desempeño económico del eslabón agrícola de la SBSC. En ese sentido, se modelan las decisiones estratégicas y tácticas en periodos mensuales. Se considera una finca que es capaz de albergar el cultivo de caña de azúcar necesario para el suministro de la BR. Entre las decisiones más relevantes están el dimensionamiento de la finca y la cantidad de cultivo asignado, así como los planes de siembra y cosecha. De esta manera, el modelo propuesto contribuye a dar respuesta a la combinación de decisiones de diseño y gestión del eslabón agrícola de la SBSC considerando las fuentes de incertidumbre, al igual que la complejidad computacional al introducir una cadena de Markov para reducir la dimensionalidad.

Modelo Agrícola y BR VPN (MABV). Este modelo tiene como objetivo la evaluación del desempeño económico de la SBSC considerando ambos eslabones (agrícola y biorefinería), usando un enfoque centralizado en el cual se agregan los ingresos, costos de operación e inversión; es decir, considerando la cadena como propiedad de un solo actor. El modelo asume el MAG e incluye los costos e inversiones de la biorefinería; al igual que modela el comportamiento de las inversiones, las fuentes de financiación, el cálculo de la utilidad neta, y la administración del flujo de caja. Con base en este modelo se estudia a profundidad desempeño económico involucrando los dos eslabones principales de la SBSC, buscando la optimizando el VPN de la utilidad neta.

Modelo agrícola y BR EVA (MABE). Tiene como objetivo optimizar el VPN de la utilidad neta, al mismo tiempo que se valoran los costos de las fuentes de financiación de las inversiones, las cuales pueden ser internas (accionistas) y externas (sector financiero), usualmente llamado el valor económico agregado (EVA). La intención es refinar el desempeño económico desde la perspectiva de sostenibilidad financiera en el largo plazo. El modelo asume el MABV y solo unas ecuaciones adicionales sobre el cálculo del valor EVA para cada uno de los periodos del horizonte de planeación. Con base en lo anterior, la contribución de este modelo se refleja en la derivación de una medida de desempeño económico que garantiza la maximización de los beneficios para los accionistas, mientras se establece un diseño y la gestión de operaciones de la SBSC bajo condiciones de incertidumbre.

Multi-actor modelo agrícola BR EVA (M-MAB). Este modelo busca diseñar la SBSC teniendo en cuenta que ésta se compone por múltiples actores quienes interactúan por un bien común, pero que cada uno de ellos tiene una expectativa económica independiente. La estrategia de modelación se concentra en cada una de las fincas con sus propias decisiones inspiradas en el modelo MAG. Además, se involucran las decisiones de la biorefinería, y las decisiones de relacionamiento, flujo de suministro de caña, entre las fincas (semilla) y hacia la biorefinería (suministro). Adicionalmente, se incluyen el modelamiento de los aspectos financieros de cada actor, optimizando el EVA agregado de todos ellos. Este modelo tiene el potencial para contribuir a resolver la hipótesis de investigación, involucrando las dimensiones ambientales y sociales del desempeño sostenible. Sin embargo, la complejidad intrínseca de la cadena es de tal magnitud que no permite encontrar una solución al problema para instancias reales. Solo instancias compuestas por un par de actores y escenarios son posibles de resolver.

Multi-actor anual modelo agrícola BR EVA (MA-MAB). La intención de este modelo es optimizar el desempeño sostenible de la SBSC en un enfoque centralizado que considere los intereses de múltiples actores de la cadena de manera simultánea. El modelo retoma el M-MAB pero involucra una abstracción adicional sobre los periodos del horizonte de planeación, estableciendo periodos anuales con el fin de reducir la dimensión del problema. Además, se modelan múltiples fincas, las relaciones de flujo entre los múltiples actores y, el cálculo del desempeño ambiental y social. Al incluir la localización de los actores, las distancias relativas y el desempeño individual, es posible encontrar una solución equilibrada entre las dimensiones de la sostenibilidad, en un ambiente más detallado respecto a la interacción de los miembros de la cadena. En esta vía, el modelo propuesto permite adoptar la refinación del desempeño económico, en términos de la sostenibilidad financiera; además, se diseñan y gestionan las operaciones de la SBSC bajo un ambiente de incertidumbre, considerando la complejidad computacional. Por lo tanto, este modelo se construyó a partir de los modelos anteriores, incorporando sus cualidades, con el fin de resolver la pregunta de investigación y confirmar la hipótesis planteada en esta tesis doctoral.

Los modelos referenciados en la Tabla 2-1 presentan también la intención de fortalecer la medición del desempeño económico, desde un enfoque netamente centralizado hasta uno que ofrece la sostenibilidad financiera en el largo plazo para los múltiples miembros de la cadena. En ese sentido, son varios los experimentos que se pueden desprender con el fin de refinar ésta dimensión (tres modelos, MAg, MABV, y MABE). Finalmente se identificó un grave problema de complejidad computacional con el problema M-MAB que, aunque parecía ofrecer un gran nivel de detalle, solo permitía solucionar problema de baja dimensión y poca representatividad del caso de estudio. En consecuencia, con el fin de darle solución, se exploraron diferentes enfoques tales como métodos de descomposición, metaheurísticas, y modelos equivalentes. Este último enfoque, fue una opción válida para atacar la complejidad computacional (MA-MAB) el cual ofrece soluciones equivalentes y permite la solución de instancias de la dimensión del caso de estudio.

Tabla 2-1 Modelos computacionales generados a partir del modelo conceptual

Modelo	Actores	Fincas	BR	Periodos de tiempo	Medida desempeño	Distancia y localización	Funciones Objetivo	Complejidad computacional
MAg	1	1	0	Mes	VPN	×	ECO	Media
MABV	1	1	1	Mes	VPN	×	ECO	Media
MABE	1	1	1	Mes	EVA	×	ECO	Media – Alta
M-MAB	N+1	N	1	Mes	EVA	✓	ECO	Exponencial (Sin solución)
MA-MAB	N+1	N	1	Año	EVA, LCA, Social-LCA	✓	ECO, AMB, SOC	Media

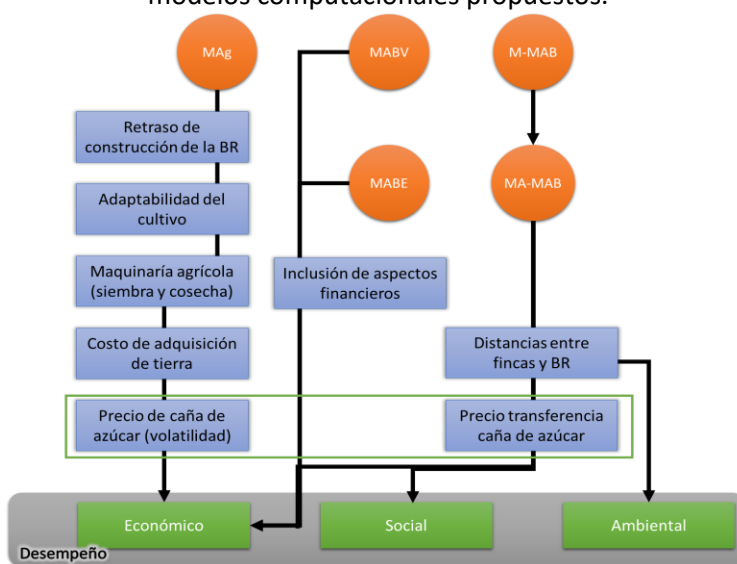
Fuente: Elaboración propia

Como se identificó previamente, existen varios factores que pueden influir en la factibilidad económica de la SBSC, especialmente para el eslabón agrícola. Así mismo, otros factores pueden influenciar el buen desempeño a nivel social y ambiental. En ese sentido, en la Figura 2-6 se puede observar los diversos experimentos que se llevaron a cabo, al igual que establecer cuál de los modelos propuestos permite su exploración, así como qué tipo de dimensiones influencia. Entre los factores analizados están el retraso de la construcción de la BR, el cual tiene un impacto a nivel general de SC. Aunque pareciera que es un asunto netamente de la BR, el eslabón agrícola también

se ve afectado al no tener un cliente para comercializar la caña de azúcar. Al generarse un cultivo nuevo, se genera una curva de adaptabilidad del cultivo, el cual es motivado por múltiples aspectos, que van desde técnicos, operativos y de fertilización de suelos. La maquinaria agrícola también genera un aspecto crítico para el eslabón agrícola, el cual incide en la productividad, el suministro y el costo operacional. Dos aspectos exógenos afectan la dimensión económica del eslabón agrícola, el costo de adquisición de las tierras y el precio del etanol y su efecto directo sobre el precio de proveeduría de caña de azúcar. Estos factores fueron abordados por el modelo MAg y evalúan su efecto sobre la dimensión económica.

Con el fin de afinar el desempeño económico de la SBSC hacia un diseño de sostenibilidad financiera, los modelos MABV y MABE evalúan, por medio de un análisis comparativo, la incidencia de la selección de fuentes de financiación, administración del capital de trabajo y la administración del flujo de caja, sobre el desempeño económico para los accionistas de la SBSC. Sin embargo, con el modelo M-MAB no fue posible realizar la experimentación debido a que su dimensión y complejidad computacional no permiten la solución de la instancia del caso de estudio. Sin embargo, el modelo MA-MAB si permite la conducción de experimentos involucrando la distancia entre las fincas y la biorefinería, así como el precio de transferencia para la caña de azúcar y su efecto sobre el desempeño sostenible. La evaluación del precio de caña es analizada desde dos puntos de vista; primero, evaluando la volatilidad del precio (aspecto exógeno) y su efecto sobre la dimensión económica; y segundo, analizando desde la perspectiva sostenible el precio de transferencia (aspecto endógeno) sujeto a la negociación entre ambos eslabones.

Figura 2-6 Factores relevantes que inciden en el diseño y operación de la SBSC y su relación con los modelos computacionales propuestos.



Fuente: Elaboración propia.

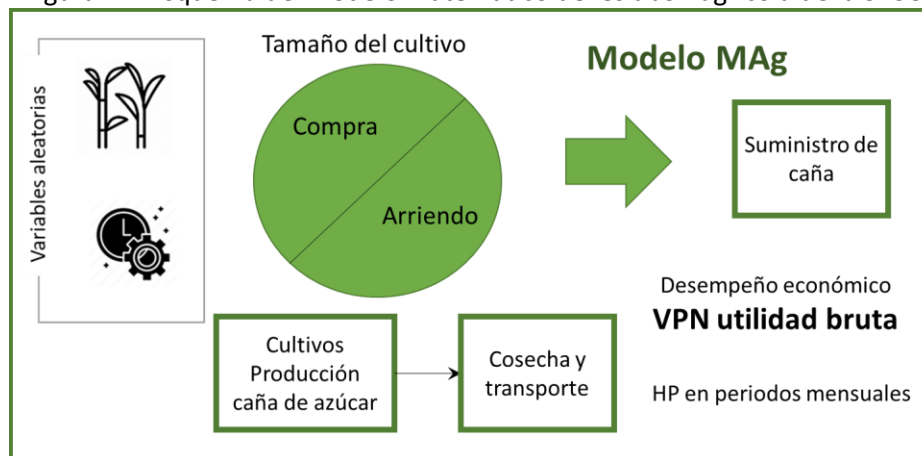
2.2. Modelos matemáticos

Con base en la metodología planteada, en esta sección se presentan los modelos matemáticos inspirados en el modelo conceptual propuesto. Cada uno de los modelos se representa por una serie de conjuntos, parámetros y variables de decisión, las relaciones lógicas entre las variables, las cuales se decantan en múltiples restricciones, y una o varias funciones objetivo.

2.2.1. Modelo agrícola (MAg)

Este modelo aborda las decisiones estratégicas y tácticas respecto al eslabón agrícola, encargado de la producción de la biomasa (cultivo de caña de azúcar), tal como se muestra en la Figura 2-7. Las decisiones consideradas corresponden a: crecimiento y renovación del cultivo, capacidad de producción de la BR, ventana de tiempo para las operaciones de siembra y cosecha. Por otro lado, los efectos de la incertidumbre generada por las condiciones climáticas son representados por medio de las variables aleatorias de rendimiento de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha. El rendimiento de los cultivos de caña de azúcar (*CY*, *Crop Yield*) depende de la edad del cultivo (meses), el número de cortes (socas), la adaptabilidad del cultivo al ser incorporado en una nueva región (curva de adaptabilidad), y los efectos de las condiciones climáticas (condición de incertidumbre). De igual manera, la temporada de cosecha es otro de las variables aleatorias que afectan la SBSC y que está asociada a las condiciones climáticas, representadas principalmente por los niveles de lluvia.

Figura 2-7 Esquema del modelo matemático del eslabón agrícola de la SBSC



Fuente: Elaboración propia

Tal como fue señalado en el modelo conceptual, el horizonte de planeación considera periodos mensuales y está compuesto por las fases de inversión y de operación. En la primera se desarrollan los cultivos lo cual implica hacer inversiones en adquisición de predios, maquinaria agrícola, producción de semilla, y la adecuación y preparación de terrenos. De forma simultánea con el desarrollo de cultivos, en esta fase se construye la BR en un horizonte de planeación determinado. Aquí es importante sincronizar el desarrollo del cultivo de caña de azúcar de tal manera que cuando la BR esté construida, la materia prima tenga la madurez adecuada para iniciar las operaciones de suministro de biomasa. Sin embargo, si existe un retraso en la construcción de la BR y la caña tiene la madurez para ser cosechada, se generaría un desperdicio de caña, traducido en pérdidas económicas e impactos ambientales. En la segunda fase, la BR comienza a producir y, por tanto, debe activarse el suministro de caña desde el eslabón agrícola. Durante esta fase se generan ingresos por ventas, lo cual permite apalancar las operaciones con capital de trabajo, así como la generación de excedentes para apalancar las inversiones realizadas.

Las decisiones de nivel estratégico que se abordan se relacionan con la determinación del tamaño

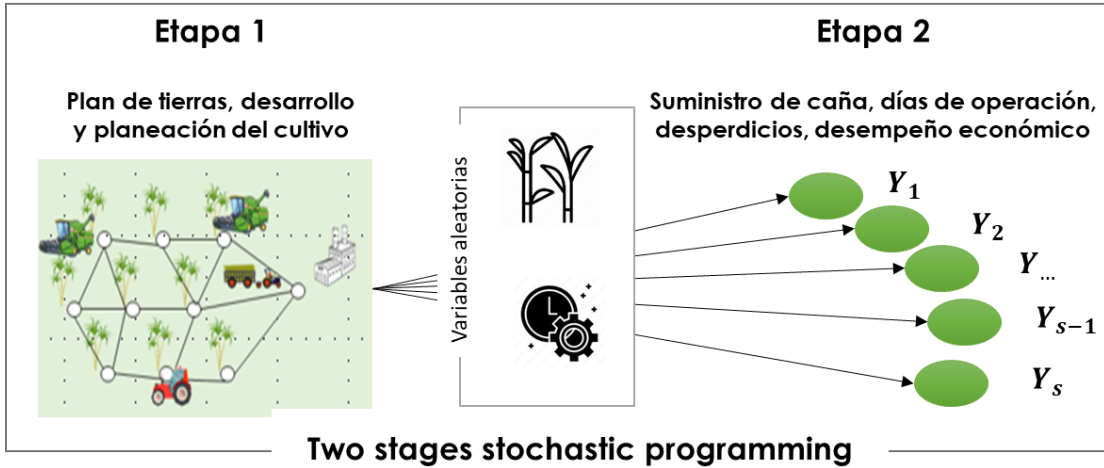
del cultivo para cumplir con la demanda de biomasa considerando la capacidad de procesamiento de la BR, y el plan de adquisición de tierras (compra o arrendamiento), las cuales deben estar disponibles antes de iniciar el proceso agrícola. Así mismo, durante el desarrollo y renovación de los cultivos se requieren de gran cantidad de semilla, la cual es extraída del mismo cultivo, interponiendo una demanda adicional sobre el cultivo, lo que incrementa el área requerida. Otro factor clave son las áreas para callejones, parqueo de trenes cañeros y tránsito de maquinaria, que ocupan espacios en los cuales no se puede sembrar y que, por tanto, deben ser consideradas dentro del plan de expansión y requerimiento de terrenos. Adicionalmente, el Valor Presente Neto (VPN) del beneficio total bruto es utilizado como medida de desempeño en el proceso de diseño de la SBSC en un horizonte de planeación de 20 años.

Considerando las decisiones tácticas, el modelo sincroniza la planificación de los eslabones agrícola y producción de biocombustibles, sujeto a la duración de la temporada de cosecha. Las operaciones de siembra y cosecha de caña de azúcar deben ser planificadas en orden de cumplir con el suministro de materia prima para la BR, al tiempo que se produce semilla necesaria para el desarrollo del cultivo y su renovación. Por otro lado, la BR inicia la operación una vez la construcción es finalizada; sin embargo, si la construcción toma más tiempo de lo esperado y los cultivos alcanzan su nivel de maduración, es posible que la caña de azúcar deba descartarse, con el fin de garantizar el bienestar de los cortes de caña subsiguientes. También, el cultivo es modelado a este nivel (periodos mensuales), considerando el rendimiento en función de la edad (en meses) y del número de veces cosechado desde la siembra. En este sentido, si los cultivos de caña de azúcar no cumplen con el desempeño esperado, la BR puede sufrir desabastecimiento y comprometerse la factibilidad de toda la cadena. Finalmente, el modelo considera el desperdicio de caña como un problema asociado a la baja sincronización de las operaciones, al mismo tiempo que los faltantes de caña para el abastecimiento; en consecuencia, el modelo penaliza estos dos fenómenos.

Con el fin de dar manejo a las fuentes de incertidumbre y al proceso de diseño de la SBSC, se propone un modelo de programación estocástica de dos etapas (**TSSP**, *Two Stages Stochastic Programming*). Como se mencionó, las condiciones climáticas afectan la duración de temporada de cosecha, así como el rendimiento de los cultivos, por lo que son involucradas como variables aleatorias. En la primera etapa, conocida usualmente como "*here and now*" (Birge & Louveaux, 2011; Costa et al., 2011), se determinan las decisiones estratégicas y tácticas que son transversales a la realización de las variables aleatorias; entre ellas se incluyen: el plan de incorporación de tierras, el plan de siembra y la programación de cosecha. Luego de la realización de las variables aleatorias, las decisiones de segunda etapa son llevadas a cabo, por lo que esta es conocida como "*wait and see*", o también, decisiones de corrección. Estas decisiones guardan una relación estrecha con cada uno de los escenarios aleatoriamente generados. En esta etapa se consideran: la cantidad de caña de azúcar producida por los campos y transportada a la BR, desperdicios de caña, días efectivos de operación y el desempeño económico esperado. Estas dos etapas se articulan como se muestra en Figura 2-8.

La información respecto a los conjuntos, parámetros y variables de decisión utilizadas en el modelo matemático propuesto pueden ser visualizadas en los Anexo C, Anexo D, Anexo E, respectivamente.

Figura 2-8 Decisiones de primera y segunda etapa para el modelo TSSP sobre el diseño de la SBSC



Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.1. Función objetivo

La función objetivo expresa la maximización del beneficio neto esperado a través del valor presente neto modelado en la Ecuación (1). En ella se involucran los ingresos por venta de caña de azúcar, los costos asociados a la operación agrícola, los costos de inversión en el desarrollo de los cultivos, inversión en las tierras adquiridas y los costos de penalización. El valor esperado se compone por los costos asociados a la inversión y la planificación de las operaciones agrícolas expresadas en la etapa 1. Los ingresos por ventas de caña de azúcar, los costos de transporte de caña y los costos de penalización, inherentes a la etapa 2, son involucrados en términos del valor esperado.

La Ecuación (2) representa el valor esperado de las decisiones de segunda etapa, en las cuales se involucran los ingresos por venta de caña, el costo de la operación de cosecha, así como los costos de penalización por: 1) caña perdida por exceder el periodo máximo de madurez y descartada debido a que la BR está en periodo de construcción; 2) faltantes de suministro de caña de azúcar en la BR durante el periodo de operación. Seguidamente, en la Ecuación (3) se calculan los costos de inversión en el desarrollo del cultivo, el costo de arrendamiento de tierras, la inversión en compra de nuevos predios, y los gastos indirectos de operación. El último aspecto considera el valor de salvamento del eslabón agrícola, compuesto por el único activo recuperable al final del periodo de evaluación: las tierras adquiridas.

$$Max(Profit) = E_{\xi}[IncomeS2^s - CostS2^s] - CostE1 \quad (1)$$

$$E_{\xi}[IncomeS2^s - CostS2^s] = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \left[\frac{CPB_{t,s} * (EP_t - OHC) - (CD_{t,s} + CP_{t,s} * PCP) * WHC - CS_{t,s} * PCS_h}{\|S\|} \right] * \frac{(1-DR)^{-t}}{\|S\|} \quad (2)$$

$$CostE1 = \sum_{t \in T} \left[\frac{Planting_t * SSC + Area_t * IDE + ILand_t * LRC_t + PLand_t * LIC_t}{\sum_{t \in T} PLand_t * LIC_0 * (1 - DR)^{\|T\|}} \right] * (1 - DR)^{-t} - \quad (3)$$

2.2.1.2. Restricciones de las operaciones agrícolas

Las restricciones del componente agrícola se conforman en función de las diferentes operaciones de programación de siembra y cosecha; también se calcula el proceso de transición que sigue la caña de azúcar durante su ciclo de vida. El cultivo de caña inicia con la operación de siembra e inicia el ciclo de producción con edad de 0 meses ($e = 0$) y se clasifica como soca 1 ($C = 1$). Durante el proceso de crecimiento es posible encontrar que la caña crece hasta que gana suficiente biomasa y madurez para la producción de semilla, en un periodo comprendido entre los meses 6 y 11 ($e = 6 - 11$), correspondiente a las dos primeras socas ($C = 1 - 2$). Si la caña de azúcar no se aprovecha en la producción de semilla, se encuentra la siguiente ventana de tiempo para la cosecha industrial entre los meses 12 a 15 ($e = 12 - 15$) para las cinco socas consideradas $C = (1 - 5)$ tal como se mostró en la Figura 1-3.

Durante los periodos habilitados para la cosecha, se llevan a cabo las actividades de suministro para la BR y, en consecuencia, el rendimiento de la caña de azúcar se determina en función de la edad (e) y la soca (c), el cual es denominado como $SCH_{e,c}$, que representa la cantidad de biomasa acumulada por el cultivo. Lo anterior, con el objetivo de modelar, de una manera más precisa, el rendimiento de los cultivos, tal como se mostró en la Figura 1-4. Este rendimiento también está sujeto a la intensidad de lluvia que es modelada como una fuente de incertidumbre. Adicionalmente, el componente agrícola involucra el desarrollo del cultivo sujeto a la disponibilidad de predios o fincas; éstas son modeladas en términos de decisiones estratégicas de adquisición (compra y/o venta). Así mismo, los equipos agrícolas también son considerados en términos de disponibilidad, tanto para la siembra de caña como para las actividades de cosecha.

Por medio de la Ecuación (4) se involucra un cultivo base, el cual representa el semillero; de allí se extraen las semillas necesarias para el inicio del desarrollo de los campos de caña de azúcar. En la Ecuación (5) se incluye la cantidad de área sembrada durante el periodo t y empieza a contabilizarse en el sistema de inventario de caña de azúcar. Por otro lado, el crecimiento de la caña de azúcar es modelado a través de la transición del inventario del cultivo de un periodo a otro, tal como se muestra en la Ecuación (6). Esta ecuación ayuda a modelar el crecimiento necesario que tiene la caña de azúcar para la producción de semilla y para el suministro de la BR. Seguidamente, la Ecuación (7) establece la ventana de tiempo para la cosecha del cultivo habilitado para la producción de semilla o para ser suministrado a la BR; al mismo tiempo, establece la transición del cultivo en crecimiento. Adicionalmente, la Ecuación (8) establece la transición de una soca a la otra, luego de haberse presentado la operación de cosecha en el cultivo.

$$X_{1,e,c} = ISA_{a,r}^f \quad \forall e \in E; \forall c \in C \quad (4)$$

$$X_{t,1,1} = Planting_t \quad \forall t \in T; \quad (5)$$

$$X_{t,o,q} - X_{t-1,o-1,q} = 0 \quad \forall t \in T; \forall o \in O; \forall q \in Q \quad (6)$$

$$X_{t,e,q}^f = X_{t-1,e-1,q} - Harvest_{t-1,e-1,q} \quad \forall t \in T \setminus t = 1; \forall a \in P \cup W \cup Y; \forall q \in Q \quad (7)$$

$$X_{t,1,q+1} = \sum_{\forall e \in P \cup W \cup Y} Ha_{t-1,e,q} \quad \forall t \in T; \forall q \in Q \quad (8)$$

Las ecuaciones anteriores, hacen referencia al cultivo que está habilitado para la producción de semilla y para el suministro de la BR (socas 1 y 2). Las ecuaciones (9)-(11) aplican para las socas 3, 4 y 5, que tienen como destino únicamente la producción de biocombustibles. La Ecuación (9) permite la transición del cultivo en crecimiento, evitando que sea cosechado para suministrar la BR, antes de su periodo de madurez. La ventana de tiempo para la cosecha de caña de azúcar es

establecida durante su periodo de madurez por medio de la Ecuación (10). Además, la transición de soca a soca es calculada por medio de la Ecuación (11). Esta última restricción es muy importante para el modelo porque establece el fin del ciclo de vida del cultivo, limitándolo a un número máximo de 5 socas; por lo tanto, luego del quinto corte el cultivo debe ser renovado. Esta decisión se involucra pues después de cinco socas se presenta una reducción significativa en la productividad del cultivo.

$$X_{t,r,l} - X_{t-1,r-1,l} = 0 \quad \forall t \in T; \forall r \in R; \forall l \in L \quad (9)$$

$$X_{t,e,l} = X_{t-1,e-1,l} - Harvest_{t-1,e-1,q} \quad \forall t \in T; \setminus t = 1; \forall a \in W \cup Y; \forall l \in L \quad (10)$$

$$X_{t,1,l+1} = \sum_{\forall e \in W \cup Y} Harvest_{t-1,e,l} \quad \forall t \in T; \forall l \in L \quad (11)$$

Seguidamente, se establece el balance entre la cantidad de biomasa producida en los campos agrícolas y la cantidad de caña de azúcar que se utiliza en las diferentes operaciones de la SBSC. La Ecuación (12) garantiza que toda la caña que es cosechada tenga un uso específico; es decir, como semilla, como materia prima de la BR, o descartada como desperdicio. De una manera más detallada, la Ecuación (13) permite establecer la cantidad de caña de azúcar que será usada como semilla en el proceso de siembra. Igualmente, la Ecuación (14) establece la cantidad de caña suministrada a la BR como materia prima.

$$\sum_{\forall e \in P \cup W \cup Y; \forall c \in C} Harvest_{t,e,c} * (SCH_{a,r} + EY_{t,c}^S) * RRC_t = \quad \forall t \in T; \forall s \in S \quad (12)$$

$$Planting_t * SCS + HC_{t,s} + CD_{t,s} \\ \sum_{\forall e \in P; \forall c \in Q} Harvest_{t,e,c} * (SCH_{e,c} + EY_{t,c}^S) * RRC_t = \quad \forall t \in T; \forall s \in S \quad (13)$$

$$Planting_t * SCS \\ \sum_{\forall e \in P; \forall c \in Q} Harvest_{t,a,r} * (SCH_{e,c} + EY_{t,c}^S) * RRC_t = HC_{t,s} \quad \forall t \in T; \forall s \in S \quad (14)$$

Las ecuaciones (15)-(17), se relacionan con las operaciones llevadas a cabo en la BR. La ecuación (15) calcula la cantidad total de productos j obtenidos por el procesamiento de la caña de azúcar suministrada en la BR; tales productos son el bioetanol, la energía eléctrica y el bio-fertilizante. Seguidamente, se determina la cantidad de caña que va a ser procesada en la BR según la Ecuación (16); aquí se tiene en cuenta que la capacidad de producción está sujeta a la duración de la temporada de cosecha de cada periodo. Aplicando la Ecuación (17), se establece el balance entre la cantidad de caña suministrada y la cantidad de caña aprovechada por la BR, más la cantidad de caña descartada si la BR no ha terminado de ser construida y puesta en operación. Así mismo, la cantidad de suministro de caña de azúcar faltante en la BR es calculada por la Ecuación (18). Los días de operación de la BR se limitan en función de los días máximos de operación de la temporada de cosecha, los cuales son establecidos por cada periodo en cada escenario, tal como se observa en la Ecuación (19).

$$Production_{t,s}^j = \mu_j * CPB_{t,s} \quad \forall t \in T; \forall j \in Pd; \forall s \in S \quad (15)$$

$$CPB_{t,s} = SD_t^S * \frac{Odays_{t,s}}{MHS_{t,s}} \quad \forall t \in T; s \in S; \wedge MHS_t \neq 0 \quad (16)$$

$$HC_{t,s} = CPB_{t,s} + CP_{t,s} \quad \forall t \in T; s \in S; \wedge MHS_t \neq 0 \quad (17)$$

Por otro lado, se interponen límites a la cantidad de operaciones de siembra y cosecha que se realizan en los campos agrícolas, al igual que se controla la cantidad de tierras que se incorporan. En ese sentido, la Ecuación (20) establece un límite superior a las operaciones de siembra, en función de la capacidad máxima de la maquinaria durante cada uno de los meses. Así mismo, la Ecuación (21) asegura que el área cosechada durante cada periodo no exceda la capacidad de

maquinaria disponible. Seguidamente, la Ecuación (22) calcula el área total sembrada en cada periodo t , la cual es actualizada con base en el área del periodo anterior, el área sembrada y el área que fue cosechada y que requiere renovación.

$$CS_t = SD_t * (1 - \frac{Odays_{t,s}}{MHS_{t,s}}) \quad \forall t \in T; s \in S; \wedge MHS_t \neq 0 \quad (18)$$

$$Odays_{t,s} \leq MHS_{t,s} \quad \forall t \in T \quad (19)$$

$$Planting_t \leq MS_t \quad \forall t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{\substack{v \in P \cup W \cup Y \\ v \in C}} Harvest_{t,e,c} \leq MH_t \quad \forall t \in T \quad (21)$$

$$Planting_t^f + Area_{t-1} - \sum_{v \in W \cup Y} Harvesting_{t-1,e,5} = Area_t \quad \forall t \in T, t \geq 1 \quad (22)$$

Continuando en la misma línea, la Ecuación (23) calcula la cantidad total de tierra adquirida hasta el periodo t ; es decir, la tierra total acumulada hasta el periodo anterior y las tierras incorporadas por medio de compra y arrendamiento (estas últimas durante un periodo de cinco años, contrato típico en proveeduría de caña). Por medio de la Ecuación (24) se calcula la cantidad de tierras adquiridas bajo la modalidad de arrendamiento, descontando la tierra que ha cumplido el ciclo de renta τ . La Ecuación (25) involucra un requerimiento de un 5% de área adicional debido a la necesidad de construir callejones para el tránsito de la maquinaria agrícola necesaria. Además, la Ecuación (26) establece un límite superior al área desaprovechada en el sentido que no exceda el 20% del área total requerida. Finalmente, la ecuación (27) impone un límite superior al área arrendada de tal manera que no supere el 50% del área total incorporada.

$$Land_t = Land_{t-1} + PLand_t + RLand_t - RLand_k \quad \forall t \in T \setminus t = 1, k = t - \tau | k \in T \quad (23)$$

$$ILand_t = ILand_{t-1} + RLand_t - RLand_k \quad \forall t \in T \setminus t \geq 1, k = t - \tau | k \in T \quad (24)$$

$$Land_t \geq Area_t(1 + 5\%) \quad \forall t \in T \quad (25)$$

$$Land_t \leq Area_t * (1 + 5\%) * (1 + 20\%) \quad \forall t \in T \quad (26)$$

$$Land_t * (50\%) \geq ILand_t \quad \forall t \in T \quad (27)$$

Finalmente, el modelo MAg se puede resumir en el siguiente modelo matemático del tipo TSSP, buscando maximizar el valor esperado de la utilidad bruta del eslabón agrícola considerando su relación con la BR para la SBSC. Además, el modelo está sujeto a un conjunto de restricciones que representan las decisiones de diseño y gestión de la SBSC a un nivel general.

$$Max F(w, y^s) = E_{\xi}[IncomeS2(y^s) - CostS2(y^s)] - CostE1(w)$$

Desempeño económico del eslabón agrícola

sujeto a:

$$Ecuaciones (4) - (27)$$

Decisiones del eslabón agrícola y la BR

$$w, y^s \geq 0$$

2.2.2. Modelo Agrícola y BR VPN (MABV)

Con el objetivo de evaluar la factibilidad económica del diseño de la SBSC, se propone un modelo de optimización basado en el modelo MAg, pero se adicionan las decisiones de inversión en la BR (eslabón de producción). En este nuevo modelo se incluyen un conjunto de variables de decisión y restricciones que permiten calcular el desempeño financiero de la SBSC. Los parámetros adicionales se pueden encontrar en el 0 y las variables de decisión que se involucran en el modelo de evaluación financiera en el Anexo G. Adicionalmente, decisiones tales como las fuentes de financiación (interna

y externa), la administración del flujo de caja y la asignación de capital de trabajo para la operación, son necesarias para evaluar de una manera holística el desempeño económico de la cadena. En orden de ofrecer una medida de factibilidad económica para el diseño de la SBSC, se utiliza el VPN de la utilidad neta, la cual considera el costo financiero y el pago de impuestos de renta.

Adicionalmente, este modelo considera de forma simultánea las inversiones estratégicas (BR, predios, cultivos, maquinaria, re-potenciamiento), conocida comúnmente como CAPEX (*CAPital EXpenditures*) y los ingresos, costos y gastos de la operación de la cadena denominados OPEX, (*OPerating EXpenditures*). Teniendo en cuenta las restricciones del modelo anterior (ecuaciones (4) a (27)), se agregaron una nueva función objetivo y un conjunto de restricciones con el fin de capturar el desempeño económico de forma más detallada.

2.2.2.1. Función objetivo

Basado en lo anterior, la utilidad neta es modelada para cada uno de los periodos del horizonte de planeación, al igual que para cada uno de los escenarios considerados ($s \in S$). Además, cada valor es ajustado con una tasa de descuento con el objetivo de considerar el valor del dinero en el tiempo y así, sumar los desempeños económicos en términos de cantidades equivalentes (ver ecuación (28)). A través de costos de penalización, esta función objetivo también involucra el impacto económico de los faltantes en el suministro de la BR, al igual que el generado por los desperdicios de caña por exceso de maduración. Por último, se incluye el valor de salvamento de las tierras adquiridas al final del periodo del horizonte de planeación y, con esto, finalmente se calcula la función objetivo esperada.

En la ecuación (29) se calculan los costos de penalización. El primer componente se genera por faltantes en el suministro de la BR, ocasionados por la escasez de caña madura en los cultivos durante cada periodo del horizonte de planeación. El otro componente de penalización corresponde a la caña desperdiciada; inicialmente por los retrasos en la construcción de la BR que evitan el procesamiento de la caña madura; y posteriormente durante la fase de operación, por la caña que se madura fuera de la temporada de cosecha, lo que hace que exceda su periodo óptimo de cosecha. El último componente de la función objetivo corresponde al valor de salvamento, el cual está compuesto por el valor de mercado de los terrenos adquiridos bajo la modalidad de compra y que son tenidos en cuenta en el último periodo del horizonte de planeación, tal como se presentan en la Ecuación (30).

$$\text{Max } E_{\xi}[\text{NPV}] = \left[\frac{\sum_{t \in T} \sum_{s \in S} (\text{NOPAT}_{t,s}^{+/-} - \text{Costo penalización}) (1-DR)^{-t}}{\|S\|} \right] + \text{Valor de salvamento} \quad (28)$$

$$\text{Costo penalización} = \sum_{\forall t \in T} m_{ty} \left[\begin{array}{l} CS_{t,s} * PCSh_t \\ + (CP_{t,s} + CD_{t,s}) * PCP_t \end{array} \right] \quad (29)$$

$$\text{Valor de salvamento} = \sum_{t \in T} PLand_t * LIC_0 * (1 - DR)^{\|T\|} \quad (30)$$

2.2.2.2. Restricciones del comportamiento financiero de la SBSC

Entre los estados financieros modelados se encuentran: 1) el balance de la situación financiera; 2) el estado de resultados y 3) el flujo de caja. Estos son necesarios para modelar las decisiones de financiación y para identificar las necesidades de recursos económicos, las fuentes y usos, durante

el horizonte de evaluación.

La Ecuación (31) establece los ingresos totales por ventas de productos finales. Así mismo, los costos y gastos de producción son abordados por la Ecuación (32); estos gastos están compuestos por el costo de la operación agrícola, el costo de transporte de caña y el costo de la producción industrial (Ecuación (33)). Como se observa en la Ecuación (33), el costo agrícola involucra el costo de mantenimiento de los cultivos, costos de mano de obra directa y gastos administrativos (todos ellos proporcionales al tamaño del cultivo) y los costos de arrendamiento de predios

Los costos de transporte lo componen el transporte de semilla, de cosecha, transporte de caña desde los campos agrícolas hacia la BR, costos de caña descartada por exceso de maduración y retraso en la construcción, presentados en la Ecuación (34). El costo de operación de la BR, depende del consumo de recursos (Ecuación (35)). La Ecuación (36) determina los gastos de depreciación, considerando la amortización de la inversión de los cultivos de caña que están siendo cosechados, la amortización de las inversiones en la BR, las obras complementarias y la maquinaria agrícola.

$$NTS_{ty,s} = \sum_{\substack{\forall t \in Tm_{ty} \\ \forall j \in Pd}} Production_{t,s}^j * EP_t^j \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (31)$$

$$COGS_{ty,s} = PCA_{ty,s} + TC_{ty,s} + PCI_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (32)$$

$$PCA_{ty,s} = \sum_{\forall t \in Tm_{ty}} \left[\frac{Area_t * (MCO + DLC + AE) + InvRen_t * LRC_t}{(CP_{t,s} + CD_{t,s}) * WHC} \right] \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (33)$$

$$TC_{ty,s} = \sum_{\forall t \in Tm_{ty}} \left[\frac{(Planting_t * SSC + CPB_{t,s}) * OHC + (CP_{t,s} + CD_{t,s}) * WHC}{(CP_{t,s} + CD_{t,s}) * WHC} \right] \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (34)$$

$$PCI_{ty,s} = \sum_{\forall t \in Tm_{ty}} [Production_{t,s}^j * inputCost_j] \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (35)$$

$$DPR_{ty,s} = \left[\frac{\sum_{\substack{\forall e \in W; \forall c \in C; \\ \forall t \in Tm_{ty}}} Harvest_{t,e,c} * ACS + \frac{PPEI_{ty} + FABP_{ty,s}}{PLC}}{\sum_{\forall t \in [ty-5, ty]} \frac{FAMch_{t,s}}{MLC}} \right] \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (36)$$

Una vez calculados los ingresos, costos, gastos y depreciaciones, por medio de la Ecuación (37) se calcula la utilidad bruta, antes de costos de financiación e impuestos. Luego, los costos de la deuda son determinados por la Ecuación (38), la cual involucra las deudas a corto y largo plazo. Con la Ecuación (39) se calcula la utilidad antes de impuestos. Los impuestos de renta son obtenidos usando las ecuaciones (40) y (41), considerando el impuesto de renta cuando la utilidad es positiva, o utilizando un porcentaje del patrimonio neto actual como base de liquidación del impuesto, (renta presuntiva). Finalmente, la utilidad neta es calculada con la Ecuación (42). Cabe señalar que la utilidad puede ser tanto positiva como negativa (pérdida), dado que, en la fase de inversión, no se generan ingresos y es necesario contemplar las pérdidas en una evaluación económica integral.

$$EBIT_{ty,s}^{+/-} = NTS_{ty,s} - COGS_{ty,s} - DPR_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (37)$$

$$IP_{ty,s} = LTL_{ty,s} * LTIR + STL_{ty,s} * STIR \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (38)$$

$$IL_{ty,s}^{+/-} = EBIT_{ty,s}^{+/-} - IP_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (39)$$

$$TX_{ty,s} \geq IL_{ty,s}^{+/-} * TXR \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (40)$$

$$TX_{ty,s} \geq EQ_{ty,s} * MTX * TXR \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (41)$$

$$NOPAT_{ty,s} = IL_{ty,s}^{+/-} - TX_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (42)$$

Las siguientes restricciones involucran el modelamiento de las deudas a corto y largo plazo,

considerando las nuevas deudas y los pagos de deudas pasadas (ecuaciones (43) y (44), respectivamente). Por otro lado, las deudas contemplan un periodo de gracia en el cual no se hacen abonos a capital, al igual que un periodo máximo de las obligaciones. Las condiciones varían para las obligaciones financieras a corto y largo plazo, las cuales inciden en los porcentajes de amortización de cada deuda, durante cada periodo de tiempo, aspectos que son tenidos en cuenta en las ecuaciones (45) y (46).

$$STL_{ty,s} = STL_{ty-1,s} + NSTL_{ty,s} - PSTL_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (43)$$

$$LTL_{ty,s} = LTL_{ty-1,s}^f + NLTL_{ty,s}^f - PLTL_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (44)$$

$$PSTL_{ty,s} = \sum_{\forall t \in [ty-STMP, ty-STGP]} \frac{NSTL_t^f}{STMP-STGP} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (45)$$

$$PLTL_{ty,s} = \sum_{\forall t \in [ty-LTMP, ty-LTGP]} \frac{NLTL_t^f}{LTMP-LTGP} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (46)$$

En relación al estado de situación financiera, las ecuaciones (47) a (58), reflejan la variación de los activos, las deudas y el patrimonio de los accionistas. Adicionalmente, se incluye la modelación del flujo de caja. De esta manera, en la Ecuación (47) se actualiza el patrimonio neto, considerando la utilidad neta y las capitalizaciones. Luego, se incluyen las deudas de corto y largo plazo para calcular la estructura completa del capital invertido (Ecuación (48)). La Ecuación (49) permite calcular el flujo de caja, teniendo en cuenta todos los flujos de ingreso, por ventas, capitalizaciones y préstamos del sector financiero, así como los flujos de egreso, involucrando los costos de operación, las inversiones necesarias, los pagos de deudas y los dividendos. Por otro lado, las utilidades y/o pérdidas retenidas o acumuladas son calculadas con la Ecuación (50). Una restricción auxiliar es incluida en la Ecuación (51), con el propósito de calcular el flujo de caja libre de cada periodo, representando el excedente de efectivo. Finalmente, las ecuaciones (52) y (53) se incluyen para establecer límites superiores al pago de dividendos a los accionistas, la primera con las utilidades retenidas, y la segunda con la disponibilidad de efectivo de cada periodo, respectivamente.

$$EQ_{ty,s} = EQ_{ty-1,s} + NOPAT_{ty,s} + NIS_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (47)$$

$$IC_{ty,s} = EQ_{ty,s} + STL_{ty,s} + LTL_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (48)$$

$$Cash_{ty,s} = Cash_{ty-1,s} + NTS_{ty,s} - COGS_{ty,s} - IP_{ty,s} - FAI_{ty,s} + NSTL_{ty,s} + NLTL_{ty,s} - PSTL_{ty,s} - PLTL_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (49)$$

$$NIS_{ty,s} - TX_{ty,s} - Div_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (50)$$

$$NE_{ty,s} = NE_{ty-1,s} - Div_{ty,s} + NOPAT_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (50)$$

$$FCE_{ty,s} = NTS_{ty,s} - COGS_{ty,s} - IP_{ty,s} - FAI_{ty,s} - PSTL_{ty,s} - PLTL_{ty,s} - TX_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (51)$$

$$Div_{ty,s} \leq NE_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (52)$$

$$Div_{ty,s} \leq Cash_{ty,s} + FCE_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (53)$$

Uno de los aspectos más relevantes del diseño de la SBSC corresponde a las inversiones generadas por cada una de los eslabones de la cadena. En ese sentido, la cuenta de activo fijo neto es actualizada por medio de la Ecuación (54), la cual considera la inversión realizada en el periodo, el saldo del periodo anterior y el descuento de las depreciaciones causadas. Las inversiones involucradas en el periodo son totalizadas en la Ecuación (55) y están compuestas por las siguientes inversiones: compra de tierras, obras complementarias requeridas en los componentes agrícola e industrial, maquinaria agrícola, construcción de la BR y desarrollo de los cultivos de caña de azúcar. Las inversiones en compra de tierras, compra de maquinaria agrícola y construcción de la BR, son detalladas en las ecuaciones (56), (57) y (58), respectivamente. Al final, se adiciona la Ecuación

(59) como medio de verificación de la ecuación contable compuesta por el total de activos, activos corrientes y activos fijos.

$$FA_{ty,s} = FA_{ty-1,s} + FAI_{ty,s} - DPR_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (54)$$

$$FAI_{ty,s} = FALand_{ty,s} + \left[\frac{PPEI}{T_{CAPEX}} | ty \in InvS \right] + FAMch_{ty,s} + FABP_{ty,s} + \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (55)$$

$$\sum_{\forall t \in Tm_{ty}} \left[Planting_t * SCC | ty \in InvS \right] \quad T_{InvS} = Max_{InvS}$$

$$FALand_{ty,s} = \sum_{\forall t \in T} PLand_t * LandI \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (56)$$

$$FAMch_{ty,s} = \sum_{\forall t \in TM_{ty+s}} Land_t * AMI \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (57)$$

$$FABP_{ty,s} = BPI * \left(BID_{ty} + ITI * ITD_{ty} + CAC * CAD_{ty} + CFI * CFD_{ty} \right) \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (58)$$

$$IC_{ty,s}^f = Cash_{ty,s} + FA_{ty,s} \quad \forall ty \in Ty; \forall s \in S \quad (59)$$

Como se observa en esta sección, se proponen una serie de relaciones entre las inversiones, los costos operativos y los ingresos desde un enfoque centralizado, en el que el mismo inversionista es quien diseña y gestiona la SBSC. El primer subconjunto de restricciones, ecuaciones (4)-(27) representan todas las decisiones de diseño y gestión de operaciones para el eslabón agrícola y la BR. Luego, las ecuaciones (31)-(42) modelan el cálculo de la utilidad neta después de impuestos para cada uno de los periodos de horizonte de planeación. Seguidamente, las fuentes de financiación externa e interna son consideradas, al igual que el flujo de caja, la actualización y cambios del patrimonio, la distribución de dividendos, y por último, la contabilización de los activos fijos, depreciables y diferidos (el cultivo) (ecuaciones (43)-(59)). Finalmente, el modelo MABV puede ser resumido de la siguiente manera.

$Max F(w, y^s) = E_{\xi}[VPN(w, y^s)]$	Desempeño económico centralizado de la SBSC
<i>sujeto a:</i>	
<i>Ecuaciones (4) – (27)</i>	Decisiones del eslabón agrícola y la BR
<i>Ecuaciones (28) – (59)</i>	Restricciones del comportamiento financiero de la SBSC
$w, y^s \geq 0$	

2.2.3. Modelo agrícola y BR EVA (MABE).

El modelo MABV involucra la evaluación del comportamiento financiero del diseño y gestión de la SBSC para el eslabón agrícola y la BR. Sin embargo, la medida de desempeño económico está calculada con el VPN de la utilidad neta, considerando el valor de salvamento y los costos de penalización, sin considerar el costo de capital, representado en el costo de financiación con entidades externas (préstamos), y el costo de capital para los accionistas, que son los financiadores de toda la cadena. Como se planteó en el marco contextual, el valor económico agregado (EVA) ofrece un desempeño económico orientado hacia la sostenibilidad financiera en el largo plazo para la cadena, balanceando entre la eficiencia económica, los costos de capital (de la financiación) y el cumplimiento de las condiciones operativas de la cadena de abastecimiento (Longinidis & Georgiadis, 2013; Ramezani et al., 2014; Jin et al., 2017). En ese sentido, el presente modelo evalúa el desempeño económico del modelo MABV, considerando el VP de los indicadores EVA durante todo el horizonte de planificación, orientando las decisiones de diseño hacia una combinación que

garantice el mejor beneficio para los accionistas.

La nueva función objetivo que modela el valor esperado del desempeño económico se presenta en la Ecuación (74). Los indicadores EVA son modelado para cada periodo del horizonte de planeación y para cada escenario $s \in S$; además, son agrupados y ajustados por el número total de escenarios considerados, a fin de optimizar su valor esperado. Como el EVA considera cálculo del costo ponderado del capital (*WACC, Weighted Average Capital Cost*), y este componente cambia dependiendo de los niveles de endeudamiento y capitalización, la estructura de capital es modelada con el fin de evaluar el comportamiento dinámico del componente económico (ver Ecuación (75)). En ese sentido, el $WACC_t^s$ es modelado en términos de sus componentes constitutivos, los cuales, al multiplicarse con la estructura total de capital, ofrecen la oportunidad de abordar su derivación desde la perspectiva lineal. El $WACC_t^s$ es modelado en función de las variables del estado financiero de situación financiera, tal como se observa en la Ecuación (76). En términos generales, el EVA es calculado como la fracción del beneficio que supera las expectativas de los accionistas, luego que las obligaciones financieras son cubiertas.

$$\text{Max } E_{\xi}[EVA] = \left[\frac{\sum_{t \in Ty, s \in S} (NOPAT_{ty,s}^{+/-} - WACC_t^s * IC_{t,s}) * (1 - DR)^{-1}}{\|S\|} \right] \quad (60)$$

$$WACC_t^s = \text{Costo de Capital}_{t,s} + \text{Costo de la deuda}_{t,s} \quad (61)$$

$$WACC_t^s * IC_{t,s} = [EQ_t^f * CE + (STL_t^f * STIR + LTL_t^f * LTIR) * (1 - TXR)] \quad (62)$$

Finalmente, el modelo MABE puede ser resumido en términos de un problema de TSSP que aborda el desempeño económico (EVA esperado) de manera centralizada para la SBSC en sus eslabones agrícola y la BR. Además, el modelo tiene en cuenta las decisiones de diseño y gestión de las operaciones, así como el comportamiento a nivel financiero de la cadena en función de: fuentes de financiación de inversiones, administración del capital de trabajo y el flujo de caja.

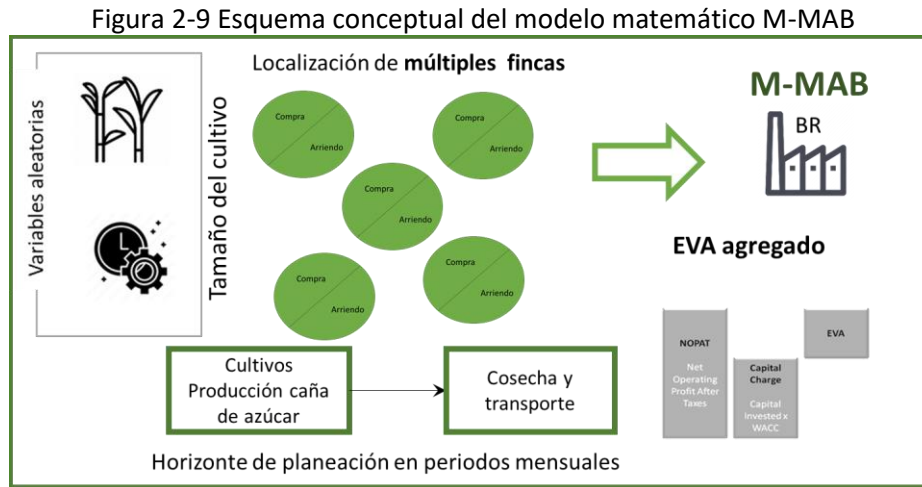
$\text{Max } F(w, y^s) = E_{\xi}[EVA(w, y^s)]$	Desempeño económico centralizado de la SBSC
<i>Sujeto a:</i>	
<i>Ecuaciones (4) – (27)</i>	Decisiones del eslabón agrícola y la BR
<i>Ecuaciones (31) – (59)</i>	Restricciones del comportamiento financiero de la SBSC
<i>Ecuaciones (60) – (62)</i>	Restricciones asociadas al cálculo del indicador EVA
$w, y^s \geq 0$	

2.2.4. Multi-actor modelo agrícola BR EVA (M-MAB)

Los modelos previos tienen un enfoque centralizado respecto al proceso de toma de decisiones, identificando una única compañía que invierte y controla la operación de toda la SBSC. Lo anterior, aunque posible, tiene una baja probabilidad de ocurrencia en un entorno real; en cambio, el escenario más probable para una SBSC en un contexto como el colombiano es que existan múltiples actores que componen el eslabón agrícola y la BR. Cada uno de los miembros de la cadena posee un interés particular e interactúa con los demás actores con el fin de cumplir un objetivo común, producir y vender etanol, así como producir rendimientos económicos mientras se cumple con demanda. En el sentido de acercarse más a la realidad identificada, en esta sección se presenta un modelo matemático que involucra los actores del eslabón agrícola y la BR, individualizando las decisiones de cada actor, su desempeño, y sus interconexiones, tal como se puede observar en la

Figura 2-9.

Adicionalmente, cada una de las fincas tiene características propias que requieren ser tenidas en cuenta al momento de diseñar una SBSC. La localización, el tamaño de la finca, las necesidades de inversión, el tipo de suelo, la topografía, las necesidades hídricas hacen parte de las particularidades de cada actor, y pueden llegar a incidir su factibilidad económica y la de la SBSC. En ese sentido, una de las decisiones que se abordan en este modelo involucran la selección del conjunto de fincas en donde se desarrollará el cultivo para el suministro de la BR. Igualmente, la BR tiene un rol significativo en la SBSC pues, por un lado, es el actor que procesa toda la caña y produce etanol, energía eléctrica y el biofertilizante; y por el otro, representa el rubro de mayor inversión que, por medio de un precio de comercialización con las fincas, genera el flujo de dinero hacia el los eslabones subsiguientes de la cadena.



Fuente: Elaboración propia

En ese sentido, cada una de las fincas son modeladas con las ecuaciones [(4) – (11), (14)]^f $\forall f \in F$. También es posible establecer este conjunto de restricciones para el modelamiento del componente agrícola, desde la perspectiva estratégica, para modelar de forma independiente un conjunto discreto de fincas en las cuales se determina la decisión de localización de fincas y la asignación del tamaño del cultivo, dadas las dimensiones y considerando la distancia como un factor fundamental. Al incluir los diferentes actores de la cadena, el modelo sufre otras modificaciones; por ejemplo, se crean flujos de transporte de semilla entre las fincas y, al mismo tiempo, variables de decisión sobre la caña (semilla) que ingresa y sale de cada finca $CscI_{t,s}^f$ y $CscO_{t,s}^f$, respectivamente. Estas variables afectan el balance de caña de azúcar producida en las fincas, tal como se presenta en las restricciones (63)- (66), remplazando las ecuaciones del modelo agrícola (12) y (13) para el eslabón agrícola. Estas restricciones involucran la adquisición de semilla desde otra finca y la producción de semilla para otras fincas, generándose una oportunidad de comercialización entre las fincas para el desarrollo de los cultivos.

$$\left[\sum_{\forall e \in PVceQ} Harvest_{t,e,c}^f * (SCH_{a,r} + EY_{t,c}^s) * RRC_t \right] \geq Planting_t^f * SCS \quad \begin{matrix} \forall t \in Ty \\ \forall s \in S \\ \forall f \in F \end{matrix} \quad (63)$$

$$\left[\sum_{\forall e \in P \cup W \cup Y \cup V \cup C \in C} \begin{array}{l} Harvest_{t,e,c}^f * (SCH_{a,r} + EY_{t,c}^s) * RRC_t \\ -HC_{t,s}^f - CV_{t,s}^f + CscI_{t,s}^f - CscO_{t,s}^f \end{array} \right] = \begin{array}{l} Planting_t^f * SCS \\ \forall t \in T, y \\ \forall s \in S \\ \forall f \in F \end{array} \quad (64)$$

$$\left[\sum_{\forall e \in P \cup V \cup C \in Q} \begin{array}{l} Harvest_{t,e,c}^f * (SCH_{a,r} + EY_{t,c}^s) * RRC_t \\ -CscO_{t,s}^f \end{array} \right] \geq \begin{array}{l} Planting_t^f * SCS \\ \forall t \in T, y \\ \forall f \in F \\ \forall s \in S \end{array} \quad (65)$$

$$CscI_{t,s}^f \leq Planting_t^f * SCS \quad \begin{array}{l} \forall t \in T, y \\ \forall f \in F \\ \forall s \in S \end{array} \quad (66)$$

Adicionalmente, se incluyen las restricciones de flujo de semilla entre las fincas. En ese sentido, las variables $CSC_{t,g,f}^s$ establecen la cantidad de semilla transportada desde la finca g hasta la finca f durante el periodo t para el escenario s ; además, éstas son usadas en la Ecuación (67), la cual establece que la semilla que ingresa a la finca f es suministrada por alguna de las otras fincas. De manera inversa, la semilla que sale de una finca f es distribuida a alguna otra finca, tal como se muestra en la Ecuación (68). Por otro lado, las decisiones de la BR requieren algunos ajustes; lo primero, corresponde al cambio de la Ecuación (17), la cual se somete a una modificación respecto a la procedencia de la caña suministrada por todas las fincas analizadas; ésta es totalizada en la variable $SugarCan_{t,s}$, tal como se muestra en las ecuaciones (69) y (70).

$$\sum_{\forall g \in F | f \neq g} CSC_{t,g,f}^s = CscI_{t,s}^f \quad \forall t \in T, \forall s \in S, \forall f \in F \quad (67)$$

$$\sum_{\forall g \in F | f \neq g} CSC_{t,f,g}^s = CscO_{t,s}^f \quad \forall t \in T, \forall s \in S, \forall f \in F \quad (68)$$

$$SugarCan_{t,s} = \sum_{\forall f \in F} HC_{t,s}^f \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (69)$$

$$SugarCan_{t,s} = CPB_{t,s} + CP_{t,s} \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (70)$$

Otra de modificación radica en el uso de la maquinaria agrícola para las operaciones de siembra y cosecha, como se muestra en las ecuaciones (71) -(72), respectivamente. Estas ecuaciones sustituyen las ecuaciones (20) y (21). Respecto al balance de tierras para cada una de las fincas, se hacen extensivas las ecuaciones [(22) – (27)]^f $\forall f \in F$. Como cada uno de los actores se considera independiente, el desempeño económico también los es; y en ese sentido, el conjunto de restricciones representadas por las ecuaciones (31)-(62) se individualizan para cada finca y para la BR [(31) – (62)]^g $\forall g \in F \cup BR$. Por lo tanto, quedan definidos el desempeño esperado para las fincas como $E[EVA^f]$ y para la BR $E[EVA^{BR}]$. Por último, la función del desempeño económico se establece en función de los desempeños económicos agregados para los actores de la SBSC, tal como se presenta en la Ecuación (73). Ésta resume el beneficio económico total esperado \overline{EcoP}_{CSC} de la SBSC desde un enfoque centralizado.

$$\sum_{\forall f \in F} Planting_t^f \leq MS_t \quad \forall t \in T \quad (71)$$

$$\sum_{\substack{v \in PUWUY \\ v \in C, \forall f \in F}} Harvest_{t,e,c} \leq MH_t \quad \forall t \in T \quad (72)$$

$$\overline{EcoP}_{CSC} = \sum_{f \in F} E[EVA_f] + E[EVA_{BR}] \quad (73)$$

Finalmente, el modelo M-MAB abarca detalladamente la interacción entre los actores de la SBSC para los eslabones agrícolas y la BR. Aunque el enfoque de diseño es también centralizado, la función objetivo involucra los valores EVA para cada actor de la cadena y, por tanto, cada uno de los miembros tiene un modelamiento independiente. A continuación, se presenta el resumen del modelo propuesto del tipo TSSP.

$Max FO^{eco}(w, y^s) = E_{\xi}[\overline{EcoP}_{CSC}(w, y^s)]$	Desempeño económico centralizado de la SBSC
<i>Sujeto a:</i>	
<i>Ecuaciones [(4) – (11), (14)]^f $\forall f \in F$</i>	Decisiones del eslabón cultivo
<i>Ecuaciones (15), (16), (18), (19)</i>	Decisiones de producción de la BR
<i>Ecuaciones [(22) – (27)]^f $\forall f \in F$</i>	Balance de tierras
<i>Ecuaciones [(31) – (62)]^g $\forall g \in F \cup BR$</i>	Restricciones del comportamiento financiero de la SBSC
<i>Ecuaciones (63) – (68)</i>	Flujo de semilla entre fincas
<i>Ecuaciones (69) – (70)</i>	Consolidación suministro de caña de azúcar para la BR
<i>Ecuaciones (71) – (72)</i>	Límite máximo sobre el uso de la maquinaria agrícola
$w, y^s \geq 0$	

2.2.5. Multi-actor anual modelo agrícola BR EVA (MA-MAB)

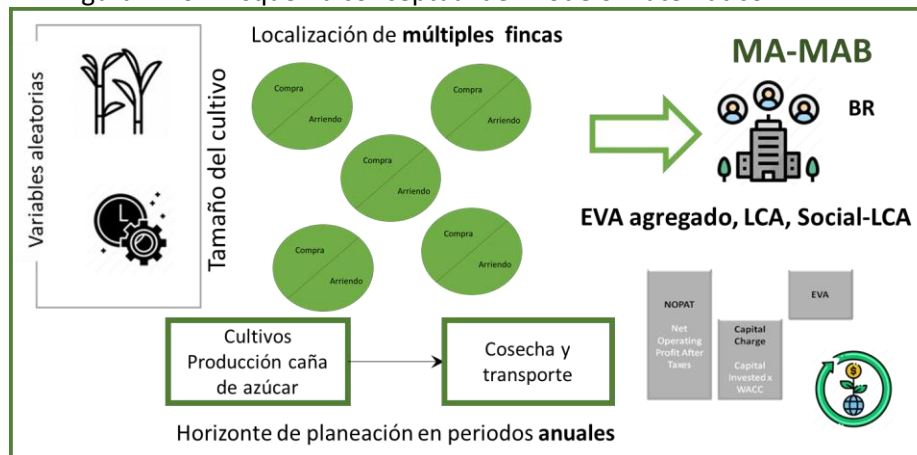
Dado que el modelo anterior exhibe una gran dimensión, tanto en el número de variables de decisión como en la cantidad de restricciones, la complejidad computacional es demasiado alta al buscar obtener una solución óptima para el caso de estudio sobre la SBSC. Aunque la precisión es sacrificada en términos de la generación de planes a mediano y corto plazo, se logra dar manejo a la complejidad de la cadena. En ese sentido, el presente modelo de TSSP presenta una simplificación en los periodos del horizonte de planificación pasando de meses a años en el horizonte de planeación considerado. Eso quiere decir que las decisiones sobre el cultivo y la BR ya no dependerían de los meses, sino que se agrupan en un año. Para realizar esta agregación se planteó un modelamiento matemático equivalente para representar los cultivos de caña de azúcar, el suministro de biomasa y la producción de la BR.

Con el cambio de los periodos del horizonte de planeación, el modelo MA-MAB permite abordar las instancias reales del caso de estudio, reduciendo la dimensión del modelo y su complejidad computacional, y ofreciendo resultados equivalentes al modelo M-MAB. Basado en lo anterior, el MA-MAB permite además incluir la medición las dimensiones sociales y ambientales, junto a la económica, y así buscar una solución orientada al desempeño sostenible de la SBSC. En la Figura 2-10 se presenta un esquema del modelo propuesto, el alcance respecto al desempeño sostenible

y la abstracción de los periodos del horizonte de planeación en términos anuales.

Por consiguiente, se presentan un conjunto de restricciones que modelan los cultivos de caña de azúcar para cada una de las fincas involucradas. Una de las características más sobresalientes del modelo consiste en considerar el efecto de la incertidumbre causada por las condiciones climáticas, tal como se ha venido teniendo en cuenta en los modelos previos. La abstracción a periodos anuales genera una disminución en la precisión del desempeño de los cultivos (al no considerar la edad en meses); sin embargo, se logra una reducción significativa del nivel de complejidad computacional logrando resolver instancias reales del caso de estudio de forma más detallada respecto a los actores de la cadena. Dado lo anterior, el rendimiento del cultivo se refleja en función de las socas en su periodo de maduración de 12 meses.

Figura 2-10 Esquema conceptual del modelo matemático MA-MAB



Fuente: Elaboración propia

Basados en la definición de los múltiples actores presentada previamente, se estableció un conjunto de fincas $f \in F$ y la BR. Cada uno de los actores tienen una localización (lx_f, ly_f) y una dimensión máxima $Dcom_f$ (en hectáreas). En ese sentido, es posible derivar un conjunto de restricciones relacionadas con el cultivo de caña de azúcar para cada una de las fincas; entre ellas las ecuaciones (4)-(11) son representadas por las ecuaciones (74)-(75) en un horizonte de planeación de periodos anuales. La abstracción del horizonte de planeación implica que algunos parámetros sean nuevamente expresados en términos anuales; entre ellos, los costos agrícolas (costo de mantenimiento, arrendamiento de predios, costos administrativos, costos de mano de obra directa, entre otros), la duración de la temporada de cosecha, la capacidad de operación de equipos agrícolas y el procesamiento de la BR. Por otro lado, se realiza un cambio de variable de decisión, la cual representaba el inventario de cultivo de caña de azúcar de edad e y soca c durante el mes t en la finca f , llamada $X_{t,e,c}^f$, por su equivalente $Y_{t,c}^f$ para este modelo, representando el inventario del cultivo en el año t de la soca c para la finca f . Igualmente ocurre con la variable de cosecha $Harvest_{t,e,c}^f$ con t en meses y la cual es cambiada por $Harv_{t,c}^f$ con el periodo (t) en años.

Inicialmente, la Ecuación (74) representa la actualización del área total de caña de azúcar cultivada por cada soca durante cada periodo del horizonte de planeación para cada una de las fincas evaluadas. Esta restricción involucra la siembra de los cultivos durante el año, así como la transición de una soca a otra, dado que el cultivo fue cosechado. La Ecuación (75) evita que las operaciones de

cosecha excedan la cantidad real de caña que está disponible cosechar. Por otro lado, las ecuaciones (76)-(79) establecen el balance entre las cantidades de caña de azúcar cosechadas y la cantidad de caña aprovechada en la siembra de nuevos campos agrícolas, caña transportada a la BR y caña descartada para cada una de las fincas, reemplazando las ecuaciones (63)-(68) que se habían definido para el anterior modelo. Más explícitamente, la Ecuación (76) es incluida con el objetivo de establecer el relacionamiento del área a ser sembrada y los cultivos a ser cosechados, los cuales deben estar habilitados para la producción de semilla. La Ecuación (77) establece el balance entre la cantidad cosechada en cada finca y los posibles usos de la biomasa producida (semilla, suministro, desperdicio), adicionalmente, involucra la cantidad de semilla que se puede vender o comprar a otra finca. La Ecuación (78) establece que la cantidad de semilla producida sea aprovechada en la siembra del mismo cultivo o que se comercialice con otra finca. Por último, la Ecuación (79) garantiza que, si se presenta compra de semilla, ésta se utilice en la siembra de nuevos cultivos.

$$Y_{t,c}^f = \left[\begin{array}{l} (Planting_t^f | c = 1) + (Harv_{t-1,c-1}^f | t > 1, c > 1) \\ + (ISA_{a,c} | t = 1) + (Y_{t-1,c}^f - Harv_{t-1,c}^f | t > 1) \end{array} \right] \quad \forall t \in Ty, \forall c \in C, \quad \forall f \in F \quad (74)$$

$$Y_{t-1,r}^f - Harv_{t-1,c}^f \geq 0 \quad \forall t \in Ty, \forall c \in C, \forall f \in F \quad (75)$$

$$\left[\begin{array}{l} (Y_{t-1,1}^f - Harv_{t-1,1}^f) * (SCH_1 + EY_{t,2}^s) * RRC_t + \\ (Harv_{t-1,1}^f + Y_{t-1,2}^f - Harv_{t-1,2}^f) * \\ (SCH_2 + EY_{t,2}^s) * RRC_t + CscI_{t,s}^f \end{array} \right] \geq Planting_t^f * SCS \quad \begin{array}{l} \forall t \in Ty \\ \forall s \in S \\ \forall f \in F \end{array} \quad (76)$$

$$\left[\begin{array}{l} \sum_{c \in C} Harv_{t,c}^f * (SCH_c + EY_{t,c}^s) * RRC_t - \\ HC_{t,s}^f - CV_{t,s}^f + CscI_{t,s}^f - CscO_{t,s}^f \end{array} \right] = Planting_t^f * SCS \quad \begin{array}{l} \forall t \in Ty \\ \forall s \in S \\ \forall f \in F \end{array} \quad (77)$$

$$\sum_{c \in [1,2]} Harv_{t,c}^f * (SCH_c + EY_{t,c}^s) * RRC_t - CscO_{t,s}^f \geq Planting_t^f * SCS \quad \begin{array}{l} \forall t \in Ty \\ \forall f \in F \\ \forall s \in S \end{array} \quad (78)$$

$$CscI_{t,s}^f \leq Planting_t^f * SCS \quad \forall t \in Ty, \forall f \in F, \forall s \in S \quad (79)$$

2.2.5.1. Modelamiento de la dimensión social

Como se expuso al inicio de este capítulo, la perspectiva social en la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar se puede abordar desde varios puntos de vista. Este modelo propone una evaluación del ciclo de vida de los impactos sociales Social-LCA ocasionados por la operación de la SBSC. Se seleccionaron tres indicadores con la finalidad de obtener beneficios sociales para diversas comunidades pertenecientes a la cadena. Estos fueron: la generación de puestos de trabajo, la huella de tierra para la producción de biocombustibles y la distribución justa de los beneficios económicos entre los actores de la cadena.

Uno de los indicadores de la dimensión social de la sostenibilidad más representativos corresponde a la generación de puestos de trabajo (Barbosa-Póvoa et al., 2017; Govindan et al., 2020). Éste busca atender los intereses de los trabajadores y de sus familias (Benoît et al., 2010), lugar donde se desarrolla la operación de la SBSC. La huella de tierra es otro indicador involucrado en el desempeño social, dado que, al considerarse una cadena de biocombustibles de primera generación, la caña producida para la obtención de biocombustible entra en conflicto con la producción agrícola de productos alimenticios. En ese orden de ideas, este indicador pretende minimizar la cantidad de tierras destinadas para el cultivo de caña de azúcar con destino a la producción de biocombustibles, liberando tierras arables que pueden ser cultivadas para la producción de alimentos. Al minimizar

la huella de tierra, se contribuye con la seguridad alimentaria de la comunidad local, al mismo tiempo que pretende conservar espacios para el desarrollo de la vida silvestre.

Respecto a los actores de la SBSC, identificados como parte de las comunidades que buscan obtener un beneficio, la distribución justa de los beneficios económicos (*FPD, Fairness Profit Distribution*) busca obtener un balance entre ellos, dado que, clásicamente en las ASC, los agricultores con frecuencia son quienes están más expuestos a los riesgos causados por el clima, la baja tecnificación, y la poca estandarización, entre otros aspectos que impactan sus utilidades en comparación con otros eslabones de la cadena (Liu & Papageorgiou, 2018). En ese sentido, abordar el FPD para las SBSC corresponde a una contribución desde el punto de vista del modelamiento de las cadenas agrícolas. Por un lado, desde la sostenibilidad social de la cadena, al buscar que sus actores permanezcan en rangos de utilidad positiva, bienestar económico y permanencia en el largo plazo; y por otro, desde la administración de la cadena de suministro, al mejorar el relacionamiento, comunicación y condiciones de negociación de miembros independientes (L. Liu et al., 2007; Bertsimas et al., 2011; Zheng et al., 2019; Messmann et al., 2020).

De esta manera, mediante la Ecuación (80), se establece el número total de puestos de trabajo generados $TjobG$ a lo largo del horizonte de planeación en la SBSC. Este indicador calcula la mano de obra necesaria en las actividades de siembra, mantenimiento de los cultivos, operaciones de cosecha, transporte de caña desde los cultivos hasta la BR y transporte de semilla entre cada par de fincas. Respecto a la BR se consideran mano de obra necesaria para la construcción de la planta, producción de biocombustible y mantenimiento de instalaciones.

$$TjobG = \sum_{\substack{f \in F \\ t \in Ty}} \left[\begin{array}{l} \text{Planting}_t^f * Njsow + area_t^f * NJmtt + \sum_{c \in C} Harv_{t,c}^f * NJhar \\ \sum_{s \in S} \left[HC_{t,s}^f * Dis_f^{Bio} + \sum_{g \in F | f \neq g} CSC_{t,f}^g * Dis_f^g \right] * \frac{NJtrans}{\|S\|} \\ \sum_{s \in S | j \in P} \left[\frac{Production_{t,s}^j * NJpb^j + Supply_t^s * NJBRmtto}{\|S\|} \right] + NJconst \end{array} \right] \quad (80)$$

Por otro lado, la modelación de la huella de tierra busca minimizar la cantidad de terrenos utilizados para la producción de biocombustibles, considerando las tierras adquiridas y rentadas. En estricto sentido, si se utiliza más área para la producción de biocombustibles, se aumenta la huella de tierra, afectando la dimensión social al ocupar tierras que pueden ser aprovechadas para la producción de alimentos o para la conservación de la vida silvestre. En la Ecuación (81) se presenta el cálculo de la huella de tierra para la SBSC LFP , a partir de la cantidad máxima de área utilizada en cada una de las fincas seleccionadas $MaxLand_f$ a lo largo del horizonte de planeación. Éstas son obtenidas por medio de la Ecuación (82) para cada una de las fincas.

$$LFP = \sum_{\forall f \in F} MaxLand_f \quad (81)$$

$$MaxLand_f \geq Land_t^f \quad \forall t \in Ty \quad \forall f \in F \quad (82)$$

Respecto al FPD, su modelación se hizo a través de la maximización del beneficio económico mínimo \overline{ECOM}_{FPD} entre cada uno de los eslabones de la cadena, tal como se expresa en las ecuaciones (83) y (84). En la primera, se genera una cota superior con el desempeño agregado del eslabón agrícola y, en la segunda, el desempeño económico exhibido por la BR.

$$\overline{ECOM}_{FPD} \leq \sum_{f \in F} E[EVA_f] \quad (83)$$

$$\overline{ECOM}_{FPD} \leq E[EVA_{BR}] \quad (84)$$

Con el objetivo de realizar una valoración objetiva de la dimensión social en la sostenibilidad, en se propone el uso de la metodología de análisis social de ciclo de vida Social-LCA (Benoît et al., 2010; Pelletier et al., 2018), la cual se compone de cuatro fases: definición de objetivo y alcance, análisis de inventario, valoración de impacto, e interpretación. Respecto al objetivo y el alcance, el modelo propuesto busca medir el impacto social del diseño y operación de una SBSC tal como se presentó en el alcance del modelo conceptual. Respecto al análisis de inventario de los impactos sociales, previamente se han definido tres indicadores que evalúan aspectos sociales en diferentes categorías de impacto (empleados, comunidad local, sociedad general y miembros de la cadena); de igual manera, las ecuaciones (80) – (84) relacionan las diversas decisiones estratégicas y tácticas que permiten identificar el inventario de impactos sociales y su valoración potencial.

Seguidamente, la valoración de impactos involucra un proceso sistemático de agregación de cada uno de los indicadores evaluados. Varios autores, tales como van Eijck et al. (2014); Fattahi & Govindan (2018) y Morales Chavez et al. (2020), han utilizado diversas técnicas para la valoración de múltiples dimensiones sociales, en las cuales se usó una misma escala de valoración y, pesos ponderados basado en expertos, uno de ellos considerando límites difusos. Sin embargo, no hay una guía o metodología definida en la literatura que permita la agregación de los indicadores (Messmann et al., 2020). Por lo tanto, este trabajo propone la valoración de los impactos a través de la programación compromiso, la cual, de una manera estandarizada basada en los límites de cada indicador, ofrece una metodología para establecer las ponderaciones o niveles de importancia relativa, tal como se muestra en las ecuaciones (85)-(86). Por tanto, el desempeño social (δ) se establece como la máxima desviación de los indicadores sociales respecto a los límites establecidos y su importancia relativa.

$$\text{Min } FO^{soc}(w, y^s) = E_{\xi}[\delta(w, y^s)] \quad (85)$$

Sujeto a:

$$\alpha_1 * \frac{TJobG^* - TJobG}{TJobG^* - TJobG_*} \leq \delta, \quad \alpha_2 * \frac{FPD^* - FPD}{FPD^* - FPD_*} \leq \delta, \quad \alpha_3 * \frac{LFP^* - LFP}{LFP^* - LFP_*} \leq \delta \quad (86)$$

2.2.5.2. Modelamiento de la dimensión ambiental

La cadena de abastecimiento de los biocombustibles está compuesta por múltiples actividades que generan impactos ambientales; entre ellas, los cultivos de caña de azúcar, el transporte de semilla, la cosecha de caña de forma mecanizada, así como la producción y distribución de biocombustible $ope = \{Crop, TranstM, TransbF, Prod\}$. Diferentes factores de contaminación y toxicidad se pueden identificar en este tipo de agroindustria, entre los que se pueden mencionar: el potencial de generación de calentamiento global, el consumo de agua dulce, la eutrofización de cuerpos de agua dulce, la afectación a la capa de ozono, y la utilización de tierras agrícolas. Para su modelación, los impactos ambientales \mathcal{K} fueron agrupados en un conjunto de factores de afectación de punto intermedio \mathbf{K} . Como se estableció en la revisión de literatura (Capítulo 1), el desempeño ambiental es comúnmente abordado desde los principios del LCA (*Life Cycle Assessment*).

Varios autores han abordado la dimensión ambiental a través de la evaluación del ciclo de vida en la industria de la caña de azúcar desde diferentes perspectivas. Sin embargo, el método ReCiPe es

una herramienta que ha venido ganando adeptos gracias a la facilidad para involucrar las valoraciones LCI en los modelos que optimizan la cadenas de abastecimiento (Barbosa-Póvoa et al., 2017; Macowski et al., 2020). En ese sentido, este modelo involucra el método ReCiPe 2016 para valorar los impactos ambientales de las operaciones de la SBSC. Por un lado, calcula el inventario de emisiones del ciclo de vida (LCI); por el otro, propone un indicador ambiental integrado, el cual es normalizado a través de los factores o categorías de impacto analizados. Además, el LCA se calcula simultáneamente con las dimensiones económica y social, conformando en el enfoque completo del TBL.

Como se mencionó antes, la SBSC exhibe cuatro operaciones que afectan al medio ambiente a través de múltiples emisiones de contaminantes, para las cuales fue posible identificar su impacto ambiental. Los cultivos de caña de azúcar generan un impacto por el desarrollo de sus actividades de siembra, mantenimiento de cultivo y cosecha de caña; este aspecto se considera a través del tamaño del cultivo por cada periodo del horizonte de planeación. Respecto a la producción de la BR, la cantidad de etanol producido es el encargado de representar el nivel de impacto, teniendo en cuenta los productos químicos utilizados, sus emisiones, la utilización de agua dulce, así como los impactos al aire y a la tierra. Respecto al transporte de caña, se consideran dos tipos de impactos; el primero desde los campos agrícolas hacia la BR y el segundo, el transporte de semilla entre las fincas. Estos últimos tres componentes son incluidos por medio su valor esperado por ser del dominio de los escenarios, ya que estas variables son representativas de la segunda etapa del modelamiento de programación estocástica.

Con los impactos ambientales identificados, es posible calcular el inventario de impactos durante en el ciclo de vida del bioetanol, tal como se muestra en la Ecuación (87). En esta ecuación se incluyen el impacto ambiental producido por cada una de las operaciones $\omega_{\mathcal{K}}^{ope}$. Seguidamente, la afectación ambiental total es determinada a través de la Ecuación (88), en la cual se multiplican cada uno de los inventarios de impacto ambiental calculado y su correspondiente factor de impacto $\mathcal{V}_{\mathcal{K}}$. Los factores son obtenidos del método ReCiPe 2016 para una valoración ambiental integral (Huijbregts et al., 2017). Finalmente, se calcula la función objetivo de la dimensión ambiental TID , la cual busca minimizar el impacto ambiental de la producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar.

$$LCI_{\mathcal{K}} = \frac{\sum_{t \in T} \left[\omega_{\mathcal{K}}^{Crop} * area_t^f + \sum_{s \in S} \omega_{\mathcal{K}}^{Prod} * \frac{Production_{t,s}^1}{\|S\|} \right] + \sum_{\forall t \in T, \forall s \in S, \forall f \in F} \left[\frac{\omega_{\mathcal{K}}^{TransM} * HC_{t,s}^f * Dis_f^{BR} + \sum_{\forall f \in F} \omega_{\mathcal{K}}^{TransbF} * CSC_{t,f,g} * Dis_f^g}{\|S\|} \right]}{\|S\|} \quad \forall \mathcal{K} \in \mathbf{K} \quad (87)$$

$$TID = \sum_{\forall \mathcal{K} \in \mathbf{K}} \mathcal{V}_{\mathcal{K}} * LCI_{\mathcal{K}} \quad (88)$$

2.2.5.3. Resumen del modelo MA-MAB

Una vez realizada la abstracción de los periodos del horizonte de planeación en años a través de las restricciones equivalentes respecto al manejo del cultivo, involucrado las ecuaciones para la evaluación de las dimensiones social y ambiental, es posible consolidar un modelo más detallado respecto a la interacción de los múltiples actores de la SBSC. El MA-MAB involucra las decisiones de localización de fincas y la asignación del tamaño de los cultivos considerando el suministro y la capacidad de producción de la BR. Adicionalmente, se abordan las decisiones de flujo de productos

desde las fincas hacia la BR, al igual que se incluyen las decisiones de producción de caña de azúcar, y de biocombustibles. Por último, cada una de las dimensiones del desempeño sostenible son calculadas con el fin de ser optimizadas. Como se mencionó en el modelo conceptual, se consideran las fuentes de incertidumbre sobre el desempeño del cultivo y la duración de la temporada de cosecha. En ese sentido, se presenta el resumen del modelo de TSSP MA-MAB a continuación.

$\max E_{\xi}[\overline{EcoP}_{CSC}(w, y^s)], \min E_{\xi}[\delta(w, y^s)], \min E_{\xi}[TID(w, y^s)]$		Desempeño sostenible de la SBSC
<i>Sujeto a:</i>		
<i>Ecuaciones (74) – (79)</i>		Decisiones del eslabón cultivo
<i>Ecuaciones (15), (16), (18), (19)</i>	$\forall t \in Ty$	Decisiones de producción de la BR
<i>Ecuaciones [(22) – (27)]^f</i>	$\forall f \in F$ $\forall t \in Ty$	Balance de tierras
<i>Ecuaciones [(31) – (62)]^g</i>	$\forall g \in F \cup BR$ $\forall t \in Ty$	Restricciones del comportamiento financiero de la SBSC
<i>Ecuaciones (63) – (68)</i>	$\forall t \in Ty$	Flujo de semilla entre fincas
<i>Ecuaciones (69) – (70)</i>	$\forall t \in Ty$	Consolidación suministro de caña de azúcar para la BR
<i>Ecuaciones (71) – (72)</i>	$\forall t \in Ty$	Límite máximo sobre el uso de la maquinaria agrícola
<i>Ecuaciones (80) – (86)</i>		Desempeño social PC
<i>Ecuaciones (87) – (88)</i>		Desempeño ambiental LCA
$w, y^s \geq 0$		

2.3. Conclusiones Parciales

Durante el desarrollo de este capítulo se presentó la estrategia metodológica utilizada respecto a cómo comprobar la hipótesis propuesta a través de la investigación de operaciones. En ese sentido, se incluyó la formulación del modelo conceptual compuesto por el proceso de acercamiento al objeto de estudio, la definición del alcance y, la esquematización conceptual junto a su derivación en los modelos matemáticos, los cuales se presentan con el fin de refinar las dimensiones del desempeño sostenible. Seguidamente, se establecen los modelos matemáticos junto a su justificación y potencialidad. Por tanto, múltiples conclusiones se derivan de la fase de modelación, las cuales se listan a continuación.

1. El modelo conceptual y los modelos matemáticos propuestos contribuyen al estado del arte del campo de las SBSC en términos de la identificación de las decisiones que deben ser integradas para los niveles estratégicos y tácticos, así como las operaciones de producción de caña de azúcar (componente agrícola) y de biocombustibles (eslabón industrial). Ese sentido, el modelo conceptual reúne el marco metodológico con el cual se va a dar solución a la pregunta de investigación y con miras a la comprobación de la hipótesis planteada.
2. Los modelos matemáticos propuestos consideran los efectos incertidumbre causados por las condiciones climáticas en el desempeño de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha, las cuales afectan de manera transversalmente la SBSC. Esta fuente de

incertidumbre no ha sido considerada en la literatura de las SBSC, y mucho menos relacionada en modelos de optimización estocástica basados en simulación de escenarios. Por consiguiente, la utilización de la cadena de Markov para el modelaje de variables correlacionadas, es considerada una contribución científica que reduce la dimensionalidad de los modelos y su complejidad computacional.

3. Por medio de los modelos MAg, MABV y MABE se logró refinar la dimensión económica de la SBSC, desde el punto de vista centralizado, contribuyendo al estado del arte con un enfoque de evaluación que considera: un horizonte de planeación compuesto por una etapa de inversión y otra de operación; las decisiones de financiación de las inversiones y del capital de trabajo; evaluación financiera de la cadena; administración del flujo de caja; y la optimización del valor económica agregado (EVA) como medida de sostenibilidad financiera de largo plazo para toda la SBSC.
4. El desempeño social es una dimensión de la sostenibilidad poco explorado en las SC, particularmente, para las SBSC solo ha sido abordado desde la generación de puestos de trabajo. En ese sentido, el modelo MA-MAB genera aportes significativos al campo de estudio de la sostenibilidad social de la SC. Dicho modelo contribuye con un enfoque metodológico que se basa en el análisis del ciclo de vida de los impactos sociales (Social LCA) para diversas comunidades intervinientes en la cadena. Dicha evaluación multidimensional involucra la generación de puestos de trabajo, la reducción de la huella de tierra y la distribución justa de los beneficios económicos entre los actores de la cadena.
5. Adicional a la medición de los desempeños económico y social, por medio de la metodología LCA se logró modelar los impactos ambientales ocasionados por la operación de la SBSC para diferentes fuentes de emisiones, los cuales afectan a la naturaleza, al aire, al agua y a la salud humana. Por lo tanto, se genera una contribución significativa al proponer un marco de evaluación que considero la minimización de los impactos ambientales de los eslabones agrícola e industrial, de manera simultánea.
6. Finalmente, el enfoque de sostenibilidad es abordado en sus tres dimensiones para la SBSC, considerando las decisiones de diseño y gestión de operaciones del eslabón agrícola y la BR en un ambiente de incertidumbre, contribuyendo así al campo de los biocombustibles y a las cadenas de abastecimiento agrícolas. Por otro lado, al involucrar los 5 modelos de optimización no solo se están refinando el desempeño de la cadena en términos económicos, sino también, reduciendo la complejidad computacional intrínseca de la cadena. Teniendo en cuenta las características anteriores, el modelo MA-MAB permite resolver la pregunta de investigación, al igual que ofrece los medios metodológicos suficientes para la comprobación de la hipótesis.

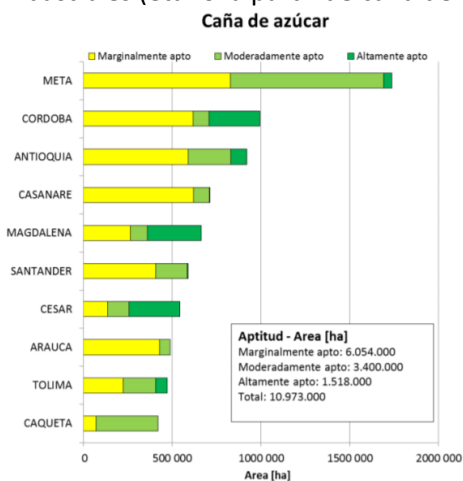
3. Capítulo 3. Resultados

En este capítulo se introduce el caso de estudio con el cual se prueban los modelos propuestos, así como los resultados para cada uno de ellos. El caso de estudio escogido corresponde a la evaluación de un proyecto de inversión para la producción de biocombustibles en una nueva área de potencial agrícola en Colombia. Se incluye la modelación de las fuentes de incertidumbre y la generación de escenarios para la construcción del modelo de TSSP. Seguidamente, los modelos propuestos son aplicados al caso de estudio, de los cuales se obtienen los resultados de la dimensión económica, social y la ambiental, así como, cada uno de los análisis de sensibilidad conducidos.

3.1. Descripción general del caso de estudio

El caso de estudio seleccionado para validar los modelos propuestos corresponde a una situación real en una zona de expansión agrícola en Colombia, en la cual se está desarrollando un proyecto de producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar. Este proyecto pretende implementar tecnología de primera generación para la producción de etanol y desarrollar un conjunto de cultivos de caña de azúcar para garantizar el suministro de la BR. El caso de estudio se localiza en una de las regiones identificadas por el Gobierno Nacional como zonas de expansión agrícola con gran potencial para el desarrollo de proyectos de biocombustibles a partir de caña de azúcar, tal como se muestra en la *Figura 3-1*, particularmente, en el Departamento del Meta. Sin embargo, en esta región ha existido poco desarrollo agroindustrial alrededor de la caña de azúcar, a pesar de contar con las características ideales para el desarrollo del cultivo tales como, clima, calidad del suelo, piso térmico y disponibilidad de tierras agrícolas con tradición agropecuaria de extensión.

Figura 3-1 Regiones y sus potenciales áreas de expansión agrícola con el fin de producir biocombustibles (etanol a partir de caña de azúcar)



Fuente: adaptado a partir de Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2012), (p. 34)

En la Figura 3-1 no se incluyen las regiones en donde hoy en día se encuentra el desarrollo de la industria del azúcar y el etanol en el país, compuesta por los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda, Cauca y Valle del Cauca. En dicha región se alza un clúster agroindustrial que, para el año 2018, tenía un área total sembrada en caña de azúcar de aproximadamente 232 mil hectáreas (Procaña, 2018). Este clúster exhibe una producción de 24 millones de toneladas de caña y 456

millones de litros de bio-etanol. Sin embargo, la expansión de esta economía agroindustrial presenta limitaciones debido a la ausencia de áreas cultivables disponibles (Londoño, 2017). En consecuencia, nuevos proyectos agro-industriales podrían ser viables únicamente en nuevas *zonas de expansión agrícola*, las cuales se encuentran, mayormente, en territorios del país que, antes del proceso de paz, estaban afectados por la acción de grupos armados rebeldes. Entre los departamentos con mayor potencialidad se encuentran Meta, Córdoba, Antioquia, Casanare, Magdalena; sin embargo, respecto a las zonas para abordar el centro del país, zona de mayor demanda de etanol, se identifican a Meta, Tolima, Antioquia (Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2012).

El caso de estudio apunta a la construcción de una planta de biocombustibles ubicada en una zona con alto potencial agrícola, la cual forma parte de los territorios recuperados (luego de los acuerdos de paz). Este tipo de proyectos son de alto interés para el Gobierno Nacional, no solo por su contribución al desarrollo económico del país, sino también, por el aporte al desarrollo social del territorio (Departamento Nacional de Planeación, 2008; Ramirez, 2021b). Además, la producción de biocombustible de primera generación puede considerarse como una amenaza a la seguridad alimentaria, en particular, porque el cultivo actual de caña de azúcar es insuficiente para suplir la demanda de azúcar (actual) y de bio-etanol en el país, de manera simultánea (Ramirez, 2021a). En consecuencia, es necesario evaluar nuevas zonas para el desarrollo agrícola

Como se mencionó previamente, el gobierno proyecta un crecimiento de la demanda de biocombustibles. Por lo tanto, es necesario incrementar el área de cultivo de caña de azúcar siendo amigables con el medio ambiente, así como financieramente viable. Con relación a la industria actual de procesamiento de caña de azúcar, la producción depende de las capacidades instaladas y del precio internacional del azúcar. En ese sentido, si el precio del azúcar se encuentra en un nivel atractivo, la producción de azúcar blanco se incrementa, reduciendo la oferta de etanol; en el caso contrario, el precio del etanol es superior al de azúcar, la oferta se incrementa. Particularmente, el Gobierno Nacional se ha visto obligado a establecer medidas transitorias para suspender, incrementar y/o reducir el nivel de mezcla a varias zonas del país, tales como las resoluciones 4898 de 2011, 40185 de 2018 y 40100 de 2021 del Ministerio de Minas y Energía. De igual manera se presentan presiones por los precios internacionales y nacionales de la gasolina, tal como se presenta la fórmula de cálculo del precio de etanol en la Resolución 18-1232 de 2008, generando un efecto adverso para el mercado de etanol cuando existen precios bajos para la gasolina.

Respecto a las características del caso de estudio propuesto, el proyecto se estima para una capacidad de producción en la biorefinería de 400.000 litros de alcohol por día. Esta capacidad se establece con el fin de obtener el etanol suficiente para soportar la demanda anual en Bogotá y del Departamento del Meta, la cual se calculó en 73 millones para el año 2017 (UPME, 2018). De igual manera, se establecieron 190 días promedio de producción en la zona de expansión evaluada. Toda la producción es destinada al mercado de comercialización de gasolina oxigenada del país. Lo anterior, exige que el etanol sea desnaturalizado en la fuente, con el fin de evitar el consumo en otros contextos, tales como, producción de bebidas alcohólicas, sustancias ilícitas, entre otras. Por otro lado, todo el etanol producido debe ser transportado a los centros de mezcla, en el cual será combinado con la gasolina corriente con el fin de obtener gasolina oxigenada, la cual es distribuida a las estaciones de servicio para su consumo.

A nivel de la BR, se asume un rendimiento de 72,5 litros de etanol por tonelada de caña, lo cual implica que 5.500 toneladas de caña de azúcar deben ser enviadas diariamente desde los campos agrícolas hasta la biorefinería para ser procesadas. Respecto al componente agrícola, los

rendimientos de los cultivos dependen de múltiples factores. Sin embargo, este trabajo sustenta que la edad del cultivo y el número de cortes realizados (socas) son los factores principales, los cuales impactan directamente en el rendimiento (Colin, 2009; Bocca & Rodrigues, 2016).

El rendimiento del cultivo, para el contexto colombiano, ha sido estimado en 110 t/ha para su etapa de madurez de 12 meses (Londoño, 2017). Esta estimación permite modelar el crecimiento de la caña y determinar la ganancia de biomasa del cultivo a lo largo del tiempo, tal como se estableció en la Figura 1-4. Para efectos prácticos del caso de estudio, se estimaron tres dimensiones de rendimiento del cultivo (promedio, mínima y máxima) para cada combinación de factores edad y soca. También, se asume que: (1) el cultivo incrementa su biomasa a medida que su edad crece; (2) a medida que el número de cortes de caña se incrementa (socas), el rendimiento del cultivo se reduce. Como consecuencia de lo anterior, el cultivo debe ser renovado luego del quinto corte, dado que los rendimientos de socas más avanzadas no son económicamente viables debido a la baja producción de biomasa. Por tanto, como sucede en la realidad del cultivo de caña de azúcar, el primer corte es el más productivo.

En adición, se asume la tecnología mecanizada para el desarrollo de la operación de siembra con un consumo estimado de semilla de 20 t/ha toneladas por hectárea plantada (Hua et al., 2013). Por otro lado, un factor relevante que afecta negativamente el rendimiento de la biomasa corresponde al desarrollo del cultivo en una zona potencial sin tradición agrícola, dado que la adaptabilidad del clima, la calidad del suelo y la curva de aprendizaje técnico, afectan su desempeño. Adicionalmente, el rendimiento del cultivo puede verse afectado positiva o negativamente por las condiciones climáticas que se presentan en la zona geográfica evaluada, particularmente la temporada de lluvia (Bezuidenhout & Singels, 2007a). En esta vía, para el presente caso se asumieron tres niveles de afectación del rendimiento del cultivo: bajo rendimiento (p^l), rendimiento promedio (p^a), y alto rendimiento (p^u). Estas afectaciones corresponden a un ciclo de producción anual, dado que los regímenes de lluvia tienden a cambiar año tras año, debido a dinámicas del clima. Por lo tanto, el rendimiento de los cultivos es analizado como una fuente de incertidumbre para el caso de estudio.

Colombia está localizada en la zona intertropical, y allí se identifican dos temporadas climáticas, claramente definidas: temporada de lluvia y seca. En una de las regiones del departamento del Meta, con gran potencial para establecer la nueva biorefinería presenta un régimen de lluvia promedio de 2.500 mm por año. Desde el punto de vista operacional no se recomienda realizar actividades agrícolas en periodo de lluvias fuertes, debido a los riesgos potenciales sobre el rendimiento de los cultivos. Por tanto, se implementó un modelo de regresión lineal con ajuste estacional, en el cual se determinó el número de días de operación en los que se puede llevar a cabo la cosecha de manera exitosa, y se proponen tres escenarios posibles: pesimista (h^l), promedio (h^a), optimista (h^u), correspondiente a 158, 190 y 216 días de operación al año, respectivamente (Bezuidenhout & Singels, 2007b). Del mismo análisis se extrapoló el nivel de eficiencia del equipo de siembra y el nivel de eficiencia del equipo de cosecha. De esta manera, se define la duración anual de la temporada de cosecha como la segunda fuente de incertidumbre que es considerada en el caso de estudio.

Este análisis consistió en la transformación del nivel de pluviometría histórica de la región, recolectada en tres puntos geográficamente distribuidos, durante un periodo de 10 años y recolectados por la autoridad climática de Colombia. Inicialmente, los expertos de la operación agrícola establecieron un nivel de lluvia diaria tolerable para realizar la operación de cosecha mecanizada sin la destrucción del cultivo. Para lo anterior, se tuvo en cuenta la calidad de suelo, la

capacidad de absorción y de drenaje. Con la transformación de los datos en términos de días habilitados para la operación; también, se esquematizó el procedimiento para la definición de la temporada de cosecha, descartando los meses en donde los días de no operación exceden el 40% del mes, al igual que meses consecutivos con la misma situación. Los resultados del modelo pueden ser discretizados en tres escenarios, de acuerdo con los percentiles mensuales de la estimación. Por otro lado, la información de pluviometría es el principal insumo para la estimación del desempeño del cultivo. En ese sentido, los expertos en la producción de caña expresan la relación que existe entre los niveles de lluvia y su efecto positivo y negativo en el rendimiento del cultivo. Además, con un cultivo experimental de 100 hectáreas, y con experiencias de otras zonas geográficas similares, se establecieron las probabilidades de transición.

Considerando la transformación de los niveles de pluviometría en días operativos de cosecha, y los estados discretos del cálculo de la duración de la temporada de cosecha, se logró identificar tres estados anuales; de igual manera para el rendimiento de los campos agrícolas. Así mismo, se evidenció las correlaciones existentes entre ambas fuentes de datos y su grado de incertidumbre, ambas movilizadas mayormente por la aleatoriedad de las condiciones climáticas. Lo anterior se alinea con múltiples trabajos que relacionan la predicción de las condiciones climáticas y el rendimiento de los cultivos agrícolas (Matis et al., 1985; Bojesen et al., 2015; Kumar et al., 2015). En ese sentido, se asume que las condiciones futuras solo dependen de la actual y no de las condiciones pasadas, en consecuencia, se asume la propiedad de no memoria propia de los procesos estocásticos estacionarios en el tiempo (Kulkarni, 2016; Ross, 2014).

Basados en lo anterior, en esta tesis se modeló la incertidumbre ocasionada por las condiciones climáticas sobre dos elementos importantes del sistema en estudio: el rendimiento de los cultivos p^e y la duración de la temporada de cosecha h^k ; donde k y e representan los posibles estados de cada variable aleatoria, respectivamente; lo anterior con base en los aportes previos de esta tesis doctoral publicados en Carvajal et al. (2019). Las dos fuentes de incertidumbre se ven afectadas anualmente y son modeladas de manera conjunta como una cadena de Markov de tiempo discreto. Los estados de la cadena representan el nivel anual de cada una de los factores, tales como: alto u optimista (p^u), promedio (p^a) y bajo o pesimista (p^l) para el desempeño del cultivo; igualmente ocurre con la duración de la temporada de cosecha h^e .

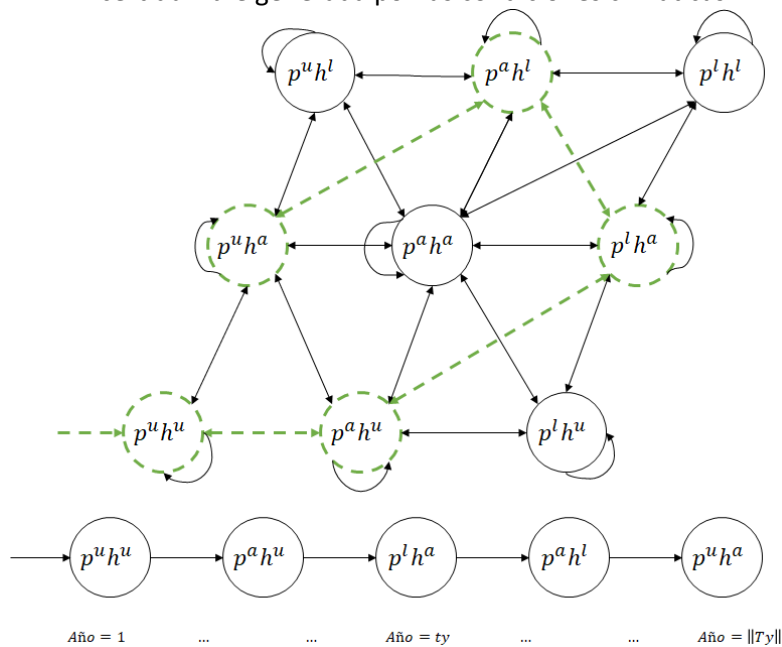
Se considera un estado conjunto entre las dos fuentes de incertidumbre ($p^e h^k$) el cual referencia los posibles eventos que pueden ocurrir si la lluvia anual exhibe cierto nivel. Este modelo obedece a un estudio de estadístico sobre la influencia de los niveles de pluviometría anual y su correlación con el desempeño operativo y los rendimientos del cultivo piloto de una compañía que soporta este caso de estudio. Dicho estudio fue conducido por el autor de esta tesis y tienen como base los estudios de correlación de factores agrícolas y pecuarios (Matis et al., 1985; Bojesen et al., 2015). Por otro lado, el proceso estocástico permite capturar la correlación intrínseca existente entre las dos variables de estudio, y la influencia (incertidumbre) que ejercen las condiciones climáticas. Así mismo, este proceso se percibe como una caminata aleatoria entre los tiempos discretos que avanzan entre el conjunto de estados simultáneos, facilitando su modelamiento a través de las probabilidades de transición entre los estados durante el horizonte de planeación. Este tipo de modelamientos reducen la complejidad computacional en el análisis de variables de estado conjunta, la facilidad de muestreo y su fácil validación (Standfield et al., 2014).

En ese sentido, la matriz de transición de estados es derivada a través de la probabilidad conjunta y la probabilidad condicional (regla de Bayes), sobre los eventos de cada uno de los factores,

considerando los datos históricos de la región evaluada (Ross, 2014). En consecuencia, el grafo de transición permite visualizar cómo se modela el efecto de las condiciones climáticas sobre la combinación entre los dos factores, rendimiento del cultivo y la duración de la temporada de cosecha, y cómo estos factores se combinan, en sus diferentes niveles, a lo largo del horizonte de planificación. Finalmente, al usar la técnica de simulación de Monte Carlo recrea una caminata aleatoria de la cadena de Markov (Kulkarni, 2016), con la cual es posible generar un conjunto de escenarios que representan los estados de cada uno de los factores de incertidumbre durante el horizonte de planificación.

A manera de ejemplo, en la Figura 3-2 se puede observar una caminata aleatoria, en línea discontinua verde, la cual inicia en el año 1 con un desempeño del cultivo (p^u) alto y una temporada de cosecha alta (h^u); el año siguiente el cultivo es promedio (p^a), seguidamente, se afectan los dos factores, ($p^l h^a$), y así sucesivamente hasta terminar la caminata aleatoria al final del horizonte de planificación. En ese sentido, cada escenario genera una combinación de realizaciones de las variables de incertidumbre, estableciendo anualmente la duración de la temporada de cosecha y el nivel de rendimiento que exhibirá el cultivo por la influencia de las condiciones climáticas. En la Figura 1-4 se establece el nivel de variabilidad del cultivo de caña para una edad y una soca específica, y en ese sentido, la cadena de Markov establece el nivel de variabilidad anual del rendimiento del cultivo para cada uno de los escenarios. Por otro lado, la combinación de estados a lo largo del horizonte de planificación, establece los días totales de operación por cada uno de los años, influenciando las necesidades de suministro de caña y la demanda sobre el cultivo.

Figura 3-2 Grafo de transición entre los estados de la cadena de Markov que modela la incertidumbre generada por las condiciones climáticas



Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la generación de los escenarios, se utilizó la simulación de Montecarlo para generar las realizaciones de las variables aleatorias estudiadas. Se utiliza un estado inicial ($p^a h^a$) y luego se simulan las transiciones entre los años del horizonte de planificación con base en las probabilidades de transición $P_{(p^m h^n), (p^i h^j)} \{x_{k+1} = (p^i h^j) \mid x_k = (p^m h^n)\}$ para un $i, j, m, n \in \{l, a, u\}$, y

utilizando el método de transformación inversa para distribuciones de probabilidad discretas.

Por último, los costos, precios, inversiones y datos técnicos relacionados con el eslabón agrícola e industrial, son obtenidos por parte de datos primarios, facilitados por una empresa del sector biocombustibles en Colombia, la cual compartió la información con propósito académico para el desarrollo de esta investigación, por lo que se mantiene la reserva de su identidad. La información recopilada es complementada y validada por diferentes estudios de la literatura (ver Tabla 3-1). La información adicional utilizada en cada uno de los modelos es presentada a lo largo de este capítulo con el fin de ofrecer mayor claridad frente a los resultados obtenidos.

Tabla 3-1 Fuentes de información usadas en el proceso de estructuración del caso de estudio

Fuente	Información tomada de la fuente
Carvajal et al. (2019)	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de la biorefinería • Efecto de las condiciones climáticas en las operaciones agrícolas • Costos, inversiones y precios
Colin (2009)	Rendimientos de cultivo por soca cosechada
van den Wall Bake et al. (2009)	Tasas de producción
de Souza Dias et al. (2015)	Producción de vinazas concentradas (biofertilizante)
Gobierno Digital Colombia (2018)	Precios de biocombustibles

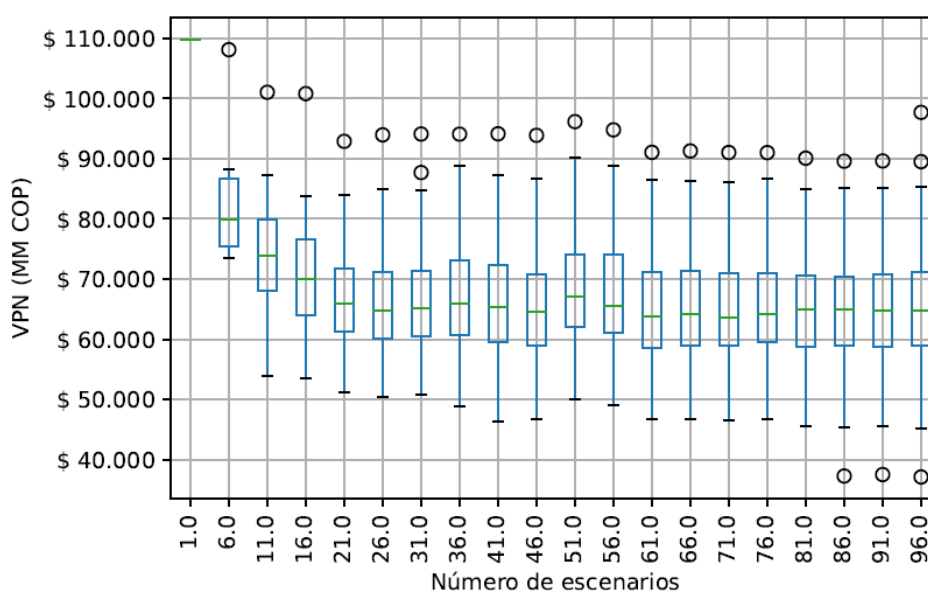
Una vez consolidada la información técnica y contextual del caso de estudio, se elaboró una rutina computacional con el fin de modelar las fuentes de incertidumbre para el caso de estudio, considerando diferentes factores relevantes, tales como: horizonte de planificación (años); número de fincas, tamaño y disponibilidad de área; distribución geográfica de las fincas con relación a la localización de la biorefinería; precios del bioetanol basado en los valores históricos en Colombia, conversión del precio de la caña de azúcar, modelación del costo de adquisición de la tierra y curvas de adaptabilidad del cultivo en una nueva zona de expansión agrícola. La rutina de creación del caso de estudio, contiene una instancia del problema y los múltiples escenarios generados por medio de la simulación de la caminata aleatoria; además, permite realizar diversos análisis de sensibilidad en las diferentes perspectivas del desempeño sostenible.

3.2. Resultados del modelo del eslabón agrícola MAg

Con el fin de evaluar el desempeño económico para el eslabón agrícola, se generó una instancia del caso de estudio. Tal como se estableció en el modelo MAg en la sección 2.2.1, éste es utilizado para diseñar el eslabón agrícola de la SBSC, en lo correspondiente al desarrollo de los cultivos, la adquisición de tierras y las actividades de siembra y cosecha. El MAg fue codificado a través del ambiente de programación Python 2.7 y se utilizó el optimizador Gurobi 9.0 para encontrar la solución óptima del problema. Como la instancia generada involucra la caminata aleatoria de las fuentes de incertidumbre evaluadas (desempeño del cultivo y días de duración de la temporada de cosecha), también se usó la técnica de aproximación mediante muestreo promedio (*SAA, Sample Average Approximation*) de los escenarios generados en la instancia. Es importante aclarar que cada uno de los escenarios ha sido generado a través de la simulación de Montecarlo como una caminata aleatoria de la cadena de Markov propuesta, las cuales son independientes e idénticamente distribuidas. Lo anterior, con el fin de encontrar el modelo de programación lineal equivalente al modelo de programación estocástica (Birge & Louveaux, 2011).

La aplicación del SAA permitió estudiar la eficiencia del estimador de la función objetivo, la mínima varianza y que el estimador fuera insesgado (Shapiro, 2003; Verweij et al., 2003; Costa et al., 2011). En ese sentido, se realizaron diferentes pruebas con el tamaño de la muestra, añadiendo de manera iterativa muestreos adicionales y determinando el nivel de apropiado para el muestreo, mediando entre la complejidad del modelo, la confianza del estimador y su mínima varianza. En la *Figura 3-3* se puede observar que, para un conjunto reducido de escenarios, el resultado del estimador, (VPN promedio) es totalmente insesgado, aunque eficiente y con baja variabilidad. Sin embargo, a partir de los 21 escenarios, la consistencia del estimador se mantiene estacionariamente, aunque la varianza aumenta, consolidándose a partir del escenario 46 con una varianza estandarizada. Basados en los resultados experimentales del modelo MAg, es posible determinar una medida de desempeño que es posible aproximarse al valor de la solución óptima del problema de TSSP original.

Figura 3-3 estimación del tamaño de la muestra de los escenarios por medio de la metodología SAA



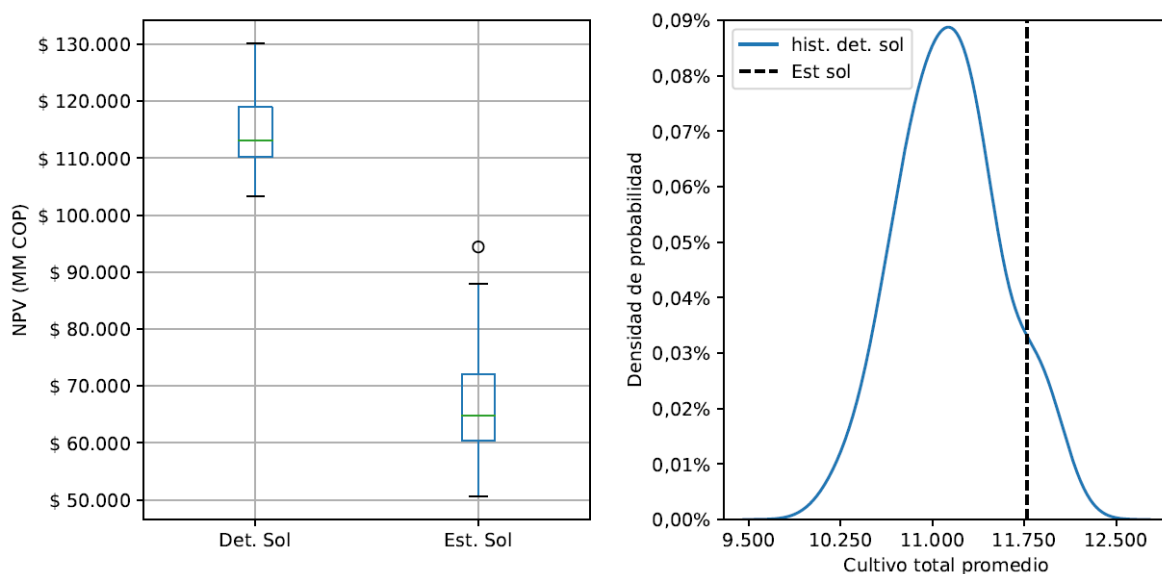
Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de dar relevancia a los resultados obtenidos por cuenta de los modelos TSSP propuestos, se realiza el cálculo del valor esperado de la información perfecta, el cual define el valor de conocer con absoluta certeza las condiciones climáticas futuras y sus impactos sobre el rendimiento de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha. Sin embargo, es imposible conocer todo el universo de escenarios que podrían llegar a ocurrir, debido al crecimiento combinatorio de la combinación de las variables aleatorias. Por lo tanto, se calcula el valor de la información de la muestra (*EVPI*). Esta información se define como la diferencia entre el valor promedio obtenido con la solución óptima de cada uno de los escenarios (θ^s), separadamente, y el resultado de la solución óptima del modelo estocástico (*RP*). $EVPI = \frac{\sum_{s \in S} \theta^s}{\|S\|} - RP$. En ese sentido, el *EVPI* información representa cuanto se estaría dispuesto a pagar, por obtener la información de los eventos futuros y reducir el riesgo.

Para el modelo se encontró que existe un $EVPI = 112.573,98 - 64.558,55 = 48.015,43$ millones de pesos colombianos, evidenciando un potencial importante, el cual justifica en investigar sobre los fenómenos aleatorios que generan incertidumbre en los procesos de planificación. Esta

información nos da un panorama interesante sobre los beneficios de conocer con precisión el futuro, pero también evidencia el riesgo al cual se expone el sistema al confiar en un escenario probable y que la realidad diste de él. La *Figura 3-4* muestra el comparativo entre los resultados del modelo MAG determinístico para el conjunto de escenarios y el modelo de TSSP. Adicionalmente, la figura presenta el histograma obtenido con las múltiples soluciones determinísticas respecto al cultivo total promedio, el cual es medido en hectáreas; de igual manera, presenta el valor que exhibe la solución del modelo estocástico. Al observar la variación presente en las soluciones determinísticas se identifica la exposición al riesgo dado que no es simple generar un plan de remediación que involucre movimientos eficaces en el aumento o disminución del tamaño del cultivo. Lo anterior y transmitiendo el mismo fenómeno de comportamiento a las variables estratégicas del sistema, permiten que los modelos estocásticos tomen relevancia e importancia en los procesos de planificación.

Figura 3-4 Estimación del valor esperado de la información perfecta *EVPI*



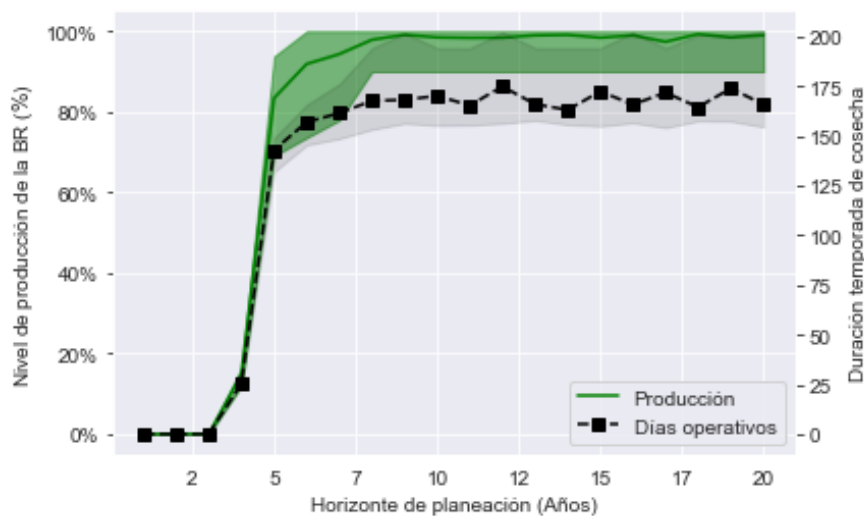
Fuente: Elaboración propia.

De manera complementaria, se calculó el valor de la solución estocástica (*VSS*), mostrando los beneficios de involucrar un conjunto de escenarios representativos de las variables aleatorias, sobre el uso de uno determinístico con un escenario compuesto por los valores promedios de la incertidumbre estudiada. El *VSS* se define como la diferencia entre la solución del problema estocástico y la solución determinística de los valores del escenario promedio, fijando las variables de la primera etapa del modelo RP, $VSS = RP - EEV$. El resultado de $VSS = 64,558.55 - 50,230.19 = 14,328.36$ millones de pesos colombianos. Por consiguiente, se estima que el valor de la solución estocástica es superior en su valor promedio, comparado con evaluar el escenario promedio de la muestra; además, si se tiene en cuenta la posición que ocupa el *EEV* en la distribución de la función objetivo de la función estocástica, existe un 90 % de obtener un mejor resultado con el modelo de TSSP. En ese sentido, el modelo propuesto gana relevancia para el proceso de planificación, validez metodológica y, marca un panorama apropiado para la navegación en el mar de incertidumbre ocasionada por las condiciones climáticas en el largo plazo. Al igual que el MAG, los modelos que se derivan de éste, son revestidos con el mismo valor metodológico.

La instancia generada contempla 46 escenarios para las fuentes de incertidumbre en un horizonte

de planeación de 20 años. EL MAG involucra la integración de decisiones estratégicas y tácticas para el eslabón agrícola considerando el VPN de la utilidad bruta como medida de desempeño económico. Como resultado general, en la Figura 3-5 se puede observar el nivel de producción en el suministro de biomasa durante el horizonte de planeación. También, los días promedio de operación en los cuales se realizó el suministro durante la ventana de tiempo de la temporada de cosecha. Se puede observar que los días promedio de operación oscilan entre los 150 y 190 y el nivel porcentual del procesamiento de caña en la BR que se sostiene estable en un 95% con unas variaciones igualmente estables durante el horizonte de planeación. Igualmente, se genera un suministro de biomasa estable considerando las fluctuaciones de la capacidad de molienda que interpone las condiciones meteorológicas. Además, al observar detalladamente los resultados, se encuentra que el suministro anual promedio corresponde a 920 mil toneladas de caña suministradas.

Figura 3-5 Nivel de producción de la BR al optimizar el modelo MAG en sus decisiones estratégicas y tácticas



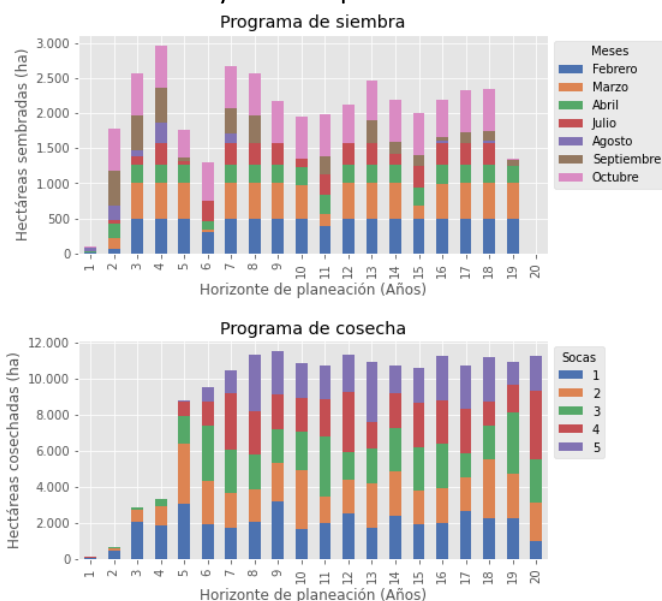
Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la programación de operaciones agrícolas, la Figura 3-6 presenta las operaciones de siembra, para cada uno de los meses del horizonte de planificación. El programa de cosecha es establecido de manera agregada en los meses del año, para cada una de las socas (cortes de caña de azúcar) durante el periodo de evaluación. Respecto a la programación de siembra, se pueden observar meses en los cuales la siembra de caña se realiza de manera significativa, entre ellos los meses de febrero y marzo, para el primer semestre del año, y de septiembre y octubre, para el segundo semestre. Estos periodos corresponden con los niveles de inicio de lluvias, los cuales son benéficos para el buen desarrollo agronómico del cultivo.

En esa misma vía, se puede observar la programación de cosecha para cada una de las socas analizadas, las cuales son combinadas con el fin de maximizar la producción de la biomasa disponible, y dar soporte a las necesidades de caña de azúcar del sistema. Es preciso recordar que la demanda de biomasa depende del requerimiento de suministro en la biorefinería y de la semilla para el eslabón agrícola necesaria para el desarrollo y renovación de los cultivos. Adicionalmente, se puede observar que los cultivos de caña de azúcar son asignados para cosecha, en todas las socas, en una cantidad de hectáreas suficiente para no violar la disponibilidad de maquinaria existente, y

con una pequeña oscilación, similar a la percibida en los días totales de operación. Este fenómeno se presenta debido a que año a año, la temporada de cosecha varía en su duración.

Figura 3-6 Planes de siembra y cosecha para el desarrollo del cultivo en el MAg

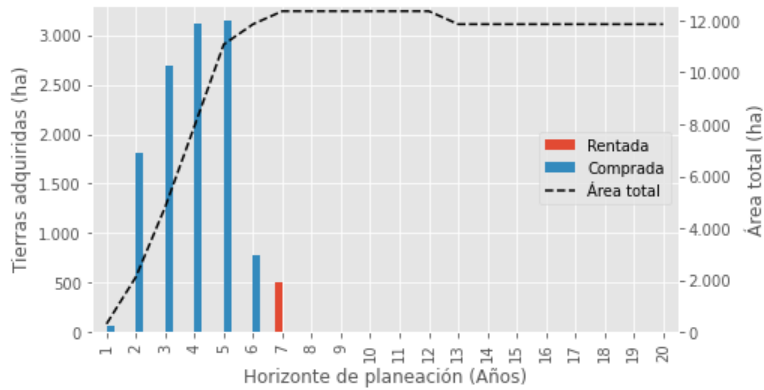


Fuente: Elaboración propia.

Una de las decisiones estratégicas importantes para el caso de estudio, corresponde al esquema de incorporación y adquisición de tierras, en el cual se desarrolla el cultivo de caña. En ese sentido, la Figura 3-7 presenta el plan de adquisición de tierras en sus dos modalidades (comprada vs rentada) a lo largo del horizonte de planificación. En los resultados se aprecia que aproximadamente 12 mil hectáreas son compradas para el desarrollo del cultivo y solo 500 son adquiridas en la modalidad de arrendamiento por un periodo de 5 años. Luego de cumplirse el tiempo del contrato, la tierra es devuelta. Esta decisión es tomada por el modelo, posiblemente para cubrir un pico de demanda en la BR, o como estrategia para amortiguar las necesidades dinámicas de biomasa generadas por la variabilidad en la temporada de cosecha.

Un aspecto relevante que se puede observar de manera conjunta entre el programa de siembra y el plan de adquisición de tierras, es que en el año 2 se incrementa la actividad de siembra con más de 1.800 ha intervenidas; para ese mismo periodo de tiempo, se adquieren una cantidad similar de tierras. Este fenómeno se aprecia hasta el año 5 en donde se termina el desarrollo del cultivo, a pesar que la producción de la BR inicia en el año 4. Para el año 6 no se presentan operaciones de siembra de manera activa; sin embargo, partir del año 7 se incrementa de nuevo la actividad, la cual está enfocada en la renovación de los cultivos que hayan alcanzado 5 cortes. En consecuencia, no se adquieren más predios, solo una pequeña parte por la modalidad de arrendamiento, con el fin de suplir necesidades en la producción de semilla. Por otro lado, la necesidad de la renovación de cultivo hace que la actividad e inversión en siembras sea una actividad recurrente durante todo el horizonte de planeación.

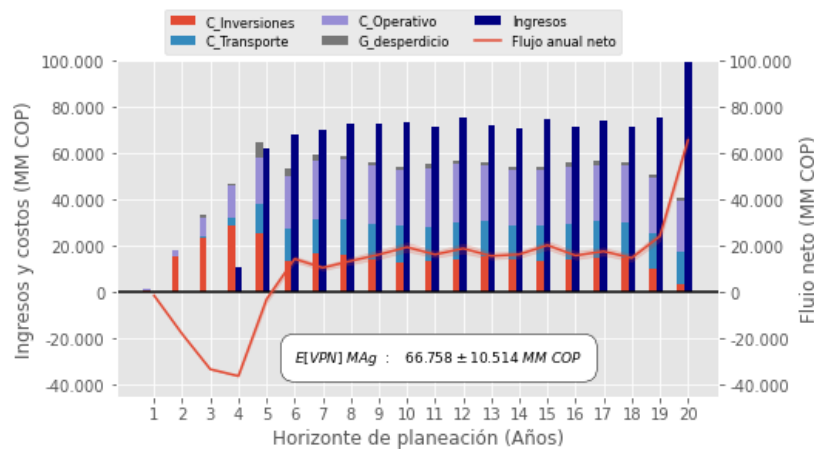
Figura 3-7 Plan de adquisición de tierras para el desarrollo del cultivo



Fuente: Elaboración propia.

La función objetivo del modelo resuelto representa el desempeño económico, a través del valor presente neto de la utilidad bruta a lo largo del horizonte de planeación para el eslabón agrícola. Los resultados que describen el VPN son presentados en la Figura 3-8. También es posible observar los diferentes flujos de dinero producto de la inversión o costos de operación, así como los flujos de ingreso por venta de caña de azúcar. Uno de los resultados más significativos se puede evidenciar en el componente de las inversiones, las cuales son ligeramente superiores en los primeros años del horizonte de planeación, pero que se mantienen significativas a lo largo del tiempo. Durante el periodo de inversión se generan unos flujos netos negativos, debido a que durante esta época la BR está siendo construida y los campos están siendo desarrollados, y no se generan ingresos por venta de caña. Una vez la planta inicia su producción y se estabiliza, el flujo económico comienza a ser positivo, a partir del periodo 6, y se conserva con esa tendencia durante el resto del horizonte de planeación. Las inversiones iniciales, corresponden al desarrollo de todo el cultivo. Sin embargo, los cultivos sufren de agotamiento y requieren renovación, al igual que la maquinaria agrícola que sufre desgaste y depreciación. En ese sentido, el componente de inversión en el eslabón agrícola se aprecia de manera permanente a lo largo del horizonte de planeación, aunque en menor proporción, comparado con los incurridos durante la fase de inversión.

Figura 3-8 Análisis de los componentes del flujo de caja neto



Nota: C_Inversiones: costos de las inversiones realizadas, C_Operativo: costos operativos, C_Transporte: costo de transporte, G_desperdicio: Gasto generado por el desperdicio generado por la pérdida de caña, E[VPN]: Valor esperado del VPN del desempeño económico y su intervalo de confianza

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los costos de transporte y operación se comportan estables durante los periodos productivos y los costos por desperdicio de caña se evidencian con un pequeño monto, aunque permanente en el horizonte de planeación. Respecto a los ingresos operacionales, no hay mucha diferencia con los costos totales, quedando un pequeño remanente para los accionistas, en forma de ganancia. Solo a partir del año 6 los ingresos comienzan a ser positivos, pues en los primeros 5 años se contabilizan pérdidas, las cuales se acumulan en 92 mil millones. Existe un flujo de ingreso positivo significativo, y corresponde al costo de salvamento de los terrenos adquiridos; estos se incluyen en la evaluación debido a que corresponde a un bien que no pierde valor en el tiempo y que, por el contrario, se valoriza. El flujo neto involucra los egresos e ingresos durante el horizonte de planeación considerando el valor del dinero en el tiempo. Por lo tanto, todos los flujos netos son deflactados al periodo cero de evaluación, haciendo uso de una tasa libre de riesgo del 1% más una tasa de rentabilidad esperada por la compañía (4%) E.A.

Con base en la anterior información, se puede afirmar que el diseño de la SBSC para el eslabón agrícola es económicamente factible con un VPN de la utilidad bruta que ascienda a los 66 mil MM COP. Adicionalmente, entre el diseño y dimensionamiento del eslabón agrícola se requiere un tamaño del cultivo de 11.772 ha. En la *Tabla 3-2*, se presentan los resultados más relevantes obtenidos en el modelo.

Tabla 3-2 Resumen de resultados del modelo MAg

Concepto	Unidades	Valor
Cultivo máximo	ha	11.772
Área arrenda	ha	503
Área comprada	ha	11.614
Suministro de caña a la BR prom.	t/año	920.531
Temporada de cosecha prom.	Días	167
VPN esperado	MM COP	66.758

3.3. Refinación del desempeño económico de la SBSC

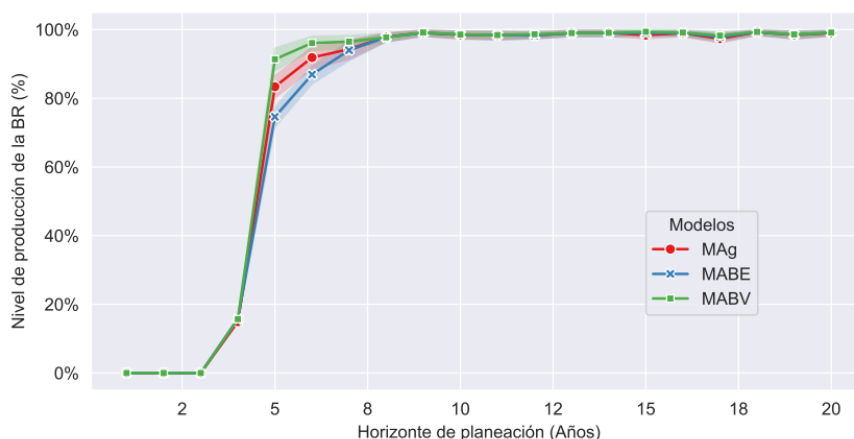
En esta sección se incluye a la BR dentro del proceso de diseño de la SBSC. Se utilizan los modelos MABV y MABE con el fin de refinar el cálculo del desempeño económico haciendo el comparativo entre el VPN de la utilidad neta y del valor EVA como criterio para el diseño de la SBSC, respectivamente. Para cada uno de estos modelos es necesario incluir un conjunto de restricciones con el fin de conocer el desempeño financiero que exhibe durante la fase de inversión y de operación, tal como se mencionó en el capítulo 2. Dado lo anterior, se involucran los costos, inversiones y operaciones llevadas a cabo durante todo el horizonte de planeación. Durante el periodo de inversión, se desarrollan los cultivos y se construye la BR; y en el periodo de producción la BR inicia su operación y se generan los ingresos por venta de bioetanol, energía eléctrica y biofertilizante.

Ambos modelos MABV y MABE son estructurados desde un enfoque centralizado del diseño de la SBSC. En éste se asume que, tanto el eslabón agrícola como la BR, hacen parte de la misma compañía y que, por ende, sus costos, inversiones, pérdidas e ingresos son compartidos. Así mismo, el desempeño económico es calculado de manera integral, como una misma compañía que paga impuestos, y que posee un único conjunto de accionistas que recibe dividendos (Liu et al., 2007; Abdul-Jalbar et al., 2016). Dado que ya se había generado una instancia del caso de estudio, ésta fue utilizada por ambos modelos con el fin de realizar el análisis comparativo. Con el optimizador Gurobi se obtuvo la solución óptima y se obtuvieron diferencias significativas en el diseño de la

cadena, la producción en la BR y la composición de los planes de operaciones agrícolas y en la estrategia de adquisición de tierras.

En la Figura 3-9, se presentan los resultados en términos del nivel producción de la BR para los modelos MAg, MABV y MABE. Durante la fase de inversión la producción se mantiene en cero debido a que la BR y los cultivos se encuentran en construcción y desarrollo, respectivamente. A partir del año 4 se aprecia que inicia la producción con niveles de producción bajos, y a partir del año 5 se incrementa gradualmente hasta su estabilización. Sin embargo, se observa una estabilización más acelerada para el caso del modelo MABV, luego sigue el modelo MAg y una más lenta para el modelo MABE. Lo anterior se debe a que el modelo MABV genera un desarrollo del cultivo más acelerado en comparación con los otros modelos. Además, se puede observar que se alcanza un nivel de estabilidad promedio de la producción en un 98% de la capacidad de la BR, a partir del año 8, para los tres modelos referenciados.

Figura 3-9 Niveles de producción de la BR para cada uno de los modelos



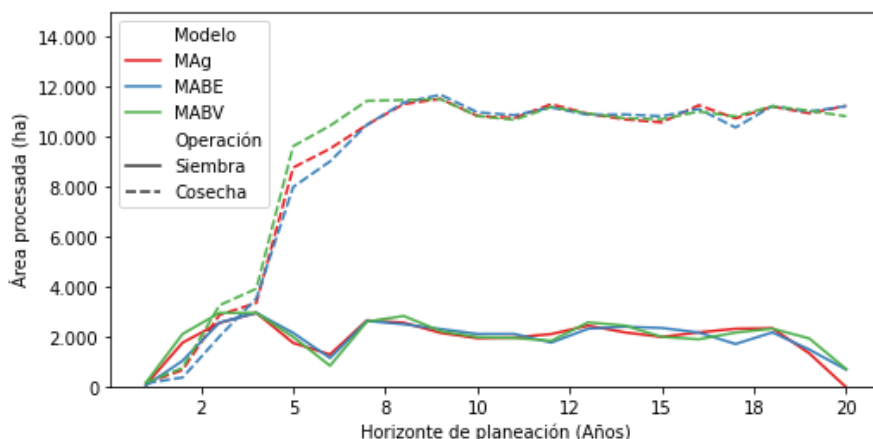
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3-10 se presentan los planes de siembra y cosecha para los tres escenarios modelados. Allí se resalta que las operaciones agrícolas tienen una mayor intensidad en el modelo MABV para los primeros 8 años y, a partir de ese periodo, los tres modelos exhiben un plan similar en términos de cantidades de área intervenida. Adicionalmente, los niveles de siembra y cosecha, se perciben oscilantes, acorde con las pérdidas de rendimiento entre las socas y la variabilidad de los días de la temporada de cosecha. Un aspecto interesante es la similitud de los planes, en términos de áreas intervenidas; sin embargo, el detalle de tales planes es totalmente diferente, debido a la dependencia, variabilidad del tipo de socas, edades y sus rendimientos. Los modelos MAg y MABV presentan tasas de operación superiores comparados con el MABE, dado que éstos buscan optimizar el VPN de la utilidad, dándole mayor importancia a los flujos tempranos, sin contemplar los costos de capital.

Un aspecto fundamental que influye la operación agrícola y el desempeño financiero es la composición de tierras y su estrategia de adquisición. En la Figura 3-11 se presentan las cantidades de área adquirida en cada modalidad, comprada o rentada, para los tres modelos considerados. Los modelos MABV y MAg están compuestos principalmente por compra de tierras, y solo una pequeña área rentada en los periodos 6 (660 ha) y 7 (500 ha), respectivamente. El modelo MABE también exhibe una gran cantidad de tierra comprada; sin embargo, presenta diferentes periodos en los que se rentan predios, supliendo los periodos de bajas producciones, producto de cultivos de edad

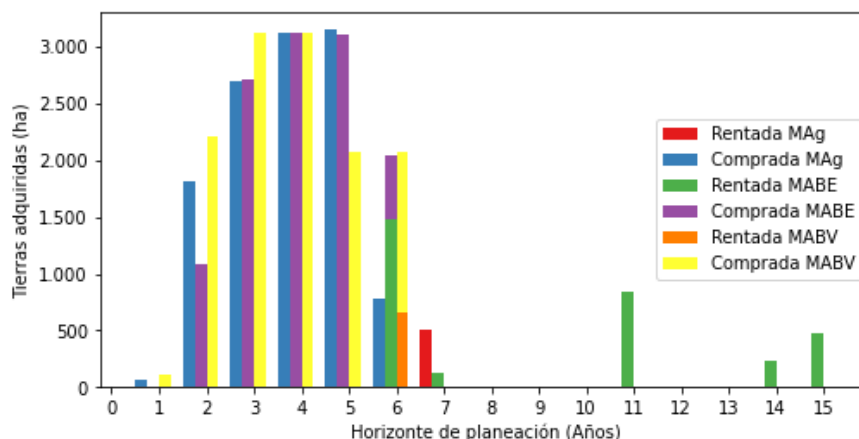
avanzada, con cultivos nuevos y transitorios, siendo eficiente en el desarrollo del cultivo y en manejo de costos e inversiones.

Figura 3-10 Comparativo de las operaciones agrícolas para los modelos evaluados



Fuente: Elaboración propia.

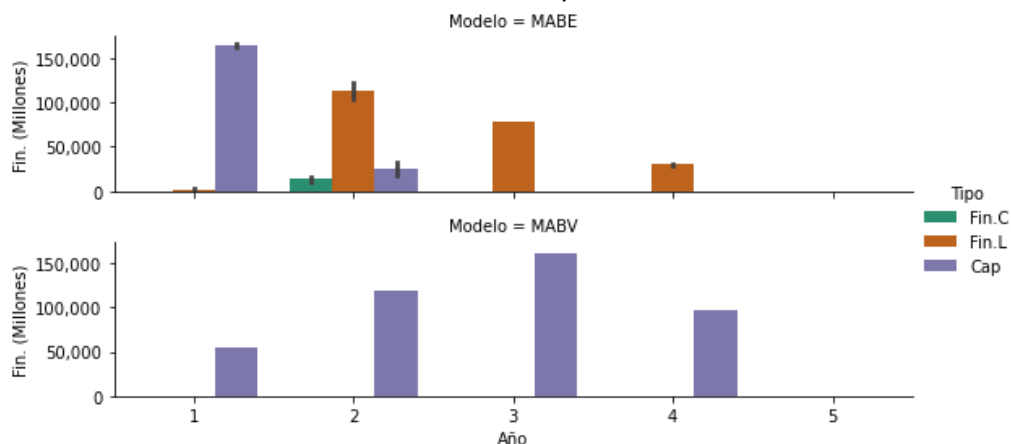
Figura 3-11 Estrategias de adquisición de tierras para los modelos evaluados



Fu ente: Elaboración propia.

Un aspecto en el que se evidencian diferencias entre los modelos es la estrategia de financiación para la SBSC. Mientras el MABV es financiado en un 100% con recursos de los accionistas durante la fase de inversión, el MABE utiliza una composición de capital entre recursos propios y la financiación externa con el fin de apalancar las inversiones. En la Figura 3-12 se observan los montos de capitalización (Cap), financiación externa de corto (Fin. C) y largo plazo (Fin. L) para cada uno de los modelos durante los primeros 5 años. El MABV presenta una condición particular en la cual no usa financiación externa, dado que ésta impacta de manera negativa en el flujo de caja neto, al generar gasto financiero, y por el contrario, se prefiere la capitalización que no genera costos directos en la utilidad neta. Por el contrario, el modelo MABE involucra los costos de capital, tanto para las capitalizaciones, vía utilidad esperada, como por financiación externa por medio de los intereses bancarios. Lo anterior implica que exista una preferencia de las fuentes externas sobre los recursos del accionista, los cuales impactan directamente en la eficiencia financiera de la cadena, pues mientras menos recursos propios sean invertidos, se obtiene mayor rentabilidad.

Figura 3-12 Fuentes de financiación de las inversiones necesarias en el diseño SBSC para los modelos MABE y MABV



Nota: Fin. (Millones): Financiación en millones de pesos COP; Fin.C: Financiación externa de corto plazo; Fin.L: Financiación externa de largo plazo; Cap: Capitalizaciones exigidas por los accionistas.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se establecieron las múltiples diferencias entre los modelos evaluados, es posible encontrar diferencias más notorias respecto al desempeño económico. En ese sentido, la Tabla 3-3 presenta el desempeño económico para los tres modelos considerados, calculando las tres funciones objetivo así: VPN Fincas que es la función objetivo del modelo MAg; EVA SBSC, la cual representa la función objetivo del modelo MABE; y el VPN SBSC el cual ilustra el desempeño del MABV. Para el caso del MAg, al no involucrar la BR no es posible comparar la medida de desempeño para el EVA y VPN de la SBSC. En la tabla se puede identificar que el modelo MAg tiene el mejor rendimiento para el eslabón agrícola. Por el contrario, al involucrar de manera conjunta y centralizada la BR, el desempeño del eslabón agrícola se ve reducido (modelos MABE y MABV).

Al involucrar la BR en el diseño de la SBSC, se evidencia que el MABE mejora el desempeño económico, no solo respecto al flujo de materia prima y productos terminados, sino también en los flujos de dinero y la rentabilidad para los accionistas. Aunque el MABV tiene una alta rentabilidad respecto a la utilidad neta (286), al accionista solo le representa una tercera parte de lo que ofrece el modelo MABE. En esta vía, el modelo MABV no generaría un valor atractivo para los accionistas, ya que estos actúan como únicos financiadores, y eso repercute en la eficiencia de la inversión. Por otro lado, se puede observar la gran diferencia entre el desempeño en términos del VPN de la SBSC y el eslabón agrícola, dado que la BR exhibe un desempeño muy superior respecto a sus suministradores (fincas), en términos de la utilidad.

Tabla 3-3 Comparación de los desempeños económicos para cada uno de los modelos considerados

Modelo	VPN Fincas		EVA SBSC		VPN SBSC	
	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
MABE	\$ 61.891	\$ 10.396	\$ 75.492	\$ 16.955	\$ 227.551	\$ 10.517
MABV	\$ 61.522	\$ 9.492	\$ 22.460	\$ 14.498	\$ 286.510	\$ 11.221
MAg	\$ 66.758	\$ 10.694	-	-	-	-

Nota: Las cifras son presentadas en \$ MM COP

Respecto a los flujos de dinero involucrados durante los primeros años del horizonte de planificación

(periodo de inversión), la Tabla 3-4 resume las inversiones realizadas en ambos modelos (MABE y MABV). Se esperaba que para el MABE hubiese mayor costo respecto al MABV, debido a los costos de financiación. Sin embargo, los costos financieros contabilizados dentro de los costos pre-operativos, son compensados con menor cantidad de tierras compradas. De igual manera, se observa que el MABV invierte más dinero en el desarrollo del cultivo, mayor maquinaria agrícola, así como en obras complementarias, las cuales se relacionan directamente con el nivel de operación. A pesar que el modelo MABV obtiene un mayor VPN de la utilidad neta durante el horizonte de planeación, es el modelo que más inversión realiza, la cual es financiada en un 100% por los accionistas. Dado lo anterior, sobresale el MABE al optimizar la inversión realizada y ofreciendo una mayor eficiencia en el manejo de los recursos.

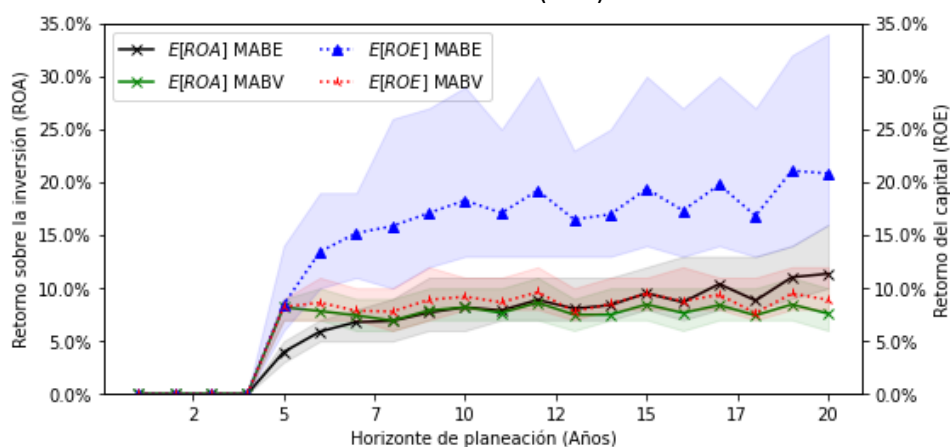
Tabla 3-4 Inversiones realizadas para los modelos MABE y MABV

Modelo Año	MABE					MABV				
	1	2	3	4	CAPEX	1	2	3	4	CAPEX
Predios	\$ 18	\$ 3.785	\$ 10.238	\$ 12.799	\$ 26.840	\$ 370	\$ 7.720	\$ 11.741	\$ 12.728	\$ 32.558
Compl.	\$ 7.728	\$ 11.645	\$ 23.304	\$ 37.180	\$ 79.856	\$ 8.106	\$ 12.023	\$ 23.681	\$ 37.558	\$ 81.368
MQAgri.	\$ 0	\$ 0	\$ 14.380	\$ 0	\$ 14.380	\$ 0	\$ 0	\$ 15.945	\$ 0	\$ 15.945
Cultivos	\$ 310	\$ 5.101	\$ 12.465	\$ 14.328	\$ 32.204	\$ 842	\$ 10.265	\$ 14.328	\$ 14.328	\$ 39.763
BR	\$ 44.800	\$ 86.400	\$ 86.400	\$ 32.400	\$ 250.000	\$ 44.800	\$ 86.400	\$ 86.400	\$ 32.400	\$ 250.000
PreOper.	\$ 633	\$ 7.955	\$ 16.592	\$ 31.104	\$ 56.284	\$ 711	\$ 3.948	\$ 12.950	\$ 28.029	\$ 45.639
Total	\$ 53.489	\$ 114.885	\$ 163.378	\$ 127.811	\$ 459.565	\$ 54.830	\$ 120.356	\$ 165.046	\$ 125.043	\$ 465.274

Nota: Predios: tierras compradas; Compl: Obras complementarias; MQAgri: maquinaria agrícola; Cultivos: inversiones en el cultivo; BR: inversión en la BR; PreOper: gastos pre-operativos. Cifras en \$ MM COP

Las inversiones realizadas en ambos modelos presentan un CAPEX similar; sin embargo, al analizar el rendimiento de las inversiones por parte del MABE se aprecia un mejor resultado en términos del capital invertido por parte de los accionistas, tal como se observa en la Figura 3-13. Aunque todos los indicadores de rentabilidad inician a partir del año 4, los rendimientos del MABE son significativamente mejores a partir del año 6. A pesar de existir una ligera diferencia en el ROA (retorno de los activos), respecto al ROE (retorno sobre el capital), el MABE mejora en un 100% la rentabilidad del capital invertido exhibida por el MABV. En consecuencia, los accionistas pueden encontrar un negocio de alta rentabilidad al optimizar el EVA y, por ende, obtiene una mayor sostenibilidad financiera en el largo plazo.

Figura 3-13 Tasas de rentabilidad respecto a la inversión total (ROA) y respecto a la inversión de los accionistas (ROE)

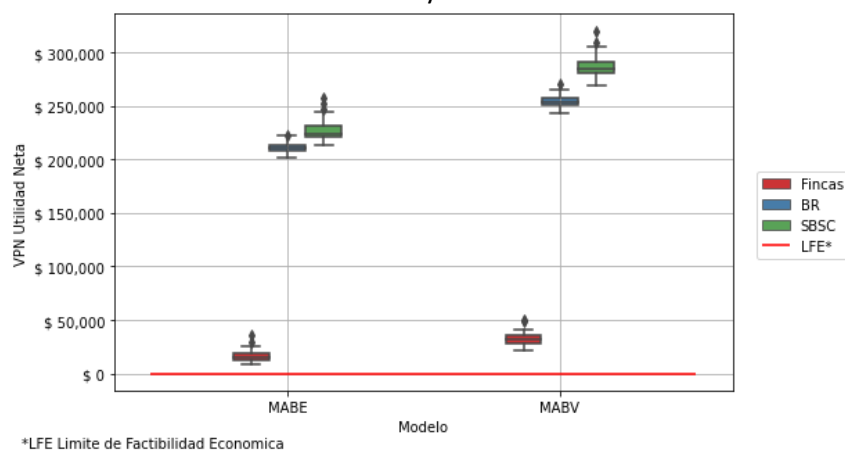


Fuente: Elaboración propia.

Con base en lo anterior, se puede confirmar que los flujos económicos que presenta el MABE

mejoran el desempeño para los accionistas, tal como el modelo MABV mejora los flujos económicos para la cadena de abastecimiento, asumiendo la centralización de los costos e ingresos. Al hacer un análisis más profundo y desagregado de los flujos de la cadena, separados para cada eslabón de la SC (Fincas y BR), se les puede identificar su desempeño. Para el caso de las fincas, los ingresos son generados por la venta de caña de azúcar, componente que se relaciona como un costo para la BR. Basado en los resultados de ambos modelos y la separación del beneficio económico VPN en cada uno de los eslabones, es posible determinar que la BR presenta un desempeño financiero altamente superior comparado con el eslabón agrícola, el cual se acerca ligeramente al límite de factibilidad económica (LFE) (ver Figura 3-14).

Figura 3-14 VPN de la utilidad neta desagregado para los eslabones fincas y BR en los modelos MABE y MABV



Fuente: Elaboración propia.

En esta figura también se observa que los desempeños económicos de ambos eslabones presentan una gran diferencia entre ellos. Particularmente, el eslabón compuesto por las fincas puede considerarse factible, al ser positivo, pero muy cercano a la infactibilidad y con una gran diferencia respecto al desempeño financiero de la BR. Este fenómeno puede llegar a generar insatisfacción, inequidad económica, así como influir en el deterioro de las relaciones entre los actores a largo plazo. Adicionalmente, se observa que el modelo MABE es capaz de reducir un poco la brecha entre las rentabilidades de cada eslabón, al mismo tiempo que ofrece un desempeño maximizado para los accionistas. Con base en lo anterior, es posible afirmar que, si el sistema es centralizado, auspiciado por una única compañía, el MABE es el modelo adecuado para garantizar la sostenibilidad económica en el largo plazo; por el contrario, si el sistema está compuesto por un conjunto de actores independientes, el modelo requiere involucrar dimensiones adicionales del desempeño sostenible que permitan solventar este tipo de problemas de justicia económica entre los miembros de la cadena.

Otro análisis interesante sobre la Figura 3-14, es la comparación entre los resultados del VPN de la utilidad neta que se obtienen de los modelos MABE y MABV para el eslabón agrícola versus el resultado del VPN de la utilidad operacional obtenida con la función objetivo (FO) del MAG, la cual no incluye los costos de financiación, las depreciaciones de las inversiones, ni el pago de impuestos. Para el caso particular del MABE, la Tabla 3-3 presenta un desempeño esperado para el eslabón agrícola de 61 mil millones COP, calculado con la FO del MAG. Dicho valor es refinado en su cálculo, hacia la utilidad neta, por lo que se obtiene una cifra real de 16 mil MM COP, ubicando al

suministrador en una posición de riesgo respecto a la viabilidad financiera. En ese sentido, queda demostrado que el desempeño económico implica un análisis con alto nivel de detalle, incluyendo las decisiones de inversión, administración de flujo de caja y estrategia de financiación junto a las decisiones propias de diseño y gestión de la SBSC, con el fin de garantizar la sostenibilidad económica en el largo plazo.

3.4. Complejidad de los modelos M-MAB y MA-MAB

Como se mencionó en la sección 2.1.2, el MABE presenta una dimensión media, e involucra un horizonte de planeación en periodos mensuales, y asume una finca para desarrollar todo el cultivo necesario para abastecer la BR. Este modelo presenta una dimensión de 82.603 restricciones y 123.187 variables de decisión. Por su parte, el MABV tiene 65.132 variables y 47.611 restricciones considerando un horizonte de planeación de 20 años y 45 escenarios de caminata aleatoria. Los modelos anteriores son resueltos hasta condiciones de optimalidad en un tiempo de ejecución promedio de 450 y 150 segundos, respectivamente.

Estos tiempos de ejecución pueden ser interpretados como bajos para un modelo general, en términos de una sola finca y una biorefinería, a manera de abstracción. Sin embargo, cuando se escala a múltiples fincas con el fin de incluir mayor nivel de detalle y mayor realismo, los modelos exhiben dificultades de dimensión. Por un lado, los modelos de TSSP presentan complicaciones debido al número de escenarios. También, al involucrar varias fincas en el proceso de planificación el problema crece (en dimensión) de manera proporcional. El fenómeno de crecimiento se amplifica al momento de considerar, simultáneamente, varias fincas y un conjunto de escenarios, causando también un incremento exponencial en la complejidad computacional durante el proceso de optimización. Para el caso del modelo M-MAB la dimensión crece hasta 2'084.282 de restricciones y 2'976.931 variables de decisión, utilizando 1.4 gigabytes de almacenamiento para el modelo, para una instancia conformada por 30 fincas y 30 escenarios.

Con el fin de reducir la complejidad computacional exhibida por el M-MAB, el modelo MA-MAB el cual involucra un horizonte de planeación en periodos anuales, reduciendo la dimensión, lo que permite abordar el problema considerando un conjunto de fincas y la distancia entre estas y la BR. El MA-MAB presenta un tamaño de 833.495 variables de decisión y 593.339 restricciones. En consecuencia, los tiempos computacionales para obtener una solución óptima se aproximan a los 8.842 segundos. Dado que el modelo M-MAB no es posible resolverlo debido a su dimensión que colapsa rápidamente la memoria computador, se realizó un análisis comparativo entre el MABE y el MA-MAB con la instancia del caso de estudio. Este comparativo se realizó con la dimensión económica dado que el MABE solo involucra esta medida de desempeño.

Los resultados de la comparación entre ambos modelos se presentan en la Tabla 3-5, en la cual se presenta resultados respecto al beneficio neto, desempeño EVA, producción alcanzada en la BR y el rendimiento promedio del cultivo, para cada uno de los modelos a lo largo del horizonte de planeación. Con relación al beneficio neto, el modelo MA-MAB ofrece un desempeño ligeramente superior, siendo los años 1 a 4 los periodos de mayor variación. Este mismo efecto se observa respecto al desempeño EVA; sin embargo, el MA-MAB presenta un mejor desempeño de manera generalizada. De forma contraria, para la producción anual esperada en la BR y el rendimiento del cultivo de caña, los resultados son similares, con variación menor. No obstante, para el caso del cultivo, la variación usualmente favorece al modelo MA-MAB.

Dado que los desempeños entre ambos modelos son similares, es posible afirmar que el modelo MA-MAB es una buena aproximación al MABE, con la dificultad que ligeramente sobre-estima el rendimiento de los cultivos, al ser mucho más abstracto, en términos de la valoración del cultivo en función de las socas, a una edad de 12 meses de crecimiento. De manera complementaria, la similitud entre los desempeños económicos, y la producción en la BR permiten confirmar la equivalencia entre las decisiones de diseño y de gestión de la SBSC entre ambos modelos. De acuerdo con lo anterior, es posible utilizar el MA-MAB para incluir mayor nivel de detalle en términos de la distancia entre fincas, los múltiples actores de la cadena, y las dimensiones sociales y ambientales de la sostenibilidad.

Tabla 3-5 Comparación entre los modelos MABE y MA-MAB, evaluando el desempeño EVA

Año	Beneficio Neto		Desempeño EVA		Prod BR*		Rend Cult.**	
	MABE	MA-MAB	MABE	MA-MAB	MABE	MA-MAB	MABE	MA-MAB
1	-4,524	-2,136	-10,528	-3,389	0	0	0	0
2	-12,357	-6,147	-21,247	-9,759	0	0	0	0
3	-25,638	-17,566	-34,825	-24,473	0	0	0	0
4	-16,249	-33,048	-25,459	-42,152	11	0	0	0
5	12,940	27,589	3,046	18,156	52	61	82	103
6	27,134	30,981	16,145	21,768	64	65	90	102
7	26,500	29,795	13,861	20,806	66	67	86	99
8	26,321	27,003	12,665	17,878	68	69	91	93
9	27,990	25,633	14,401	16,415	67	67	95	88
10	29,864	31,584	16,264	22,412	67	67	94	103
11	28,335	30,704	15,354	21,637	65	66	92	106
12	33,366	35,061	20,086	26,175	71	71	101	106
13	27,140	27,836	14,449	18,904	66	66	98	102
14	27,992	29,851	15,439	20,978	65	65	96	104
15	33,642	36,485	20,647	27,657	70	70	94	107
16	29,698	32,190	16,952	23,472	67	67	96	108
17	32,472	33,783	20,159	25,255	68	68	98	105
18	28,475	27,175	15,512	18,462	66	66	101	101
19	36,281	34,526	22,400	25,863	69	70	101	103
20	37,130	31,921	22,453	23,336	67	67	115	108

Nota: Cifras presentadas en \$ MM COP. * Prod BR: producción promedio anual en millones de litros de etanol.

** Rend Cult.: Rendimiento del cultivo promedio en $\left(\frac{t}{ha}\right)$

Dado que la SBSC para el caso colombiano, debido al dominio de minifundios, está compuesto principalmente por múltiples actores en el eslabón agrícola (Londoño, 2017), es mucho más realista involucrar un conjunto de fincas al modelar dicho eslabón. Al igual que la BR, estas fincas tienen intereses particulares, por lo cual, al ser consideradas como compañías independientes, deben ser tenidas en cuenta durante el proceso de diseño de las SBSC. Por un lado, con el fin de identificar la influencia de la distancia y el costo de transporte en el desempeño económico, social y ambiental, tanto a nivel colectivo (cadena de abastecimiento), como a nivel individual (actor de la cadena). Por otro lado, para identificar la influencia de las relaciones entre los actores y el desempeño sostenible desde dos perspectivas; en primer lugar, para mejorar la transparencia de las operaciones y, en segundo, para incrementar los niveles de confianza y negociación, y mejorar la sinergias entre los actores con miras a realizar alianzas a largo plazo (Wu et al., 2009; Yue et al., 2014). Sin embargo, al considerar múltiples fincas en el M-MAB, la complejidad computacional se incrementa de manera exponencial, al punto de no lograr encontrar una solución óptima al problema.

La complejidad del M-MAB se evidencia en la Tabla 3-6, en la cual se realiza un experimento computacional en el cual se va incrementando el número de escenarios para el modelo y el número de fincas. Se puede apreciar como el número de escenarios del modelo TSSP, y el número de fincas (actores) consideradas en cada instancia, incrementan los tiempos computacionales para ofrecer una solución. El experimento muestra que el M-MAB rápidamente incrementa la complejidad computacional, al aumentar el número de escenarios, mientras el MA-MAB presenta mejores tiempos computacionales, siendo competitivos para ofrecer soluciones óptimas en tiempos razonables, aún al incluir múltiples fincas, condición presente en instancias reales del caso de estudio. En las últimas dos filas de la tabla, se pueden visualizar instancias de gran escala, para las cuales se involucran 30 fincas, así como, entre 15 y 30 escenarios, los cuales exhiben una gran complejidad, pero una solución óptima en tiempos prudenciales para el caso del MA-MAB. No obstante, el modelo M-MAB no logra alcanzar una solución en un tiempo máximo de 24 horas, dada la dimensión de los modelos y al hecho de agotar los recursos computacionales rápidamente, en instancias pequeñas y no representativas del caso de estudio.

Tabla 3-6 Complejidad de los modelos M-MAB y MA-MAB respecto al número de escenarios estocásticos y número de fincas

Fincas	Escenarios	Tiempo Computacional*	
		M-MAB	MA-MAB
2	2	65	0.31
2	10	441	3.4
2	20	1,031	10.20
2	35	32,105	27.2
2	45	**	35.5
3	2	3,024	0.48
4	2	67,771	1.33
5	2	**	2.39
3	3	**	9.07
30	15	**	815
30	30	**	8842

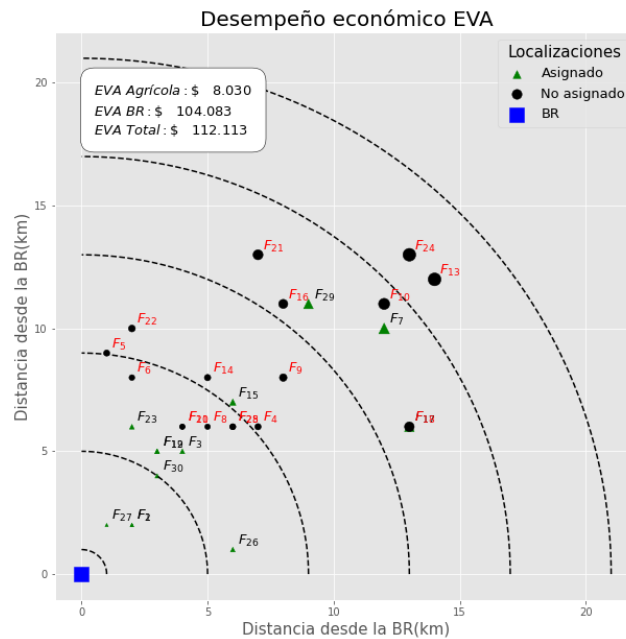
Nota: *tiempo de ejecución en segundos; ** No se obtuvo solución óptima en un tiempo máximo de 24 horas

A manera de ejemplo, es posible visualizar en la Figura 3-15 las diferentes fincas asignadas para desarrollar la operación agrícola para una biorefinería, tal como se presenta en el caso de estudio. Se identifican los desempeños económicos por cada actor relevante de la cadena, así como, el desempeño global de la SBSC. En la instancia se consideraron 30 fincas, de las cuales 12 de ellas fueron asignadas para soportar el aprovisionamiento de la BR durante el horizonte de planeación. Se puede observar que no solo las fincas que se encuentran más cercanas a la biorefinería son las asignadas, pues factores tales como la localización de cada finca (distancia), el área total aprovechada (respecto a la dimensión de cada finca) y el nivel de inversión, también influyen en la decisión.

Adicionalmente, el desempeño económico global es atractivo para un inversionista; sin embargo, se encuentra sesgado hacia el eslabón de producción (BR), llevando a una posición de infactibilidad económica al eslabón agrícola. Lo anterior, ofrece un diseño de cadena de abastecimiento óptimo desde el punto de vista centralizado, pero que no es atractivo para el eslabón agrícola, pues no se logra una distribución justa de beneficios entre los actores. Este resultado resulta consistente con el análisis previo presentado en la Figura 3-14, en la cual se desagrega el VPN de la utilidad neta

para cada uno de los eslabones, inclinando la balanza de rentabilidad hacia la BR.

Figura 3-15 Diseño de la SBSC considerando múltiples fincas. Decisiones de localización de fincas y asignación de cultivos.

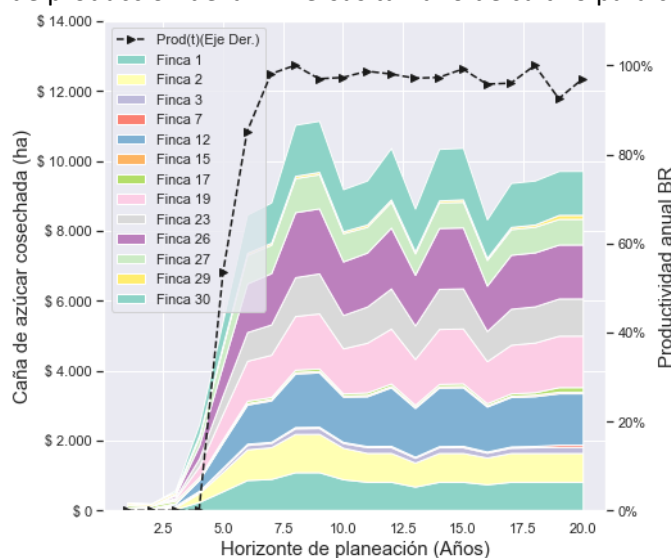


Fuente: Elaboración propia.

Es importante destacar que, aunque la BR es la más beneficiada con el diseño propuesto, el eslabón agrícola hace su mejor esfuerzo para desarrollar un cultivo estable y eficiente en el suministro de materia prima. Como se observa en la Figura 3-16, la producción de la planta de producción es estable con resultados por encima del 95% durante el periodo productivo. De igual manera, la cantidad de área cosechada en cada una de las fincas alcanza pico total máximo de 11.000 hectáreas, presentando un patrón cíclico en el área cortada, que obedece a las pérdidas de los rendimientos del cultivo, las renovaciones después del quinto corte y la variabilidad presentada por las condiciones climáticas, las cuales afectan la duración de la temporada de cosecha.

Estas últimas dos subsecciones permiten abordar la definición del desempeño económico hacia una función objetivo que promueve la sostenibilidad financiera de la SBSC en el largo plazo, al mismo tiempo que integra las decisiones de diseño y gestión, bajo condiciones de incertidumbre. Adicionalmente, el modelo MA-MAB ha demostrado tener la capacidad suficiente para manejar la complejidad computacional que exhibe el diseño de la SBSC. De acuerdo con lo anterior, la hipótesis de investigación planteada se ha resuelto de manera parcial por el MA-MAB. Sin embargo, dado que el MA-MAB permite involucrar las dimensiones social y ambiental, es necesario entonces un nuevo experimento para dar una respuesta de manera integral a la hipótesis.

Figura 3-16 Nivel de producción de la BR versus tamaño de cultivo para cada finca asignada



Fuente: Elaboración propia.

3.5. Desempeño sostenible en la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar

A partir de los resultados de las subsecciones anteriores, se logró establecer que el MA-MAB resulta factible para abordar el diseño y gestión de operaciones de la SBSC. Además, dicho modelo permite modelar las tres dimensiones del desempeño sostenible por medio del mecanismo de épsilon restricciones, el cual permite encontrar soluciones equilibradas. De igual manera, el modelo tiene en cuenta las condiciones climáticas como la principal fuente de incertidumbre, afectando el rendimiento de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha. Como se ha mostrado, el modelo propuesto además está en capacidad de manejar la complejidad computacional intrínseca en el diseño de la SBSC y, en consecuencia, es posible comprobar la hipótesis general de investigación.

El MA-MAB modela la dimensión económica a través del VP del EVA durante el horizonte de planeación. La perspectiva social se modela por medio del enfoque Social-LCA, el cual mide el inventario de impactos de tres diferentes categorías: huella de tierra, generación de puestos de trabajo y distribución justa de los beneficios. Por su parte, el desempeño ambiental es modelado por medio del enfoque LCA que, por medio de la metodología ReCiPe2016, calcula el inventario de impactos para 5 categorías, las cuales son generadas por las operaciones más relevantes de la SBSC. La dimensión social involucra tres indicadores, los cuales son estandarizados por medio de la programación compromiso que permite definir los niveles de importancia de cada uno de los factores, así como derivar un conjunto de soluciones balanceadas. Así, las tres dimensiones de la sostenibilidad son reunidas en un enfoque multi-objetivo que, por medio de la metodología ϵ -restricciones, se obtienen un conjunto de soluciones que median entre los diferentes desempeños, los cuales se encuentran en conflicto.

Uno de los pasos previos a la corrida del MA-MAB multi-objetivo, es el establecimiento de los niveles de importancia para cada uno de los indicadores sociales a fin de definir obtener un desempeño

estandarizado. En ese sentido, es importante analizar dicha dimensión de manera independiente, encontrando los límites extremos del desempeño. Igualmente, es necesario definir los límites para la perspectiva ambiental, para resolver el problema de múltiples objetivos mediante ϵ -restricciones. De los límites hallados para cada dimensión se derivan las dimensiones que permiten las transiciones entre los límites del desempeño de cada indicador. La metodología multi-objetivo propuesta incorpora límites para el indicador económico y ambiental mientras se optimiza el indicador social. Adicionalmente, de un modo iterativo, se mapea el espacio de solución teniendo en cuenta saltos discretos en dirección de los indicadores óptimos del desempeño económico y ambiental. De esta manera, se obtiene la frontera de Pareto del conjunto de soluciones balanceadas.

3.5.1. Definición de niveles de importancia de los indicadores sociales, su desempeño estandarizado y sus límites extremos

Dado que el MA-MAB involucra múltiples actores de la SBSC, es posible determinar el desempeño de los indicadores sociales considerando un conjunto de fincas que deben ser localizadas y cultivadas. Este modelo aborda la medición de la perspectiva social inspirado en la metodología del análisis de ciclo de vida de los impactos sociales (Social-LCA). Como se mencionó en la sección 2.2.5.1., se consideran cuatro grupos focales: trabajadores, comunidad local, sociedad general y actores de la cadena. Dichos grupos se abordan por medio de tres factores o indicadores, los cuales determinan el grado de influencia del diseño de cadena de abastecimiento sobre la dimensión social a través de la generación de puestos de trabajo, la huella de tierra y la distribución justa de los beneficios (FPD).

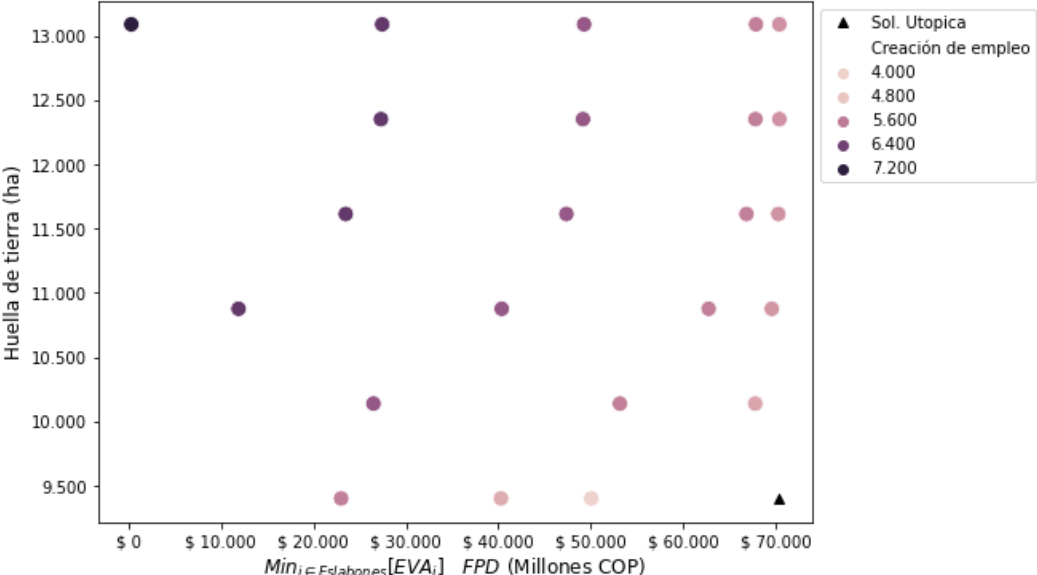
Los indicadores sociales contemplan una valoración de impactos preliminar, el cual tiene como fin, la agregación sistemática de los indicadores en un desempeño social estandarizado. Esta abstracción permite establecer niveles de importancia para cada uno de los indicadores y así, alcanzar una medición del beneficio social holístico. Estos indicadores o factores son estandarizados por medio de la programación compromiso, la cual permite calcular la distancia mínima de los desempeños de cada indicador respecto a sus límites extremos (ideales y no deseables). El enfoque propuesto gana relevancia al representar una contribución al estado del arte, en el sentido que llena un vacío de conocimiento respecto a la sostenibilidad social de las SC considerando múltiples factores de impacto y a su estandarización.

Dado que la metodología de programación compromiso involucra unos pesos relativos para cada factor estudiado [α_1 , para la generación de puestos de trabajo ; α_2 , para la distribución justa de los beneficios ; α_3 , para la huella de tierra], es importante conocer los límites extremos de cada uno de ellos, así como, la interacción con los otros indicadores. En orden de establecer los niveles de importancia de cada indicador, se realizó un ejercicio computacional del MA-MAB, utilizando la instancia del caso de estudio con 30 fincas aleatoriamente distribuidas a una distancia promedio de 15 km, medida desde las fincas hasta la BR. Para los pesos α_j se establecieron 5 niveles de importancia, y sus respectivas 25 combinaciones.

Los resultados del MA-MAB para el indicador social se pueden apreciar en la Figura 3-17. En ésta se observan los tres factores considerados; en el eje Y se encuentra la huella de tierra, mientras que en el eje X se presenta el FPD a través del EVA mínimo de los dos eslabones de la cadena. Por su parte, la generación de puestos de trabajo es involucrada por medio de una escala de colores, en la cual, a mayor intensidad, la creación de puestos de trabajo es mayor. Adicionalmente, se aprecia

que la solución que maximiza la generación de puestos de trabajo, corresponde a la más injusta en términos de distribución de los beneficios, así como el diseño con la mayor huella de tierra exhibida. De otro modo, existe un conjunto limitado de soluciones no dominadas, respecto al FPD y a la huella de tierra, las cuales minimizan la distancia entre la solución utópica parcial y el desempeño de los factores analizados. De estos resultados es posible identificar que el FPD y la huella de tierra se encuentran en conflicto dado que mientras uno mejora, el otro empeora. Igualmente se observa que la generación de empleo se encuentra en conflicto con los otros dos factores.

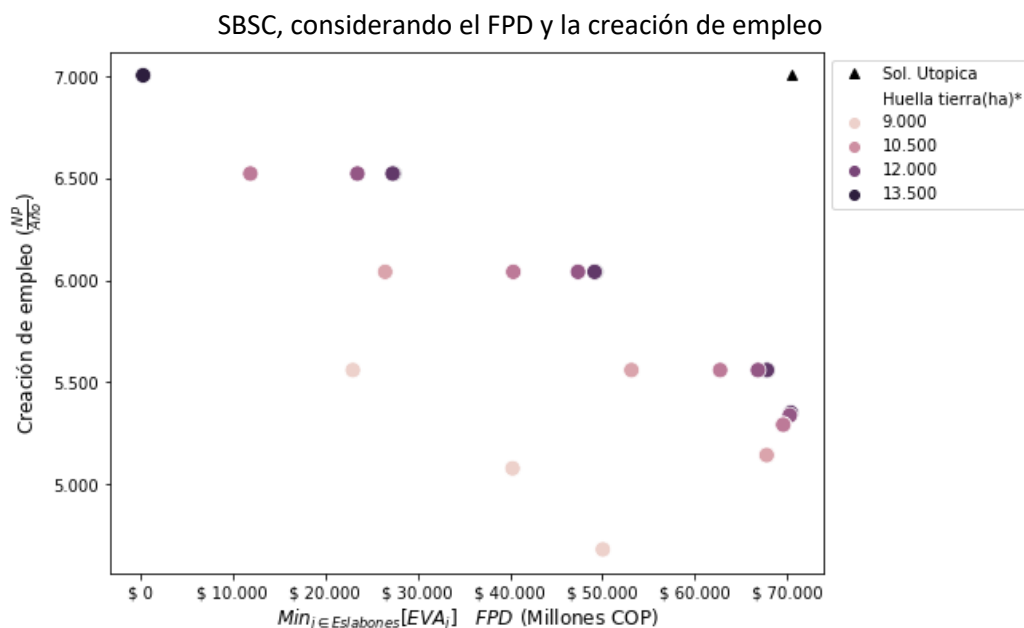
Figura 3-17. Desempeño de los factores que componen el indicador social para el diseño de la SBSC considerando el FPD y la huella de tierra



Fuente: Elaboración propia.

El resultado anterior fue reorganizado con el fin de observar la relación entre la creación de empleo y el FPD. En la Figura 3-18, el eje *Y* representa el factor de la creación de empleo y el factor huella de tierra se representa en escala de colores siendo el color claro como ideal y de menor valor. En esta gráfica se aprecia que las soluciones no dominadas respecto al *FPD* y generación de puestos de trabajo tienen el peor desempeño del indicador huella de tierra. También se identifica una relación lineal en la frontera óptima entre la creación de empleo y el *FPD*. Así mismo, la frontera exhibe soluciones con una distancia significativa respecto a la solución utópica parcial. Basados en los resultados del caso de estudio, se identifican un conjunto de soluciones en conflicto, por lo tanto, es necesario establecer los niveles de importancia para cada uno de los factores del **Desempeño Social (DS)**.

Figura 3-18 Desempeño de los factores que componen el indicador social para el diseño de la



En la *Tabla 3-7* se presentan los desempeños de cada uno de los indicadores analizados, el desempeño económico y cada uno de los niveles de importancia utilizados para el cálculo del *DS* agregado. El *DS* tiene su dominio entre los valores $[0, \dots, 1]$, para el cual, el valor cero es el indicador ideal, ya que representa la distancia mínima entre los valores ideales y los obtenidos de cada uno de los factores, multiplicados por su nivel de importancia. Para el caso de estudio se obtiene el mejor valor del *DS* en 0.16. Sin embargo, existen dos soluciones, con sus respectivos niveles de importancia que derivan en la mejor solución. Aunque las dos soluciones son buenas respecto al *DS*, la solución de la fila 2, resaltada en gris, tiene un mejor desempeño económico, una mejor distribución del beneficio (FPD), el mismo nivel de generación de empleo y una huella de tierra ligeramente superior. En consecuencia, los niveles de importancia definidos para el *DS* corresponden a $[\alpha_1 = 0,2; \alpha_2 = 0,4; \alpha_3 = 0,4]$, para el indicador de empleo, FPD y LFP, respectivamente.

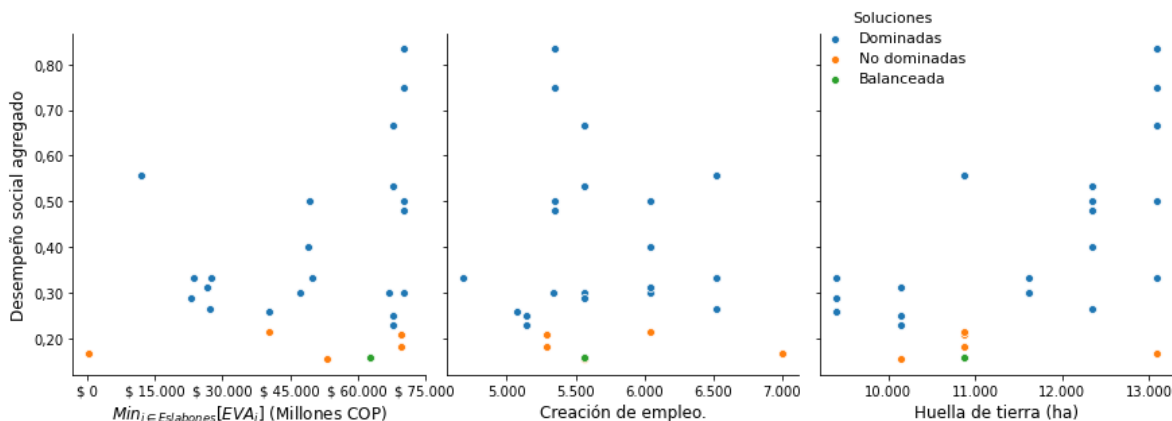
Tabla 3-7 Indicador social, factores usados y niveles de importancia

\overline{EcoM}_{FPD}	T_{jobG}	FPD	LFP	α_1	α_2	α_3	DS
\$ 106.270	5.558	\$ 53.135	10.139	0,25	0,42	0,33	0,16
\$ 125.456	5.558	\$ 62.728	10.876	0,20	0,40	0,40	0,16
\$ 630	7.004	\$ 315	13.088	0,67	0,17	0,17	0,17
\$ 139.110	5.290	\$ 69.555	10.876	0,25	0,33	0,42	0,18
\$ 139.110	5.290	\$ 69.555	10.876	0,29	0,29	0,43	0,21
\$ 80.718	6.040	\$ 40.359	10.876	0,12	0,50	0,38	0,21
\$ 135.526	5.141	\$ 67.763	10.139	0,29	0,36	0,36	0,23
\$ 135.526	5.141	\$ 67.763	10.139	0,31	0,31	0,37	0,25
\$ 80.554	5.076	\$ 40.277	9.401	0,31	0,37	0,31	0,26
\$ 54.602	6.522	\$ 27.301	12.351	0,33	0,33	0,33	0,27
\$ 45.996	5.558	\$ 22.998	9.401	0,29	0,43	0,29	0,29

La definición de un 20% de importancia sobre la generación de puestos de trabajo es apropiada, dado que, aumentar ese nivel de importancia puede llevar a soluciones de mala calidad, aunque con

buen desempeño del DS. En ese mismo sentido, FPD exhibe el nivel de importancia, el cual al aumentarlo o disminuirlo afecta negativamente el balance respecto a los resultados obtenidos en los otros dos factores, llevando sus desempeños a los extremos indeseados. Adicionalmente, la Figura 3-19 evidencia los resultados obtenidos por cada factor y el DS agregado de las soluciones encontradas en el procedimiento de agregación del Social-LCA. Allí también es posible observar las soluciones no dominadas (color naranja), junto con la solución con el mejor DS (color verde), la cual exhibe los niveles de importancia para cada uno de los factores.

Figura 3-19 : Desempeño Social Agregado.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.2. Resultados del desempeño ambiental

La dimensión ambiental es uno de los principales pilares de la sostenibilidad, dado que su finalidad es medir el impacto de la actividad productiva sobre el territorio en donde se desarrolla la operación. Realizar una medición del impacto ambiental de una cadena de abastecimiento es una tarea exigente, desde el punto de vista técnico, científico y académico. Por un lado, requiere de tecnología, para realizar el diseño y la medición de los impactos. Así mismo, la investigación científica alrededor del desempeño ambiental está en constante evolución, en el que se proponen técnicas de medición del impacto ambiental, nuevas y más precisas. Por otro lado, la medición de impactos ambientales abarca múltiples dimensiones del conocimiento, requiriendo un enfoque multidisciplinario.

La medición del desempeño ambiental que se propone en esta tesis doctoral implementó, parcialmente, la técnica ReCiPe 2016 (Huijbregts et al., 2017). Dado que esta técnica involucra 17 categorías de impacto intermedio, este trabajo se enfocó en 5 categorías que se destacan en la SBSC (el potencial de generación de calentamiento global, el consumo de agua, la eutrofización de cuerpos de agua dulce, la afectación a la capa de ozono, y la utilización de tierras agrícolas). Como se mencionó en el capítulo 2, sección 2.2.5.2, los impactos ambientales son involucrados en el modelo de optimización a través de impactos unitarios, los cuales son consecuencia de las múltiples operaciones desarrolladas en la cadena de abastecimiento durante el horizonte de planeación.

En el proceso de valoración del inventario de impactos, se identifican cuatro operaciones de la cadena que generan mayor impacto ambiental: cultivo de caña de azúcar (producción de biomasa); producción de biocombustible (considerando co-generación eléctrica y producción de

biofertilizante); transporte de caña de azúcar (desde los campos hacia la biorefinería) y; transporte de semilla entre fincas. Con la definición de las operaciones y las categorías de impacto ambiental se consolida la matriz de impactos, a través el uso de fuentes de información, primarias y secundaria, tal como se muestra en la Tabla 3-8. Los impactos ambientales del cultivo de caña de azúcar fueron estimados y validados por medio de los trabajos propuestos por Renouf et al. (2010); Gheewala et al. (2014); Meza-Palacios et al. (2019). Referente a los impactos ocasionados por la producción de alcohol carburante a partir de caña de azúcar, se utilizaron los trabajos propuesto por Ometto et al. (2009); Mele et al. (2011); Macowski et al. (2020). Respecto al transporte de caña de azúcar se utilizaron los trabajos de Prasara-A & Gheewala (2016); Du et al. (2019); Gnansounou et al. (2020) como referencia. Finalmente, los factores de agregación de punto final utilizados para cada una de las categorías consideradas fueron extraídos de Huijbregts et al. (2017) en su material suplementario.

Tabla 3-8 Matriz de impactos ambientales unitarios para las operaciones principales de la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar

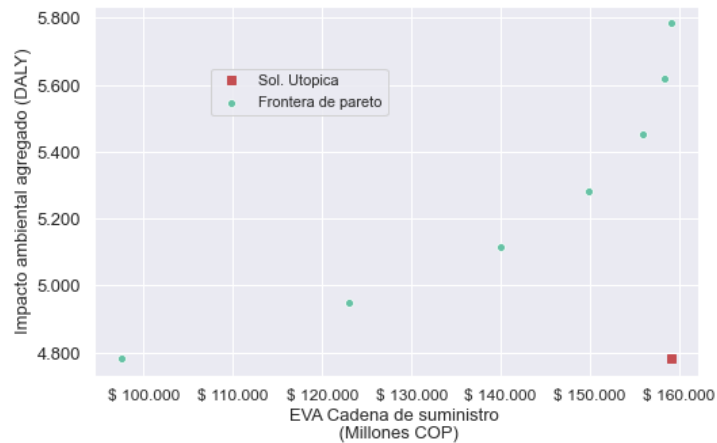
Impactos		GWP	C. agua	E. agua	C. Ozono	U. tierras
Operaciones	Unidades	$kg\ CO_2eq$	m^3	$kg\ P - Eq$	$kgCFC - 11$	m^2a
Cultivo	ha	29,682	2,418.0	25.4	0.00616	10,000
Producción	l	13.22	0.872	0.0191	1.037.E-07	0.0283
Cosecha	t-km	0.17	0.044	0.0041	3.597.E-09	0.0012
Semilla	t-km	0.17	0.044	0.0041	3.597.E-09	0.0012
Peso etapa final		8.17.E-08	3.10.E-06	6.10.E-07	2.37.E-04	8.88.E-09

Nota: GWP: Potencial de generación de calentamiento global; C. agua: Consumo de agua dulce; E. agua: Eutrofización de cuerpos de agua dulce; C. Ozono: Afectación a la capa de ozono; U. tierras: utilización de tierras agrícolas.

Con los parámetros presentados en la Tabla 3-8, respecto a los impactos unitarios y los factores de normalización de cada impacto $[\omega_{\mathcal{X}}^l | \mathcal{V}_{\mathcal{X}}]$, fue posible medir el desempeño ambiental para el modelo MA-MAB. Este modelo fue corrido para la instancia del caso de estudio para las funciones objetivo del desempeño económico y ambiental. Para este fin, se utilizó la metodología de ϵ -restricción encontrando un conjunto de soluciones no dominadas presentes en la frontera de Pareto. En ese sentido, se utilizaron 6 pasos para la construcción de la frontera.

Los resultados del desempeño económico y ambiental son presentados en la Figura 3-20, en la cual se puede observar el conjunto de soluciones no dominadas que conforman la frontera óptima. Dichas soluciones ofrecen un balance entre ambos desempeños, destacándose el rápido decrecimiento del indicador ambiental, el cual se vio afectado en un 50% mientras el desempeño económico solo se impactó con una reducción de 10,000 millones de pesos. De manera contraria, cuando el desempeño ambiental mejora hacia su mejor solución, el desempeño económico se ve fuertemente impactado, en más de 60 mil millones de pesos. Lo anterior da cuenta de la posibilidad de encontrar una solución que logre un balance entre las dimensiones económicas y ambientales, tratando de reducir la distancia euclidiana de los desempeños de cada solución respecto a la utópica.

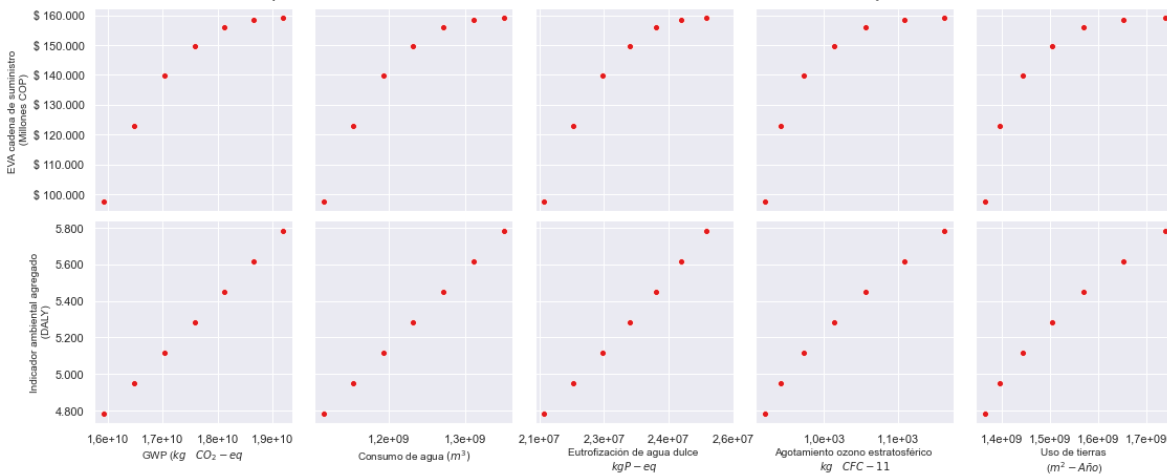
Figura 3-20. Soluciones no dominadas (frontera de Pareto) para el Desempeño ambiental y económico



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados anteriores también están sujetos a un análisis más profundo, en torno a verificar el comportamiento de cada uno de las categorías de impacto ambiental y sus desempeños frente a las funciones objetivo. En la Figura 3-21 se presentan los resultados para las cinco categorías del LCA de los impactos ambientales. Se observa que existe una relación potencial de cada categoría y el resultado de impacto económico; aunque la reducción del indicador es más lenta para factores tales como el uso de tierras y el agotamiento del ozono, mientras que para los otros factores la reducción es acelerada. En otras palabras, la reducción del impacto ambiental se explica, inicialmente, por la reducción del potencial de generación de calentamiento global, uso de agua y afectación de la eutrofización del agua dulce.

Figura 3-21 Desempeño de las categorías de impactos ambientales analizadas en el diseño de la SBSC. Comportamiento frente a las dimensiones económicas y ambientales



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el desempeño de las categorías de impacto ambiental y el desempeño ambiental agregado exhiben un comportamiento lineal generalizado; es decir, a medida que se obtiene un mejor desempeño ambiental agregado, el impacto ambiental en cada una de las categorías se incrementa linealmente. Sin embargo, el desempeño de los indicadores de agotamiento de ozono,

y huella de tierra, presentan una pendiente mayor que las demás categorías. Este comportamiento posiblemente se asocia a los pesos relativos para la agregación del impacto ambiental. En ese sentido, la categoría de ozono y uso de tierras generan un bajo nivel de contribución al indicador.

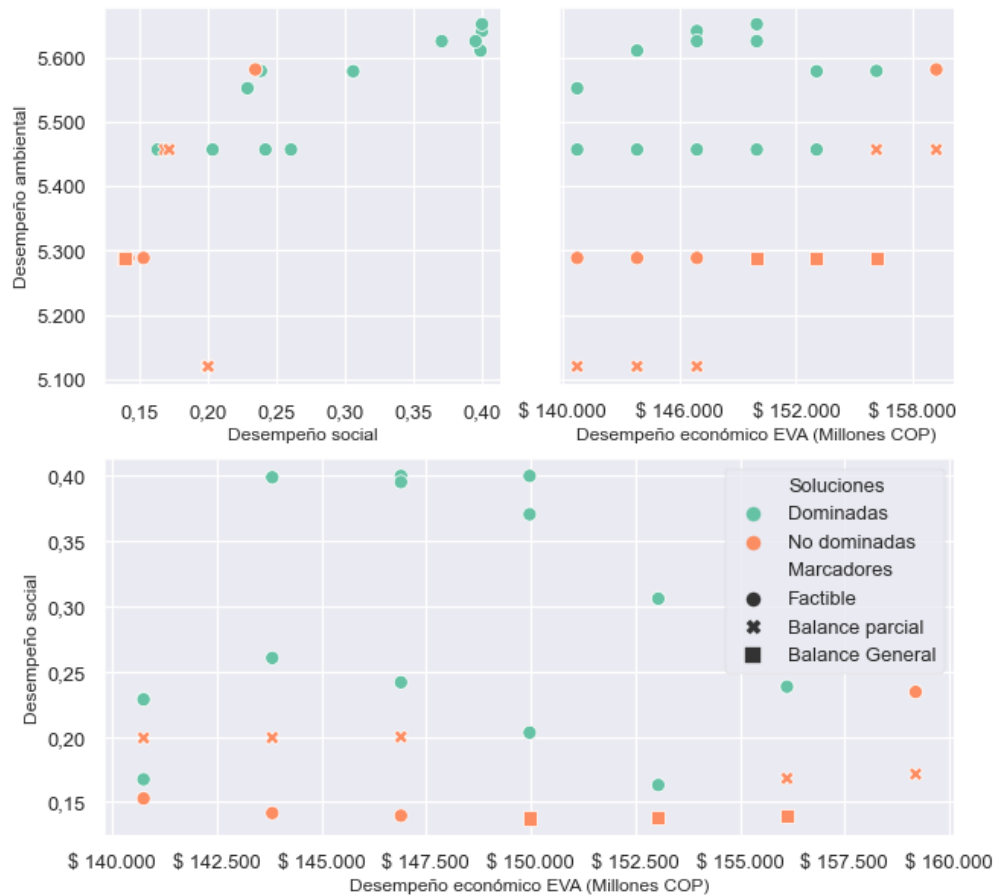
3.5.3. Integración de las dimensiones de la sostenibilidad para la SBSC en un enfoque multi-objetivo

Una vez establecidos las tres dimensiones del desempeño sostenible para el diseño y gestión de la SBSC, la definición de los niveles de importancia de los factores sociales analizados, junto a su metodología de estandarización y la definición de los factores de impacto ambiental y su agregación, se tiene el modelo definido para diseñar la SBSC desde la perspectiva sostenible. Cada una de los desempeños son incluidos de manera simultánea en un enfoque multi-objetivo por medio de la metodología ϵ -restricción, utilizando un conjunto de saltos uniformes sobre las dimensiones económicas y ambientales. Dadas las experiencias anteriores, se establecieron los límites sobre cada una de las funciones objetivo abordadas (desempeño ideal y desempeño indeseado).

La

presenta los resultados del MA-MAB para la instancia del caso de estudio. En ella es posible observar la relación existente entre cada uno de los desempeños analizados. Un aspecto importante que llama la atención es que los objetivos social y ambiental tienen un sentido de optimización común, pues al optimizar la dimensión social también se optimiza la dimensión ambiental; sin embargo, no es una regla generalizada. La dimensión ambiental exhibe un comportamiento conflictivo con el desempeño económico, tal como se evidenció antes; al igual que ocurre entre el desempeño social y económico. Adicionalmente, las figuras muestran las soluciones dominadas y no dominadas resultantes del enfoque multi-objetivo. Algunas soluciones tienen un balance parcial entre cada par de indicadores, marcadas con una "x"; otras presentan un balance general, en los tres indicadores, marcados por un cuadro "□". Es importante destacar que el criterio para seleccionar las soluciones balanceadas corresponde a la mínima distancia euclidiana entre las soluciones no dominadas y la solución utópica, parcial y general.

Figura 3-22 Desempeño sostenible en el diseño de la cadena de abastecimiento de los Biocombustibles



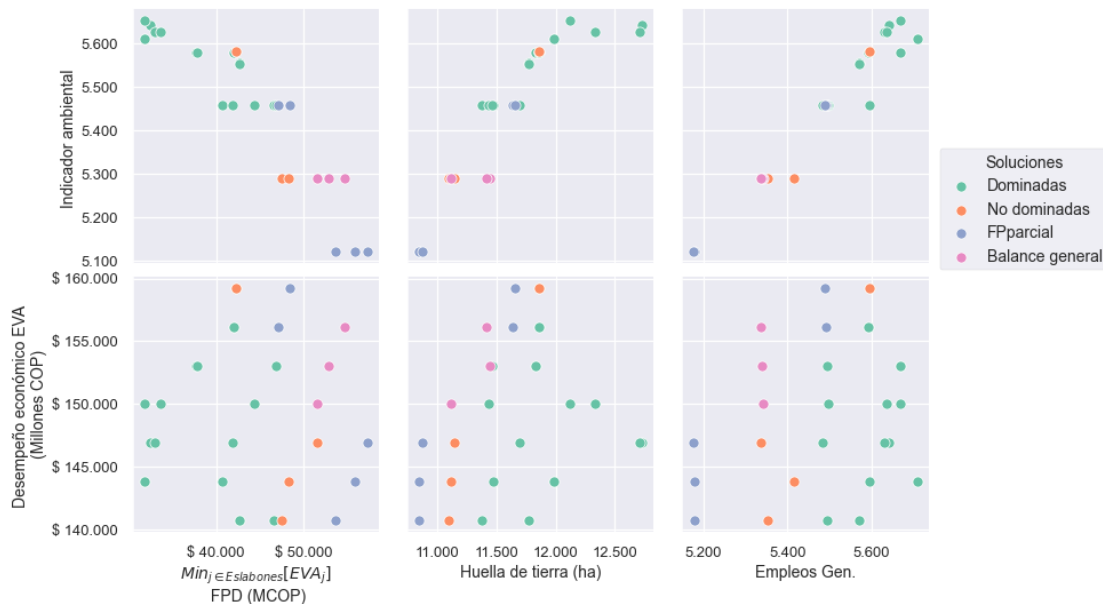
Fuente: Elaboración propia.

Las soluciones con balance general, representadas por cuadros, muestran un desempeño social con una poca penalización respecto a su límite inferior; igualmente, para el desempeño económico, con un bajo nivel de afectación. Sin embargo, para la dimensión ambiental existe un nivel más amplio de penalización, y está sujeta a la dimensión económica, dado que remediar las afectaciones ambientales implica sacrificios económicos, aunque el desempeño social se vea ligeramente afectado. En ese sentido, las decisiones balanceadas se identifican como guías para el proceso de toma de decisiones en torno al diseño de la cadena de abastecimiento considerando el desempeño sostenible.

En secciones anteriores se logró establecer la relación directa entre el indicador ambiental con sus 5 categorías de impactos analizadas; sin embargo, para el indicador social algunas de las categorías de impactos que se encontraban en conflicto. Por consiguiente, resulta imperativo realizar un análisis de las categorías de los impactos sociales frente a los desempeños ambiental y económico. En la Figura 3-23 se presentan los resultados del análisis del impacto social desagregado para las soluciones del desempeño sostenible. Las categorías sociales exhiben comportamientos deseables respecto a los desempeños ambiental y económico. El FPD tiene su mejor resultado en una solución no dominada para el desempeño ambiental, evidenciando el mismo sentido de optimización, señalando dicho comportamiento como deseable para la cadena de los biocombustibles. Este resultado permite que los actores de la cadena posean mayor poder de negociación, mayor nivel de

integración, así como altos niveles de comunicación y la sincronización de las operaciones entre los actores de la cadena. De manera análoga, el mejor desempeño ambiental es alcanzado, reduciendo los impactos a través de un menor impacto en los recursos naturales.

Figura 3-23 Categorías del desempeño social sobre la dimensión económica y ambiental



Fuente: Elaboración propia.

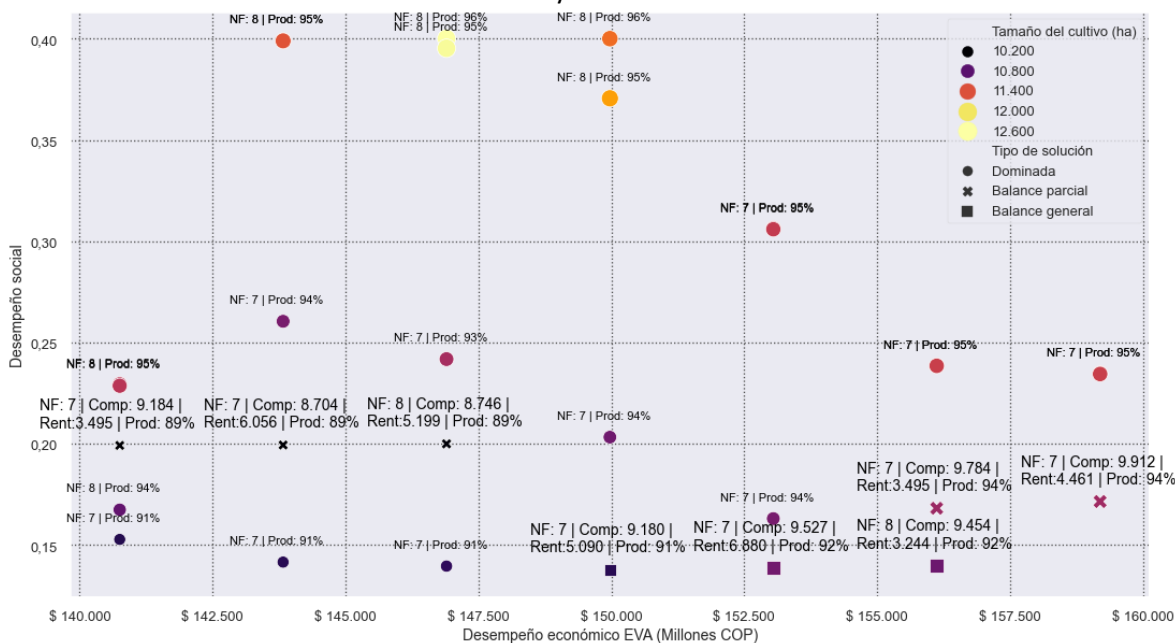
Respecto a la huella de tierra, su resultado en comparación con el indicador ambiental es similar, pues al optimizar la huella de tierra también se minimizan los impactos ambientales. Aunque la categoría de tierras se involucra en ambos desempeños, para el componente social la huella de tierra tiene una concepción multidimensional, con relación a la seguridad alimentaria, la protección de la biodiversidad como fuente de interés de la sociedad general. La relación de la huella de tierra y el desempeño económico no es muy concreta, ya que las soluciones no dominadas abarcan un rango amplio, que podrían estar en conflicto, al minimizar la huella de tierra y obtener desempeños económicos, entre medios y bajos. A pesar de la dispersión de los datos, las soluciones con balance general entre las dimensiones del TLB presentan un buen desempeño para la huella de tierra, entre el percentil 80 y 85 de su desempeño ideal.

Con relación a la categoría de generación de empleo, esta presenta desempeños económicos de alta volatilidad y dispersión, aunque se logran identificar soluciones de buena calidad para ambos niveles. Sin embargo, al buscar maximizar el nivel de empleo generado, la dimensión económica pierde eficiencia hacia el percentil 15. Por otro lado, se presentan resultados en conflicto frente a la dimensión ambiental, a tal punto de presentar una relación inversamente proporcional. Otro aspecto relevante corresponde a que la generación de empleo se encuentra incluso en conflicto con el FPD y la huella de tierra, penalizando el índice general de desempeño social. De igual manera, las soluciones con balance general presentan rendimientos por encima del percentil 80 para los factores FPD y huella de tierra y solo del percentil 40 para el caso de la generación de puestos de trabajo.

Por otro lado, es importante identificar cómo cambia el diseño y gestión de la SBSC para las múltiples decisiones de balance parcial y general ofrecidas por el MA-MAB, en su versión multi-objetivo. En la

Figura 3-24 se presentan múltiples datos respecto al número de fincas asignadas para la instancia del caso de estudio, el tamaño máximo de cultivo que se alcanzó durante el horizonte de planeación, la cantidad de tierras a comprar y arrendar, al igual que la productividad promedio reportada por la BR, junto a los desempeños social y económico.

Figura 3-24 Diseño de las SBSC y su relación con los desempeño sostenible en sus dimensiones social y económico

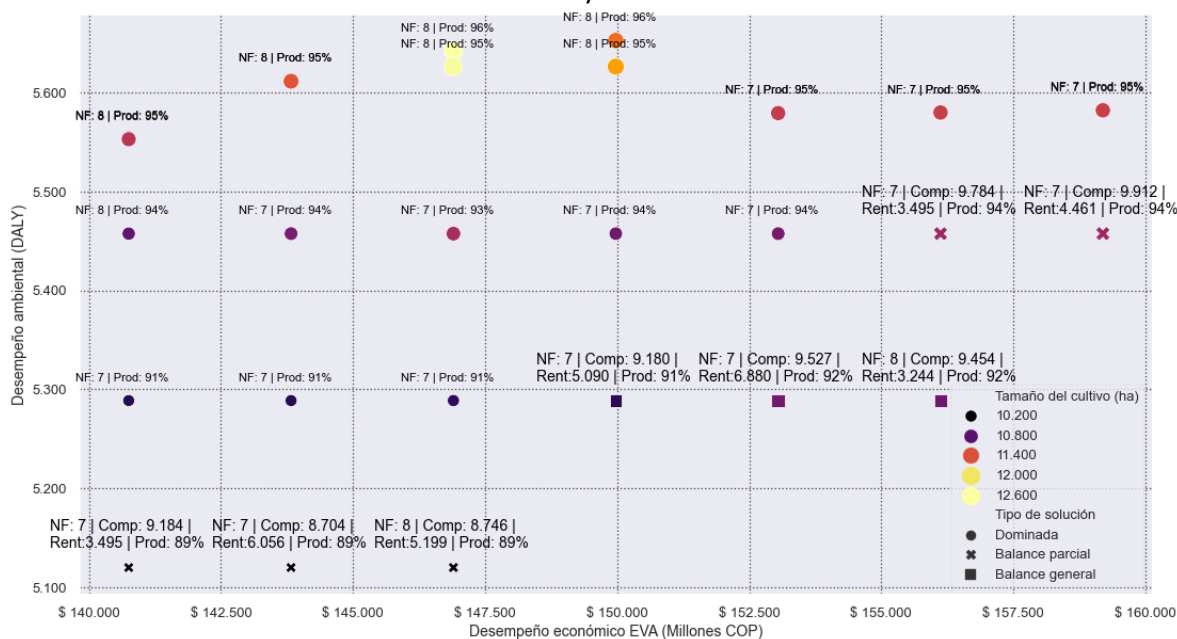


Fuente: Elaboración propia.

Un aspecto muy notorio es que las soluciones dominadas ostentan un tamaño de cultivo de altas proporciones, por encima de 11.400 has, con niveles de productividad promedio superiores a los 95%, pero con bajos desempeños a nivel social y económico. Por su parte, las soluciones balanceadas presentan un cultivo más reducido que ofrece niveles de producción del 91% y 92% en la BR, con desempeños para la dimensión social entre los percentiles 92 y 100; y en la dimensión económicas desde el percentil 53 hasta el 90. Aunque se presentan soluciones que maximizan el desempeño económico sin sacrificar mayormente el desempeño social, estas presentan un mejor nivel de productividad promedio de la BR (94%) y utilizan solo 7 fincas de las 30 consideradas.

Adicionalmente, otro conjunto de soluciones de balance parcial, deterioran un poco el componente social, pero tienen los peores niveles de eficiencia financiera, así como una productividad de la BR de 89%, la más baja obtenida en todas las soluciones; sin embargo con muy buenos desempeños a nivel ambiental, tal como se puede observar en la Figura 3-25, en donde se identifican soluciones que minimizan los impactos ambientales. También se observa que las soluciones balanceadas, a pesar de tener buenos desempeños a nivel social, económico y ambiental, en este último solo se alcanzan el percentil 75. Entre las soluciones balanceadas varían el número de fincas, entre 7 y 8 asignadas, y en su estrategia de adquisición, fincas compradas consistente entre las soluciones, pero con diferencias hasta de un 50% entre las tierras rentadas. Aunque tienen niveles similares de productividad de la BR, el desarrollo de los cultivos, las operaciones de siembra y cosecha varían en cada una de las soluciones.

Figura 3-25 Diseño de las SBSC y su relación con los desempeño sostenible en sus dimensiones ambiental y económico



Fuente: Elaboración propia.

Un aspecto que llama la atención, es que las soluciones que optimizan el desempeño ambiental, reducen de manera significativa el área del cultivo, disminuyendo al 89% la productividad promedio de la BR, pero con mayor eficiencia en el manejo del cultivo y una asignación óptima de las fincas en función de su cercanía con la BR. Además, una característica de las soluciones dominadas es que presentan niveles altos de ocupación de tierras (8 fincas), realizando mayores operaciones agrícolas y con buen desempeño de la BR, en términos de productividad; sin embargo, exhibe resultados indeseables de impacto ambiental. Por último, se puede observar que los cambios pequeños en términos del beneficio social y económico, representan saltos enormes en impacto ambiental. Con base en lo anterior, es posible utilizar las soluciones balanceadas como opciones válidas para el diseño y gestión de la SBSC desde una perspectiva sostenible. Además, es posible observar que, a nivel de estructura del componente agrícola, el nivel de abastecimiento de la BR y sus operaciones de flujo de producto a través de la cadena son similares, ofreciendo robustez en las soluciones propuestas.

3.6. Análisis de sensibilidad sobre el diseño y gestión de la SBSC

Como se mencionó en la sección 2.1.2, por medio de los modelos computacionales propuestos, es posible modelar la influencia que tienen algunos factores en el diseño de la SBSC y en su desempeño en las tres dimensiones de la sostenibilidad. Inicialmente, el MAG modela el retraso de la construcción de la BR, la curva de adaptabilidad del cultivo durante el horizonte de planeación, la maquinaria agrícola necesaria para operar el eslabón agrícola, el costo de adquisición de las tierras y la influencia del precio de comercialización de la caña de azúcar. Estos factores contribuyen positiva y negativamente a las fincas en su desempeño económico. Seguidamente, el modelo MA-MAB permite conocer la influencia de la distancia de las fincas y la BR, así como el establecimiento del precio de transferencia de la caña de azúcar. Estos factores involucran más las dimensiones social y ambiental, al igual que el diseño y gestión de la cadena.

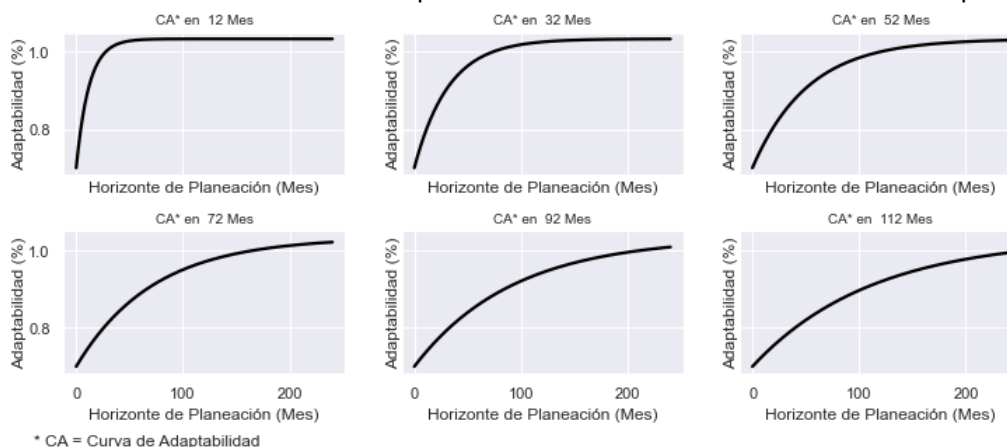
A continuación, se presentan los análisis de sensibilidad mencionados, realizando corridas adicionales y encontrando la incidencia de los factores mencionados sobre las decisiones de diseño de la cadena y sobre su desempeño.

3.6.1. Análisis de sensibilidad sobre la adaptabilidad del cultivo y retrasos en la construcción de la biorefinería

Por medio del modelo MAg, resulta interesante analizar ciertos factores que pueden poner en riesgo la factibilidad del caso de estudio, particularmente en el eslabón agrícola. El primer factor corresponde al rendimiento del cultivo (cantidad de caña de azúcar cosechada por hectárea), la cual puede ser afectada por varios elementos, entre ellos, la adaptabilidad del cultivo en un área sin tradición agrícola. Para este caso, se analizaron dos escenarios de afectación: el primero, corresponde a la habilidad para asimilar el uso de nueva maquinaria (tecnología) y técnicas de producción agrícola; este proceso de obtención de las habilidades es conocido como curva de aprendizaje (capacitación y experiencia de la mano de obra), aspecto que afecta directamente el desempeño de los cultivos. El segundo, es la adaptabilidad del suelo para desarrollar un nuevo cultivo, el cual también debe ser analizado dado que el agotamiento del suelo respecto a los nutrientes debe ser compensado y mejorado de manera paulatina.

Estos escenarios pueden ser evaluados por medio de una curva de adaptabilidad, la cual empieza con un nivel de afectación al inicio del periodo de evaluación y con el pasar de los periodos, se van implementando acciones de remediación para mejorar el nivel de adaptabilidad del cultivo. Como se puede observar en la Figura 3-26, el análisis implementado tiene en cuenta múltiples escenarios de curvas de adaptabilidad del cultivo. Dichas curvas evalúan la adaptabilidad del cultivo durante el horizonte de planeación, las cuales afectan el rendimiento estándar del cultivo de caña de azúcar, impactando negativa y positivamente en su rendimiento. Los escenarios se diferencian por la rapidez del cultivo en alcanzar un rendimiento igual o mejor al estándar usado en el caso de estudio.

Figura 3-26 Escenarios de curvas de adaptabilidad del cultivo durante el horizonte de planeación



Fuente: Elaboración propia.

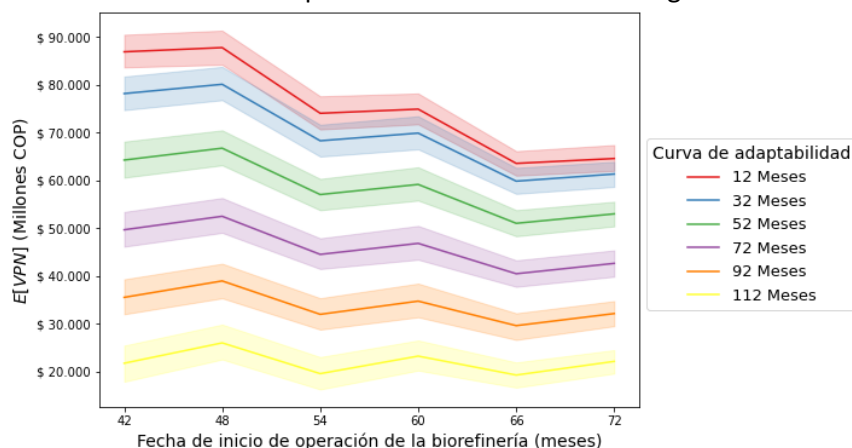
A manera de ejemplo, el primer escenario, logra una adaptabilidad del 90% en el mes 12 respecto al rendimiento estándar; en el otro extremo, el último escenario alcanza el 90% de adaptabilidad en el mes 112. Aunque el rendimiento del cultivo previamente había sido relacionado con afectaciones

causadas por las condiciones climáticas, en este análisis de sensibilidad se incluyen las afectaciones climáticas y la curva de adaptabilidad.

Otro aspecto relevante se relaciona con la fecha de inicio de operaciones por parte de la BR, que depende directamente de la eficiencia en la construcción. Aunque el retraso de la construcción depende de un sin número de factores, cuyo análisis está fuera del alcance de esta tesis doctoral, sus efectos si fueron considerados como fuentes de retraso en la construcción (Borgonovo et al., 2010; Gatti, 2013). La fecha de inicio de operaciones industriales por parte de la BR es considerada entre dos escenarios extremos; en el escenario optimista se inician operaciones en el mes 42, y el pesimista en el mes 72. Para tal fin, se evaluaron escenarios intermedios con 6 meses de diferencia, para un total de 6 escenarios a evaluar.

Los resultados computacionales del análisis de sensibilidad (curvas de adaptabilidad y fecha de inicio de operación en la biorefinería) son presentados en la Figura 3-27. En ella se expone una combinación de los dos factores analizados, identificando el desempeño económico esperado para cada escenario. De acuerdo con los resultados obtenidos, una curva de adaptabilidad acelerada y una fecha de inicio de las operaciones temprana corresponden al escenario ideal para el diseño del eslabón agrícola en la SBSC. Sin embargo, el escenario ideal implica situaciones particulares respecto a los factores analizados, pues se requieren grandes esfuerzos para alcanzar una curva de adaptabilidad acelerada, representados en capacitación y entrenamiento de la mano de obra, preparación de suelos, rotación de cultivos, utilización de biofertilizante, riego por goteo, entre otros.

Figura 3-27 Influencia de la curva de adaptabilidad del cultivo e inicio de operaciones de la biorefinería sobre el desempeño económico del eslabón agrícola de la SBSC

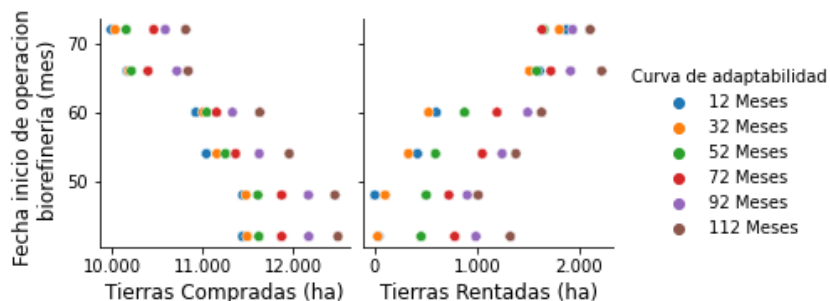


Fuente: Elaboración propia.

Otro resultado sobresaliente, corresponde a la estrategia de adquisición de tierras, el cual se presenta en la Figura 3-28. Allí se observa la influencia de la fecha de inicio de operación en la BR sobre la estrategia de adquisición de tierras bajo la modalidad de compra, pues se necesita adquirir más tierra en escenarios optimistas y, a medida que la fecha de inicio presenta retrasos, esta cantidad se reduce. De manera contraria, la cantidad de predios adquiridos, bajo la modalidad de renta, se incrementa con la tardanza de la fecha de inicio operaciones. Este último resultado es esperable, dado que, al aumentar la tardanza de la fecha de inicio de operaciones, el ingreso global se reduce. En consecuencia, rentar tierra podría ser una manera de reducir el impacto de los costos de inversión y distribuirlos en el horizonte de planificación. Por otro lado, a medida que se aumenta

la curva de adaptabilidad del cultivo, la cantidad de tierras a adquirir, bajo ambas modalidades, también se incrementa. Esto probablemente sucede debido a que la pérdida de rendimiento del cultivo se debe contrarrestar con una mayor área sembrada.

Figura 3-28 Influencia de la curva de adaptabilidad del cultivo e inicio de operaciones de la biorefinería sobre el esquema de adquisición de tierras para el desarrollo del cultivo

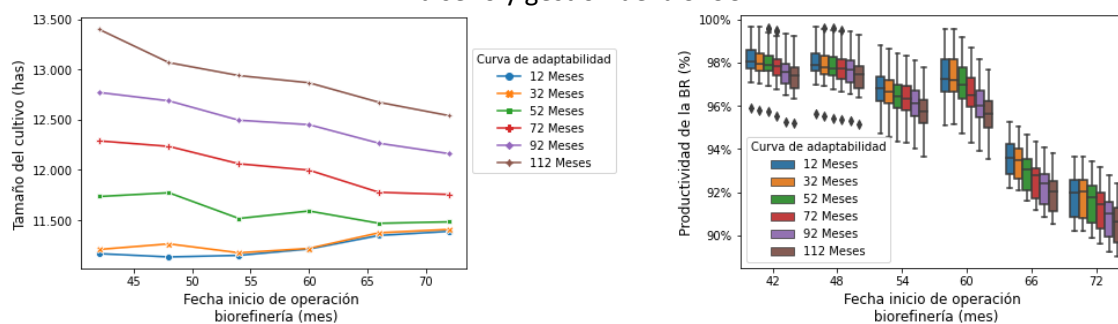


Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, es importante analizar cómo se afectan las decisiones de diseño y gestión de la SBSC durante la variación de los factores analizados. En la Figura 3-29 (a), se observa como la curva de adaptabilidad de cultivo impacta negativamente su tamaño, aspecto que no solo desde el punto de vista económico se ve afectado, dado que este componente afecta también la dimensión social y ambiental del desempeño sostenible. En ese sentido, al aumentar el tamaño de los cultivos se estaría incrementando la necesidad de recursos, el consumo de agua y mayor inversión en la adquisición de predios, impactando también la seguridad alimentaria al reducir la posibilidad de aprovechamiento de los terrenos arables para la producción de alimentos. Aunque desde el punto de vista de generación de puestos de trabajo se puede ver atractivo, desde la dimensión ambiental y económica no genera ningún tipo de beneficio, por lo contrario, afectaría el desempeño sostenible. Por otro lado, el retraso de la construcción de la BR reduce el tamaño del cultivo, lo cual desde el punto de vista económico destruye valor; sin embargo, para la combinación de escenarios de adaptabilidad acelerada y retraso en la construcción, se incrementa el cultivo con el objetivo de mejorar la rentabilidad financiera, al tener periodos de ingreso cero.

De manera análoga, en la Figura 3-29 (b) la productividad promedio se ve afectada drásticamente por el retraso en la construcción de la BR, lo que, a su vez, retrasa la fecha de inicio de operación de la SBSC. Aunque la curva de adaptabilidad aparentemente no influye en los niveles de producción de la BR, a medida que la curva es más lenta y se presenta mayor retraso en la construcción, el nivel de afectación se incrementa. En ese sentido, al lograr un menor nivel de producción, se presenta una reducción del rendimiento económico y la huella de tierra se ve fuertemente impactada deteriorando de manera significativa el desempeño social; se observa también un mayor consumo de recursos y emisiones al medio ambiente. Por lo anterior, los factores analizados generan un impacto negativo en el desempeño sostenible de la SBSC y, por tanto, se convierten en asuntos que requieren seguimiento exhaustivo al evaluar la factibilidad del proyecto.

Figura 3-29 Influencia de la curva de adaptabilidad del cultivo e inicio de operaciones de la BR en el diseño y gestión de la SBSC



a) Influencia en el tamaño del cultivo

b) Influencia sobre la productividad de la BR

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. Análisis de sensibilidad sobre la disponibilidad de equipo agrícola para siembra y cosecha

Otro aspecto importante para ser analizado involucra la capacidad del equipo agrícola como una decisión estratégica y con gran influencia en el desempeño económico del eslabón agrícola. Aunque la maquinaria agrícola está compuesta por una gran variedad de equipo, la cosechadora mecánica ejerce un rol protagónico debido a su costo y a la velocidad de operación, la cual establece la tasa de cosecha del frente agrícola (Grunow et al., 2007). Por otro lado, dada la importancia entre la sincronización de las operaciones de siembra y cosecha, el equipo de siembra también debe ser evaluado en términos de su capacidad. De acuerdo con lo anterior, se analizó la capacidad de operación de ambos frentes (siembra y cosecha) de manera simultánea, evaluando el impacto económico generado al incrementar la capacidad de operación y la inversión representada en maquinaria.

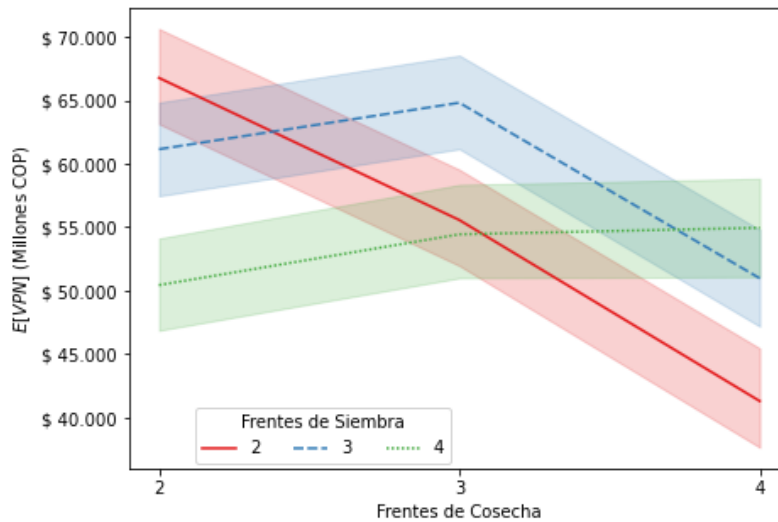
Los resultados de la experimentación computacional son resumidos en la influencia de la maquinaria agrícola, en términos de los frentes de cosecha y de siembra, sobre el tamaño del cultivo y la productividad de la BR se presentan en la Figura 3-31. El aspecto más significativo corresponde a la reducción del tamaño del cultivo al aumentar la disponibilidad de máquina para cosecha. Aunque parezca un aspecto deseable, desde el punto de vista económico no lo es. Este fenómeno ocurre debido a que se tiene un mayor nivel de holgura en la asignación de la maquinaria lo que permite que se optimice su utilización. Contrariamente, el aumento de la maquinaria de siembra aumenta el tamaño del cultivo por lo que permite una mayor flexibilización de la operación de siembra, realizando operaciones durante los periodos de cosecha, y reduciendo las desviaciones de productividad, por la pérdida natural causada por la edad de los campos agrícolas. En términos de la producción, aparentemente no existe diferencia entre los factores analizados, aunque al tener dos frentes de siembra, se presenta una ligera reducción en los niveles de producción de la BR.

Figura 3-30. Como se puede observar, el mejor escenario en términos del desempeño económico corresponde a la combinación de dos frentes de cosecha y dos frentes de siembra. Aunque la combinación de 3 frentes para ambos grupos de maquinaria pareciera una buena opción, el valor esperado es ligeramente inferior al escenario anterior y, en términos de su variación, también presenta un intervalo de confianza estadísticamente inferior. Por otro lado, escenarios compuestos por cuatro frentes de siembra, y escenarios con tres y más frentes de cosecha, reducen el

desempeño económico, por efectos de mayores niveles de ociosidad e inversión.

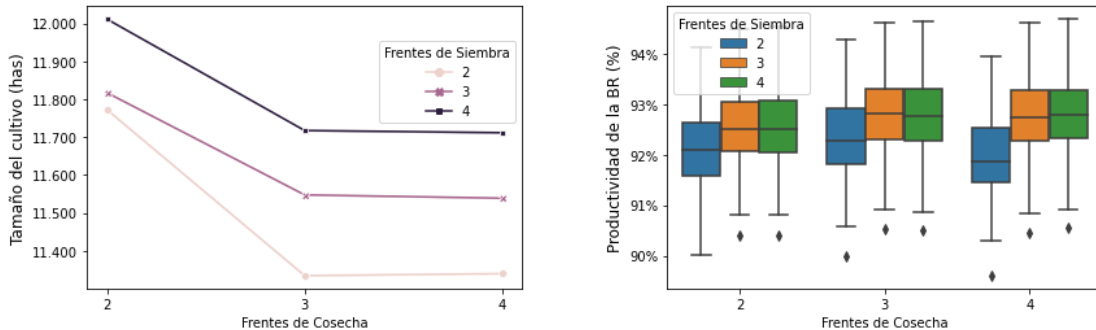
La influencia de la maquinaria agrícola, en términos de los frentes de cosecha y de siembra, sobre el tamaño del cultivo y la productividad de la BR se presentan en la Figura 3-31. El aspecto más significativo corresponde a la reducción del tamaño del cultivo al aumentar la disponibilidad de máquina para cosecha. Aunque parezca un aspecto deseable, desde el punto de vista económico no lo es. Este fenómeno ocurre debido a que se tiene un mayor nivel de holgura en la asignación de la maquinaria lo que permite que se optimice su utilización. Contrariamente, el aumento de la maquinaria de siembra aumenta el tamaño del cultivo por lo que permite una mayor flexibilización de la operación de siembra, realizando operaciones durante los periodos de cosecha, y reduciendo las desviaciones de productividad, por la pérdida natural causada por la edad de los campos agrícolas. En términos de la producción, aparentemente no existe diferencia entre los factores analizados, aunque al tener dos frentes de siembra, se presenta una ligera reducción en los niveles de producción de la BR.

Figura 3-30 Sensibilidad sobre los frentes de cosecha y siembra durante el desarrollo agrícola



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3-31 Influencia de la maquinaria agrícola en el diseño y gestión de la SBSC



a) Influencia en el tamaño del cultivo

b) Influencia sobre la productividad de la BR

Fuente: Elaboración propia.

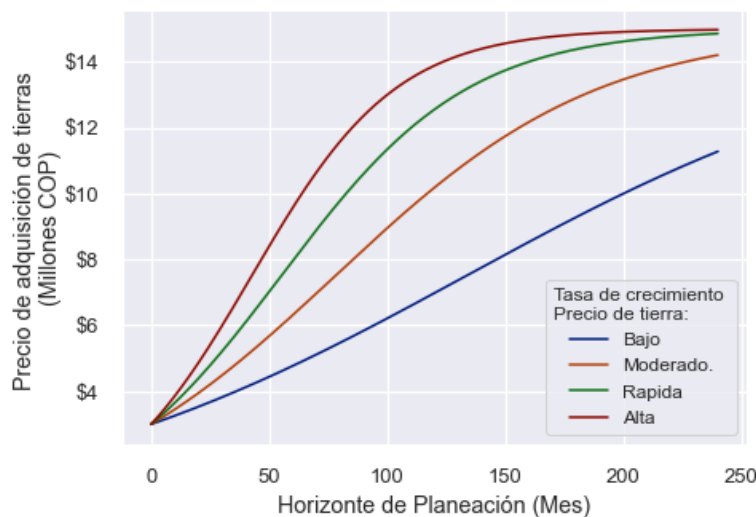
3.6.3. Análisis de sensibilidad del precio venta de la caña de azúcar y el costo de adquisición de la tierra

El precio de venta de la caña de azúcar y el costo de adquisición de tierras son dos parámetros que afectan el desempeño económico del eslabón agrícola. Por tanto, resulta imperativo realizar un análisis de sensibilidad adicional sobre estos factores adicionales. Con relación al comportamiento de los precios de la tierra, Sihombing et al. (2018) identifico que, en el largo plazo, los costos de adquisición de tierras para el desarrollo de proyectos agrícola en áreas rurales pueden llegar a variar de manera significativa. En particular, factores como las características del terreno, la localización de los predios, la disponibilidad de servicios públicos, el desarrollo económico y social de la región, entre otros, pueden llegar a ser determinantes en la variación incremental del precio de los terrenos (Dunford et al., 1985).

En esta vía, se modelan cuatro escenarios de precios de tierra, para los cuales se asumen un conjunto de tasas de crecimiento logístico (crecimiento bajo, moderado, rápido y alto). Este tipo de comportamientos son comunes en expansión de poblaciones, las cuales tienen un desarrollo acelerado, pero con el tiempo los recursos comienzan a ser escasos y luego de una desaceleración se presenta una estabilidad en ellas. Múltiples sistemas económicos siguen este tipo de patrón de crecimiento, tales como: el gasto público, el desarrollo económico, la expansión rural, y los precios de mercado de múltiples bienes como la tierra (Florio & Colautti, 2005; Semboloni, 2006).

En este contexto, se genera una fase inicial de crecimiento exponencial del precio de la tierra, por la apertura de frontera agroindustrial y desarrollo económico regional. Con el tiempo la tasa de crecimiento del precio se reduce debido a la reducción de la demanda, a la saturación del negocio y al bajo desarrollo de la agroindustria, estabilizando su nivel de precio. Basados en lo anterior, se consideraron dos límites para el precio de la tierra: un costo mínimo de 5 millones de pesos por hectárea y un máximo de 15 millones de pesos. En la Figura 3-32 se presentan las curvas de costo de compra de tierra para los cuatro escenarios analizados.

Figura 3-32 Escenarios de costo de compra de terrenos modelados por medio del crecimiento logístico



Fuente: Elaboración propia.

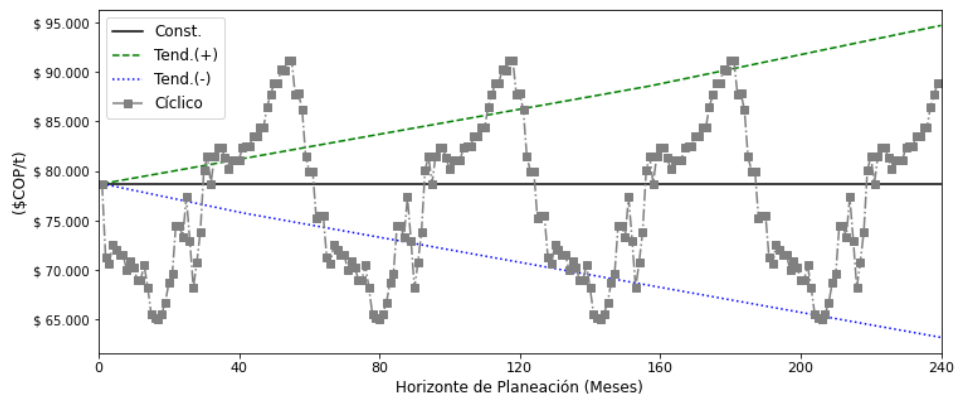
Una de las fuentes de información recolectada en el diseño del caso de estudio, corresponde al precio histórico que ha tenido el etanol en Colombia. Este precio sirve como base para calcular el precio de caña de azúcar, el cual es pagado por las biorefinerías a los cultivadores de caña de azúcar, como un porcentaje sobre la producción equivalente del etanol producido. Para efectos del análisis, se utilizó un factor de producción de 72.5 litros de etanol por tonelada de caña (van den Wall Bake et al., 2009); así mismo, como los precios en Colombia son determinados por galón de combustible, se utilizó el factor de conversión de galones a litros. Finalmente, se asumió un factor del 50% de participación del productor de caña de azúcar sobre el precio del producto terminado. En resumen, el precio de la caña de azúcar puede ser calculado usando la Ecuación (89).

$$PrecioCa = PrecioEtanol \frac{\$}{gls} * 72.5 \frac{l}{t} * 3.785^{-1} \frac{gls}{l} * 50\% \quad (89)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, se proyectaron cuatro escenarios de precio de la caña de azúcar, así: precio constante (Const.), tendencia positiva (Tend.(+)), tendencia negativa (Tend.(-)), precio estacional-cíclico (Cíclico). El valor constante, corresponde al valor medio del precio histórico, mientras que las tendencias positivas y negativas se calcularon con una pendiente del 1% anual, para un incremento total del 20% a lo largo del horizonte de planeación. Para el caso cíclico, se utilizó regresión lineal con ajuste estacional, dado que ofreció la menor desviación cuadrática media, frente a métodos como suavización exponencial, auto regresivos, entre otros; tal como se puede observar en la Figura 3-31.

Considerando los escenarios de precios de venta de la caña de azúcar y los escenarios de costo de adquisición de terrenos (compra de tierras), se llevó a cabo una experimentación computacional involucrando la combinación de los escenarios. En la Figura 3-34 se pueden observar los resultados de los escenarios evaluados en función del desempeño económico esperado. Uno de los resultados más significativos corresponde a la influencia que tiene el costo de adquisición de tierra sobre el desempeño económico, afectándolo negativamente, a medida que la tasa de crecimiento del costo se incrementa. Este comportamiento es consistente para cada escenario de precio de caña de azúcar. Respecto a los escenarios de precios cíclicos y constante, se observa un desempeño económico similar; sin embargo, para el caso del precio con tendencia positiva, se identificaron desempeños mucho mayores. De forma contraria, los escenarios de precios de caña con tendencia negativa, ponen en riesgo la factibilidad de la SBSC, al presentar desempeños económicos negativos en el eslabón agrícola.

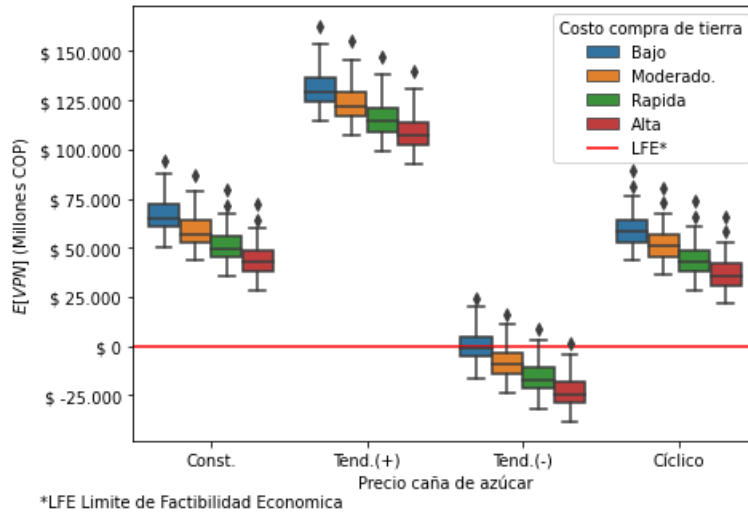
Figura 3-33 Escenarios de precios de caña de azúcar basados en los precios históricos del etanol



Fuente: Elaboración propia.

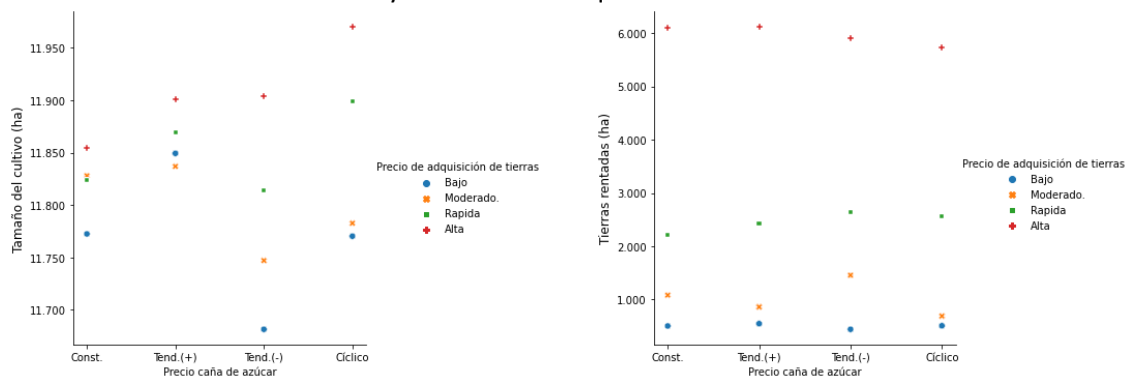
Aunque se observan diferencias significativas en el desempeño económico entre los escenarios de las combinaciones de precio de la caña y de adquisición de tierra, la productividad de la BR no se ve afectada, pues se alcanzan niveles de suministro y producción de etanol muy similares. A pesar de lo anterior, existen diferencias respecto al tamaño del cultivo y la programación de las actividades agrícolas. En la Figura 3-35 (a) se puede observar que el patrón de precio para la adquisición de tierras incrementa el tamaño de los cultivos, para todos los escenarios de precio de caña de azúcar. De manera contraria ocurre con el precio de tierras bajo, reduciendo el tamaño del cultivo. Para el caso de los precios de tierra moderado y rápido se presentan niveles intermedios del tamaño del cultivo. De acuerdo con el comportamiento observado, es posible evidenciar que un alto precio de la tierra incide en aumentar el tamaño, principalmente cuando el precio de caña es considerado volátil. Por un lado, debido a que estimula la renta de tierras como medida de control, tal como se observa en la figura 3-33 (b), evidenciando que el precio bajo de las tierras reduce la cantidad de área del cultivo y la rentada.

Figura 3-34 Sensibilidad sobre los precios de la caña de azúcar y del costo de adquisición de tierras



Fuente: Elaboración propia

Figura 3-35 Influencia sobre el tamaño del cultivo de los cambios sobre los precios de la caña de azúcar y del costo de adquisición de tierras



a) Influencia en el tamaño del cultivo

b) Influencia sobre las tierras rentadas

Fuente: Elaboración propia

3.6.4. Análisis de sensibilidad de la distancia sobre el desempeño sostenible

Por medio del modelo MA-MAB es posible realizar algunos análisis de sensibilidad sobre la influencia de la distancia dentro del desempeño sostenible, en especial sobre las dimensiones social y ambiental, dado que la solución del caso de estudio evidenció que existe una preferencia por asignar fincas con mayor cercanía alrededor de la BR. Los aspectos importantes del MA-MAB corresponden a la relación de un conjunto de fincas, caracterizadas por su localización, su dimensión y su capacidad de gestionar las operaciones; de igual manera involucra a la BR dentro de un marco de toma de decisiones sincronizadas. En ese sentido, al tener en cuenta la localización y las distancias entre los actores, es posible analizar la sensibilidad sobre este factor determinando sus incidencias en las decisiones de diseño y gestión de las SBSC y su desempeño.

El suministro de materia prima requiere de tres aspectos fundamentales: la disponibilidad del producto, el transporte y la calidad. Estos tres aspectos generan un reto importante para las SBSC. Por un lado, existen múltiples fuentes de incertidumbre que inciden en la calidad y disponibilidad de las materias primas, tal como se ha podido evidenciar previamente, donde las condiciones climáticas generan impacto en la productividad de los campos de caña de azúcar y la duración de la temporada de cosecha. Por otro lado, la distancia de las fincas incide en los costos de transporte y, cuando se combina con la disponibilidad de materia prima, se convierte en un factor determinante para la localización de fincas y la asignación del tamaño de los cultivos.

El análisis de sensibilidad sobre el factor distancia se enfoca en variar la distancia existente entre las fincas y la BR. De manera específica, el experimento contempla la modificación de la matriz de distancias para el caso de estudio, conformando dos escenarios de 12 y 24 km entre las fincas y la BR, respectivamente. Para estos dos escenarios se calculó el desempeño económico, social y ambiental, al igual que múltiples decisiones sobre el diseño y gestión de la SBSC.

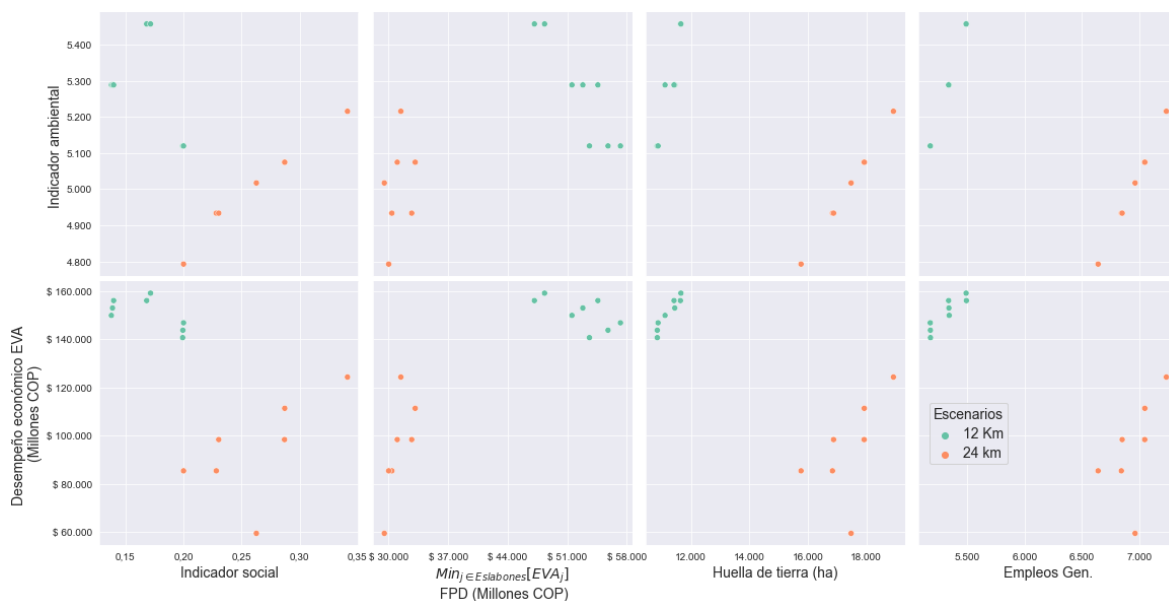
En la Figura 3-36 se pueden observar los resultados para las soluciones no dominadas respecto al desempeño sostenible para los escenarios distancia. La dimensión social fue desagregada en sus componentes constitutivos (FPD, huella de tierra y generación de empleo), con el fin de observar con mayor detalle las tendencias y correlaciones entre los indicadores. De manera general se puede observar que el escenario con una distancia promedio reducida, mejora los desempeños social y económico; mientras tanto, el ambiental se ve afectado al generar impacto superior comparado con el escenario de mayor distancia. Uno de los factores más penalizados es el FPD, el cual se percibe fuertemente afectado en el escenario de mayor distancia; sin embargo, el escenario opuesto, se presentan resultados más favorables, aunque en conflicto respecto al desempeño económico y con igual tendencia respecto al ambiental.

Por su parte, la huella de tierra se percibe con resultados extremos entre los dos escenarios. Mientras para las fincas más cercanas a la BR se obtiene un resultado ideal, sin mayor variabilidad respecto al desempeño económico, el desempeño ambiental resulta fuertemente afectado con pequeños cambios al incrementar el uso de tierras. En el escenario de mayor distancia entre las fincas y la BR, las afectaciones económicas y ambientales se incrementan fuertemente. En el mejor de los casos, la huella de tierra crece por encima del 50%, mientras que el desempeño económico se ve fuertemente impactado. A pesar de lo anterior, el desempeño ambiental presenta niveles

inferiores respecto al otro escenario. La generación de empleo exhibe sus mejores desempeños en el escenario de mayor distancia, aunque con una grave afectación del desempeño económico; sin embargo, tienen la misma dirección de optimización, pues crecen directamente proporcional en la mayoría de los casos. Respecto al indicador ambiental, se presenta conflicto con la generación empleo, aunque presenta mejores niveles que el escenario con distancia corta.

Por medio del presente análisis de sensibilidad se identificaron relaciones entre las dimensiones del desempeño sostenible y la distancia existente entre las fincas y la BR. De igual manera es posible establecer las relaciones entre las variables de diseño y gestión de operaciones de la SBSC, al igual que observar la influencia que el factor distancia puede ejercer en ellas, y así, entender mejor el desempeño. En la Figura 3-37 se presenta la caracterización del diseño de la SBSC para los escenarios de distancia entre las fincas y la BR, al igual que su relacionamiento con las dimensiones de sostenibilidad. A continuación, se listan los resultados más sobresalientes del análisis de sensibilidad.

Figura 3-36 Influencia de la distancia en el desempeño sostenible. Desagregando el desempeño social.



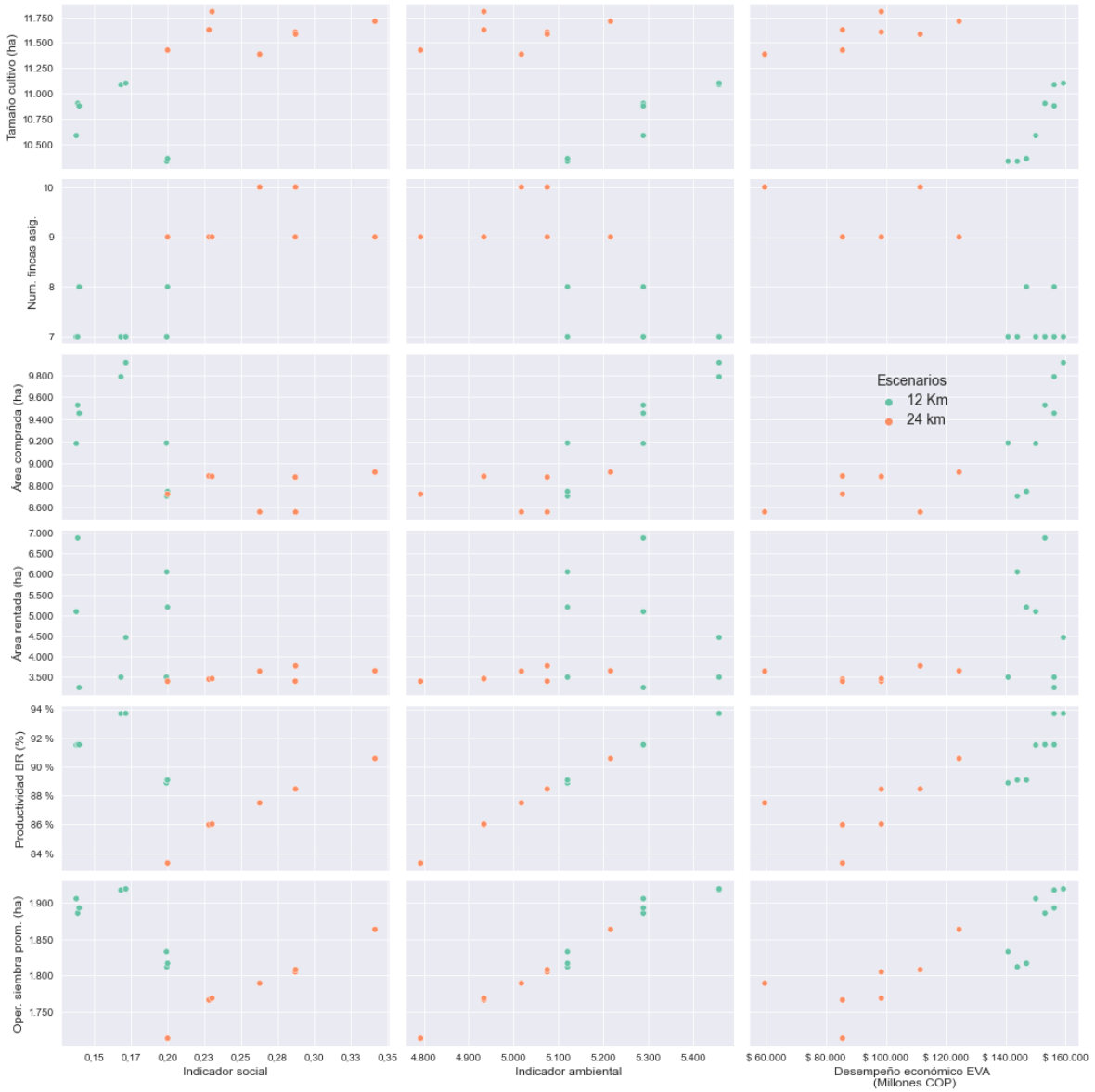
Fuente: Elaboración propia.

- En el escenario de corta distancia entra las fincas y la BR, existe una relación positiva entre el incremento del tamaño del cultivo con el rendimiento económico y el impacto ambiental; sin embargo, dicha relación es inversa respecto a la dimensión social. Por otro lado, en el escenario de mayor distancia, el tamaño del cultivo se percibe incrementado mientras el desempeño económico y social se ven afectados y, contrariamente, se reducen el impacto ambiental.
- Con relación al número de fincas asignadas, el rango mínimo se encuentra para el escenario de corta distancia, el cual exhibe desempeños ideales para las dimensiones económica y social; por el contrario, presenta el mayor impacto ambiental. Para el caso del escenario de mayor distancia, la cantidad de fincas asignadas se incrementa y se mejora el desempeño

- ambiental, llevándolo a un punto ideal, caso contrario para los demás desempeños.
- Para el escenario de corta distancia se observa que las tierras adquiridas por ambas modalidades (compra y arrendamiento) se incrementan, al mismo tiempo que el desempeño económico y social se mejorara y, contrariamente, el ambiental empeora. Para el caso de larga distancia las compras de tierra se mantienen en niveles bajos, mientras la dimensión social y económica desmejoran, y el impacto ambiental disminuye.
 - Altos niveles de productividad de la BR presentan desempeños económicos y sociales ideales para el escenario de corta distancia; sin embargo, para el ambiental es inversamente proporcional. Para el caso del escenario de mayor distancia, presenta el mínimo impacto, casualmente, y menor productividad. De igual manera, el impacto social se reduce junto con la reducción de la productividad, al igual que se reduce el desempeño económico.
 - El nivel de siembra promedio tiene el mismo comportamiento que la productividad. En ese sentido, con menor distancia promedio, la siembra se incrementa y exhibe buenos desempeño económico y social, pero con el mayor impacto ambiental. Contrariamente, el escenario de mayor distancia minimiza el impacto ambiental y ofrece un buen desempeño desde la perspectiva social. Sin embargo, afecta la viabilidad económica al reducir la siembra promedio.
 - Basado en lo anterior, es posible identificar que el mayor componente de generación de impacto ambiental es la producción de la BR, y que al tener fincas asignadas cercanas a la BR la producción de biocombustibles y la producción de biomasa, aumenta el impacto ambiental, al mismo tiempo que mejora el desempeño económico y social.
 - Al tener fincas cercanas a la BR, se reduce el margen de maniobra para reducir los impactos ambientales y, en consecuencia, se vuelve complejo encontrar una solución que equilibre las tres dimensiones de la sostenibilidad. De manera contraria, una distancia muy larga respecto a la BR puede representar un bajo impacto ambiental, pero no garantiza la factibilidad económica y social.

Figura 3-37 Influencia de la distancia en las decisiones de diseño y gestión de la SBSC y su

desempeño sostenible.



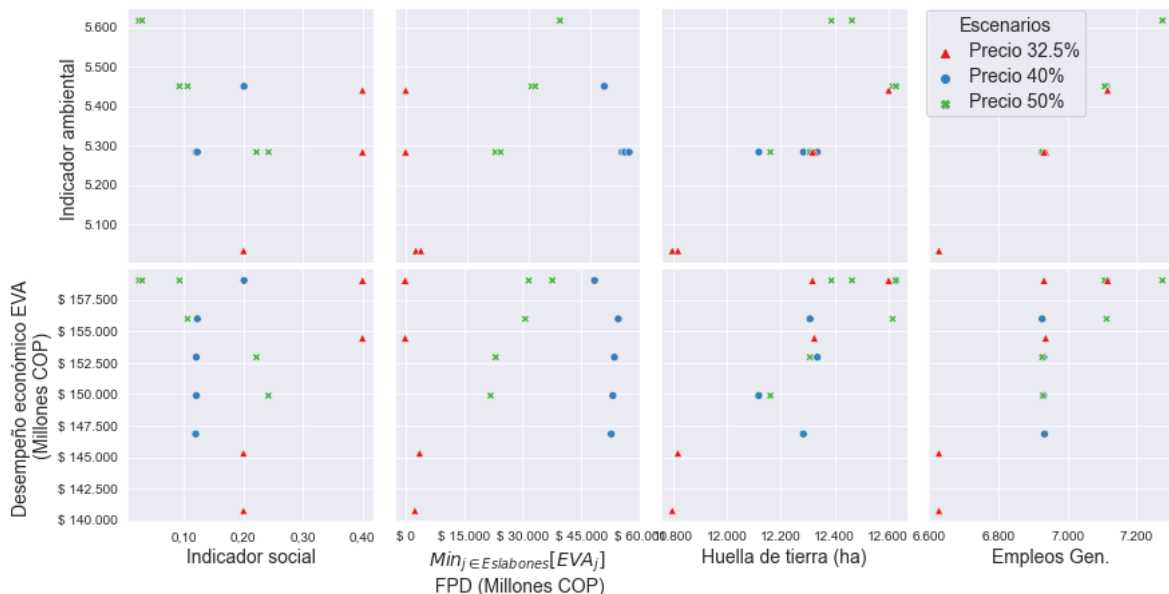
Fuente: Elaboración propia.

3.6.5. Análisis de sensibilidad del precio de caña de azúcar en el desempeño sostenible

El precio de la materia prima es uno de los aspectos importantes en la interacción entre los suministradores y los productores de biocombustibles. El precio es el puente de transferencia de los beneficios económicos obtenido por los cultivadores desde la BR. Además, el precio de caña de azúcar es también la herramienta de negociación entre los cultivadores y la biorefinería. Existen referentes en Colombia sobre el establecimiento de precios de caña de azúcar, los cuales están basados en el porcentaje equivalente de producción (Procaña, 2018). A manera de ejemplo, el precio de caña se fija como el 50% del ingreso, producto de la venta de azúcar blanco producido por tonelada de caña. Otro ejemplo, es la equivalencia con la producción de biocombustible, el cual corresponde al 32.5% de la producción y venta de etanol; por lo tanto, si se asume una tasa de producción de 72.5 litros por tonelada de caña, los cultivadores reciben el equivalente por la venta de 23.56 litros de bioetanol ($23.56/72.5 = 32.5\%$).

Considerando el porcentaje de producción equivalente, se establecieron cuatro niveles para referenciar el precio de caña de azúcar pagado a los agricultores [35%, 40%, 50%, 55%]. En este sentido, se realizó un experimento adicional que permite conocer la influencia del precio de adquisición de la materia prima sobre el desempeño sostenible. En la Figura 3-38 se presentan los resultados de cada una de las dimensiones de sostenibilidad y el indicador social desagregado para cada uno de los escenarios de precio de caña de azúcar en el diseño de la SBSC. En el escenario extremo, precio basado en 55%, no se incluyen debido a que sus resultados fueron infactibles, pues algunos de los eslabones presentan un desempeño negativo.

Figura 3-38 Influencia del precio de caña en el desempeño sostenible. Desagregando el desempeño social



Fuente: Elaboración propia.

Entre los resultados es posible ver desempeños indeseables, en términos económicos y sociales, los cuales corresponden al escenario de precio de caña de azúcar basado en el porcentaje 32.5%; sin embargo, este escenario presenta el mejor desempeño a nivel ambiental. Por otro lado, el escenario

del precio basado en el 50%, presenta el mejor desempeño a nivel económico y social, en una misma solución; sin embargo, exhibe el mayor impacto ambiental. Por otro lado, el escenario basado en el precio de 40% tiene desempeños de muy buena calidad en términos económicos y sociales, y no presenta impactos ambientales de medio rango. En términos generales, este último escenario genera un balance entre las dimensiones del desarrollo sostenible, evidenciando el efecto directo que tiene el precio de comercialización de caña de azúcar sobre el diseño y la gestión de la SBSC, desde la perspectiva de sostenibilidad.

En la Figura 3-38 se identifican resultados relevantes para la toma de decisiones, entre los cuales están:

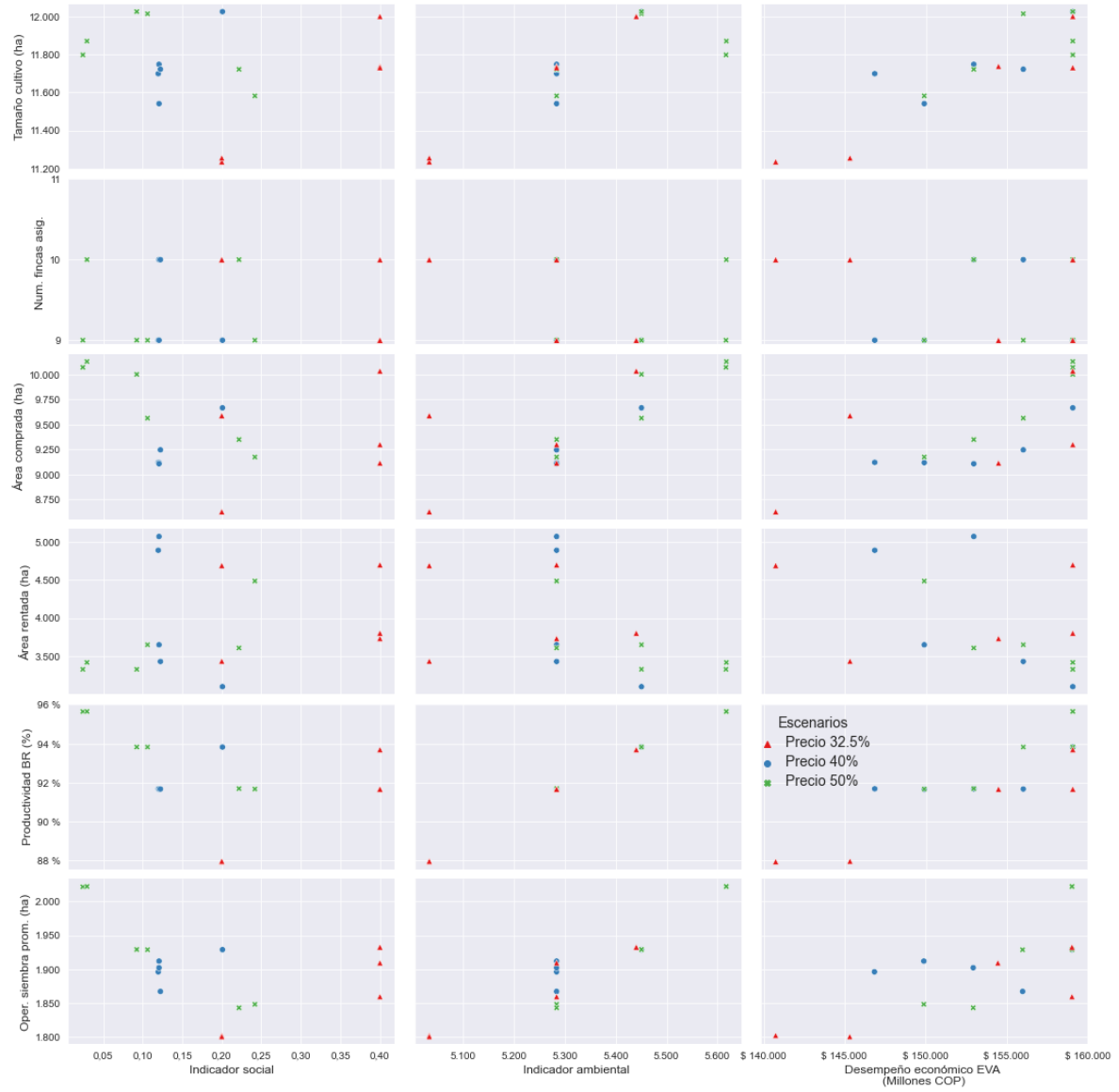
- El escenario con el precio de caña basado en 32,5% presenta las soluciones con mayor variabilidad en la distribución de los beneficios económicos, ubicando a los cultivadores de caña de azúcar en una posición de desventaja y de inferioridad respecto a la BR.
- El escenario con el precio basado en el 50% mejora los niveles de distribución de beneficios económicos, comparado con el de 32,5%, pero el escenario de 40% optimiza la distribución justa de los beneficios económicos, aunque sacrifica ligeramente el desempeño económico para mejorar los impactos ambientales.
- Respecto a la huella de tierra, este indicador es optimizado en el escenario basado en el precio de 32,5%, coincidiendo con las soluciones que minimizan los impactos ambientales, aunque la dimensión económica es la de menor desempeño. Los demás escenarios presentan soluciones de medio y alto rango, aunque se encuentran soluciones que balancean la dimensión económica y ambiental.
- Con relación a la generación de empleo, el escenario con precio de 32,5% tiene soluciones en el rango indeseables, el de 40% tiene soluciones en el rango medio, y el de 50% optimiza este indicador. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, los resultados son opuestos, evidenciando la existencia de un conflicto entre este par de indicadores. A manera de ejemplo, al incrementar la cantidad de puestos de trabajo generados, el impacto ambiental se incrementa proporcionalmente.

Los resultados de la Figura 3-38 también permiten evidenciar la influencia del precio de caña de azúcar frente a los desempeños de las dimensiones de la sostenibilidad. Sin embargo, no permite conocer cuál es el impacto con relación a las variables que caracterizan el diseño de la SBSC y de la gestión de operaciones que se llevan a cabo en cada uno de los escenarios evaluados. En ese sentido, la Figura 3-39 presenta la relación entre las múltiples características del diseño y gestión de la SBSC y las dimensiones de TLB para los escenarios evaluados. En los resultados se pueden evidenciar los siguientes aspectos.

- El escenario de precio de caña de azúcar basado en el 32,5% reduce el impacto ambiental, mientras reduce el tamaño del cultivo. Este mismo efecto ocurre con el desempeño económico. A medida que el tamaño del cultivo, el impacto ambiental se incrementa. Por otro lado, el desempeño social presenta soluciones de muy buena calidad, para los escenarios basados en el precio de 50% y 40%, con un nivel alto medio y alto del cultivo. Sin embargo, para el caso del escenario de bajo precio de caña, el desempeño social es de muy mala calidad para regímenes altos de cultivo.
- Los diferentes escenarios de precio de caña no afectan de manera significativa la cantidad de fincas asignadas, dado que su oscilación se establece entre 9 y 10 fincas, sin ninguna tendencia en los resultados.

- Respecto a la compra de predios, se identifica una tendencia sobre el escenario de mayor precio de caña de azúcar, en el sentido que, a mayor nivel de compra se obtiene un resultado favorable respecto al indicador social y económico. De igual manera, presenta el mayor nivel de impacto ambiental. En sentido contrario, a medida que la cantidad de predios se reduce, los impactos ambientales se reducen, pero a costas del desempeño económico y social. Este mismo fenómeno se mantiene para el escenario de precio medio, 40%, pero para las dimensiones económica y ambiental; dado que, en la dimensión social, el desempeño mejora con niveles bajos de compra de tierras, y se reduce con niveles más altos. Para el escenario de menor precio, el indicador social presenta alta variabilidad en el desempeño y cantidad de tierra comprada, sin una tendencia o relación definida, en las dimensiones social y ambiental, aunque para el componente económico se sigue el patrón de: a mayor adquisición, mayor desempeño económico.
- La cantidad de predios arrendados tiene un efecto contrario respecto a la cantidad de predios comprados. En ese sentido, niveles bajos de arriendo de tierras coincide con buenos rendimientos a nivel económico y social; de manera contraria, con el incremento de predios rentados desempeños económico y ambiental pierden calidad. Sin embargo, en la dimensión ambiental, no se presenta un patrón generalizado, aunque se puede observar una tendencia, para los escenarios de precio medio y alto, que al reducir el área arrendada se incrementa el impacto ambiental.
- Uno de los indicadores de la gestión de operaciones que tiene una relación directamente con el desempeño sostenible es el nivel de producción de la BR, el cual es consistente para todos los escenarios evaluados. Por consiguiente, niveles altos de producción coinciden con el mejor desempeño económico, y a medida que la productividad disminuye, este desempeño también. De igual manera ocurre con el desempeño social, el cual, en su posición óptima, presentan niveles altos de productividad en la BR. De manera contraria y proporcional, escenarios con alto impacto ambiental presentan altos niveles de productividad en la BR, y se reducen de manera proporcional ambas variables.
- El área de siembra anual promedio tiene el mismo nivel de incidencia en las dimensiones del desempeño sostenible que la productividad de la BR, aunque con un nivel mayor de variabilidad. Se percibe la relación directa entre un mayor nivel de siembra y desempeños económicos y sociales ideales, mientras que, de manera contraria, existe un alto nivel de impacto ambiental.
- Basados en las anteriores observaciones, es posible afirmar que el escenario basado en el precio de 50% ofrece el mejor impacto social. El escenario basado en un precio de caña del 32.5% ofrece un mejor desempeño desde el punto de vista ambiental, con el agravante de posicionar el desempeño social en niveles indeseados. Finalmente, los escenarios de precio de 40%, ofrecen desempeños que equilibran las dimensiones de la sostenibilidad.

Figura 3-39 Influencia del precio de caña de azúcar en las decisiones de diseño y gestión de la SBSC y su desempeño sostenible



Fuente: Elaboración propia.

3.7. Discusión de los resultados

Durante el desarrollo de esta tesis doctoral se ha trabajado alrededor de los elementos constitutivos de la situación problemática expuesta, sobre tres ejes fundamentales: cadena de abastecimiento, fuentes de incertidumbre y desempeño sostenible, los cuales se han abordado de manera conjunta con el fin de ampliar el conocimiento respecto al diseño y gestión de operaciones de las cadenas de abastecimiento de biocombustibles a partir de caña de azúcar. Con base en el estado del arte fue posible identificar las decisiones estrategias y tácticas involucradas en el diseño y gestión de operaciones en la SBSC y, principalmente, las oportunidades de investigación en este campo. De igual manera, se pudieron reconocer múltiples enfoques sobre la medición del desempeño desde la perspectiva sostenible, diversas fuentes de incertidumbre que afectan la cadena, así como detección de variados retos, en términos de modelamiento, complejidad computacional y el estado de avance de la investigación científica en el campo de las SBSC. Atendiendo a lo anterior, es posible evidenciar el cumplimiento del primer objetivo planteado, el cual se relaciona con la identificación del estado del arte y la derivación de su respectivo vacío de conocimiento.

Sobre el modelamiento matemático y su solución

Uno de los principales aportes de esta investigación corresponde a la representación de la situación problemática por medio de un enfoque de investigación de operaciones. En ese sentido, durante la fase de formulación, se presentan dos partes: la primera, presenta el enfoque conceptual en el cual se establece el alcance de los modelos matemáticos propuestos, el proceso de acercamiento y observación del objeto de estudio, y la posibilidad de experimentación. La segunda, corresponde a la construcción y descripción detallada de los modelos matemáticos. Los aportes más destacados de la etapa de modelación son los siguientes:

- El modelamiento de las condiciones climáticas, como una fuente de incertidumbre que tiene un efecto directo en el rendimiento de los cultivos de caña de azúcar, al igual que en la duración de la temporada de cosecha.
- La vinculación de las decisiones de la BR junto con las operaciones del eslabón agrícola en un horizonte de planificación de largo plazo.
- La evaluación del desempeño económico desde múltiples perspectivas decantando en el EVA como una de las medidas de desempeño que favorece la sostenibilidad de toda la cadena en el largo plazo.
- La importancia de modelar a los actores del eslabón suministrador de manera independiente, estableciendo las interconexiones entre los actores de ambos eslabones (fincas y BR) bajo un enfoque integrador de diseño.
- La consideración de las dimensiones de la sostenibilidad como medida de desempeño para el diseño de la SBSC, profundizando en los indicadores con el fin de abarcar de manera holística los múltiples aspectos implícitos en las dimensiones económica, ambiental y social.
- La identificación de varios niveles de granularidad del modelamiento matemático y su impacto sobre el alcance de las decisiones, así como el enfoque de medición de los intereses de los actores de la SBSC.

Una de las dimensiones de la sostenibilidad en la que más se logró realizar aportes al conocimiento, fue en la social. El modelo propuesto permite establecer las decisiones de los actores de forma independiente, por lo que es posible medir su desempeño, en aspectos que trascienden más allá que la creación de puestos de trabajo. La dimensión ambiental es abordada por medio de la

metodología *LCA* para cinco categorías de impacto ambiental, el cual es ocasionado por cuatro de las operaciones, más representativas de la SBSC. La valoración de impactos se realizó usando el método ReCiPe2016 (impactos de punto intermedio), así como, los factores de ponderación (medición de punto final) de cada categoría.

Los modelos de programación estocástica propuestos incluyen la utilización de una cadena de Markov de tiempo discreto con el fin de reducir la complejidad en la generación de escenarios representativos del sistema real, al modelar de manera conjunta múltiples variables aleatorias durante el horizonte de planificación. Por otro lado, otra estrategia de reducción de complejidad es la propuesta del modelo MA-MAB, en el cual se hace una abstracción adicional sobre el horizonte de planificación. Por lo tanto, se obtuvo una reducción de la dimensión y complejidad computacional del modelo, ofreciendo resultados equivalentes al modelo desagregado en los periodos de tiempo. En consecuencia, las soluciones óptimas pueden ser obtenidas en tiempos prudenciales, ayudando a la reducción total del tiempo de ejecución. Lo anterior es relevante en el sentido que el enfoque de sostenibilidad involucra un enfoque de solución multi-objetivo, para el cual se requiere resolver el modelo de PL en múltiples ocasiones para derivar la frontera de soluciones equilibradas.

Teniendo en cuenta la fase de formulación del modelo matemático y la estrategia para solucionar los problemas propuestos, previamente descrita, es posible afirmar que, los objetivos específicos 2 y 3, relacionados con el modelamiento matemático de la situación problemática y su estrategia de solución, respectivamente, han sido cumplidos por medio de la formulación de un modelo conceptual, un conjunto de modelos matemáticos y una estrategia de solución que ofrece un diseño óptimo de la SBSC.

Sobre el caso de estudio y resultados

El caso de estudio, posee todas las características de la situación problemática, involucrando sus elementos y la interacción entre ellos. Los modelos matemáticos se validan luego de la aplicación al caso de estudio y la comparación con el sistema real, logrando demostrar representatividad y generalización de los resultados (Oliveira et al., 2016; Govindan et al., 2017). Los 5 modelos propuestos se construyeron de forma tal, que cada uno involucra al anterior, con el fin de ir abarcando decisiones de toda la SBSC, al igual que aumentando el nivel de detalle y la refinación de la medición del desempeño.

En ese sentido, el modelo MAg involucra un conjunto de decisiones estratégicas y tácticas del eslabón agrícola en interacción con las decisiones de la BR bajo los efectos de la incertidumbre de las condiciones climáticas. Los resultados de este modelo permitieron la validación por medio de la contrastación con el sistema real, logrando predecir el comportamiento de los costos de operación, el rendimiento de los cultivos y el plan de desarrollo agrícola a mediano y largo plazo. Además, el modelo permite identificar la estructura general del componente agrícola en torno a: la dimensión del tamaño del cultivo, la cantidad de tierras a adquirir, la gestión óptima de las operaciones de siembra, cosecha y transporte de caña, así como el nivel de suministro para la biorefinería, sujetos a la ventana de tiempo que ofrece la temporada de cosecha. Por otro lado, este modelo permitió identificar factores que inciden en la factibilidad económica del eslabón agrícola, entre ellos se destacan aspectos endógenos, tales como el retraso de la construcción de la BR, la adaptabilidad de cultivo, disponibilidad de maquinaria agrícola; y otros factores de carácter exógeno, como el precio de adquisición de tierras y el precio de comercialización de la caña de azúcar

En la literatura especializada no se encontraron resultados similares a los obtenidos con el MAg. Aunque en los trabajos propuestos por Florentino et al. (2018, 2020) se involucran la incidencia del periodo de siembra, fecha de maduración de la caña, periodo de cosecha y selección de variedad, el horizonte de planificación solo se extiende al corto y mediano plazo, sin considerar el efecto de los ciclos de renovación, la producción de semilla, y las afectaciones por cuenta de las fuentes de incertidumbre. Desde un punto de vista general, Colin (2009) estudió los ciclos de vida de la caña de azúcar en la producción de la BR y la incidencia en el desempeño económico; sin embargo, por medio del MAg se expande dicho análisis incluyendo las fuentes de incertidumbre, la duración de la temporada de cosecha, los costos e ingresos de la operación y la producción de semilla para el desarrollo de los cultivos. En ese sentido, el MAg contribuye a la literatura de las ASC de la caña de azúcar no solo desde el enfoque de modelamiento, son también desde la identificación de aspectos relevantes que inciden en el diseño y gestión de operaciones de la cadena.

Seguidamente, los modelos MABV y MABE permiten evidenciar que es imperativo el modelamiento del flujo de caja, la estrategia de financiación de inversiones y el control del patrimonio en el proceso de valorización económica. Mediante la comparación entre los desempeños económicos de los modelos se logró encontrar que el modelo MABE ofrecía una mayor robustez, en términos financieros para los accionistas; también se hallaron diferencias significativas en el diseño de la cadena de abastecimiento las cuales exigían menores esfuerzos de capital, y en general, ofrecía una planificación más eficiente en la gestión de los costos e inversión.

A pesar que se lograron identificar algunos trabajos en el campo de las SBSC que involucran aspectos de inversión (Kostin et al., 2010, 2011; Mele et al., 2011; Kostin et al., 2012), estos no tuvieron en cuenta las decisiones del componente agrícola, ni las decisiones de financiación de los costos de operación e inversión. Por lo tanto, el modelo MABE refuerza la contribución de esta tesis doctoral en términos de presentar un enfoque de modelación de la estructura financiera de las SBSC con el fin de garantizar una diseño y operación de la cadena que sea sostenible desde la perspectiva económica en el largo plazo, bajo condiciones de incertidumbre.

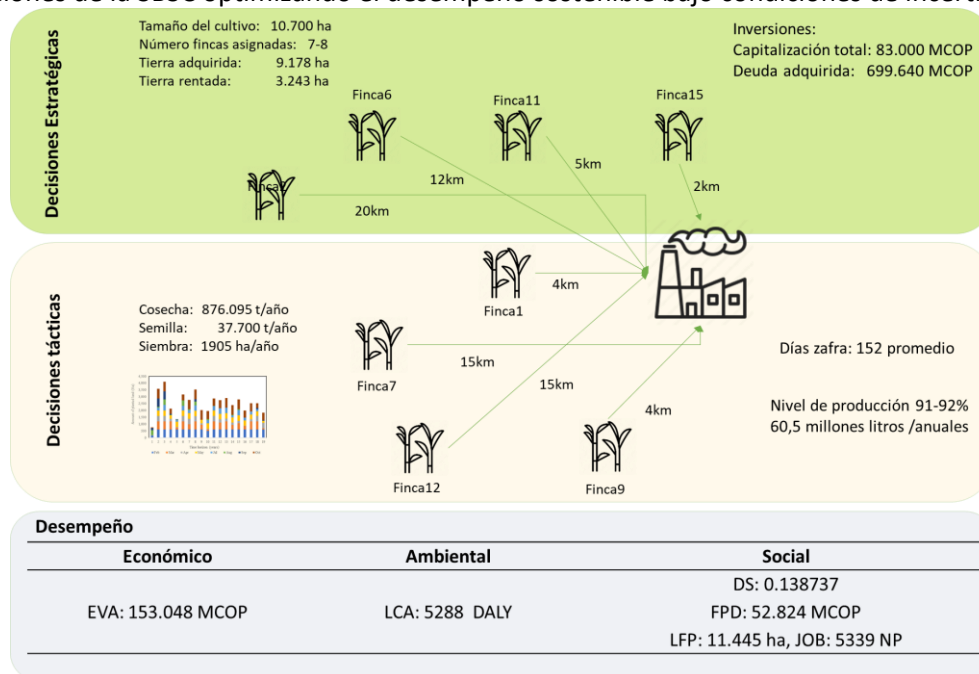
Dado que se detectó que el eslabón agrícola se encontraba en desventaja económica respecto a la BR, el modelo M-MAB permite modelar los intereses individuales de cada actor y su desempeño. El M-MAB involucra a cada una de las fincas y a la BR, junto con sus características propias. No obstante, este modelo presentó problemas de dimensión y de complejidad computacional para obtener una solución. Sin embargo, al diseñar el modelo MA-MAB, se logra una abstracción de los periodos de tiempos durante el horizonte de planeación, garantizando una equivalencia de los resultados, en términos del desempeño económico, con el modelo M-MAB.

El enfoque de modelamiento utilizado en el MA-MAB permitió la medición del desempeño sostenible desde una perspectiva más amplia. En el proceso de evaluación de la sostenibilidad de los diseños de la SBSC, es posible hallar un conjunto de resultados que representa una gran contribución a la literatura. El modelo MA-MAB fue sometido a las tres dimensiones de la sostenibilidad, de manera simultánea. Se utilizó la técnica ϵ -restricciones y los resultados muestran desempeños tanto extremos, como balanceados. Se ratificó que tanto el desempeño ambiental y el social, se encuentran en conflicto, al ser enfrentados con el desempeño económico. De igual manera, el desempeño ambiental y social tienen la misma dirección de optimización, aunque algunos valores extremos coinciden, es necesario el balance entre los indicadores. Seguidamente, se logró detectar un conjunto de soluciones balanceadas que median entre los tres desempeños del desarrollo sostenible.

Sin embargo, al observar más de cerca las categorías del impacto social frente a los desempeños económico y ambiental, se puede observar que las soluciones balanceadas ofrecen resultados de muy buena calidad en términos de la huella de tierra y la distribución de los beneficios entre el par de eslabones. Sin embargo, respecto a la generación de puestos de trabajo, no se obtienen soluciones con buen desempeño. La generación de puestos de trabajo exhibe su mejor desempeño cuando hay buenos resultados económicos; sin embargo, esto contribuye de forma negativa al desempeño ambiental. Los resultados obtenidos se alinean respecto a otros encontrados en la literatura. A manera de ejemplo, para los trabajos descritos en Santibañez-Aguilar et al. (2014); Mota et al. (2015); Fathollahi-Fard et al. (2018); Morales Chavez et al. (2020), el indicador social (creación de puestos de trabajo) se ha comportado de forma conflictiva respecto al indicador económico.

Con todo lo anterior, los modelos propuestos permiten al decisor encontrar la combinación de decisiones estratégicas y tácticas en el diseño y gestión de operaciones de la SBSC para una instancia del caso de estudio. A manera de ejemplo, en la Figura 3-40 se presentan los resultados para una instancia compuesta por un potencial de 30 fincas distribuidas de manera aleatoria alrededor de la BR, con una distancia promedio de 15 km, un horizonte de planeación de 20 años, y un conjunto de 30 escenarios. Se puede observar que entre 7 y 8 fincas fueron asignadas para el suministro de biomasa, representando un cultivo máximo de 10.700 has. Dichas tierras consideran una estrategia de adquisición por compra de 9 mil hectáreas y otras 3.200 has en modalidad de arrendamiento, sirviendo de stock de seguridad (en términos del cultivo) durante diferentes periodos en el horizonte de planeación.

Figura 3-40 Combinación de decisiones estratégicas y tácticas en el diseño y gestión de operaciones de la SBSC optimizando el desempeño sostenible bajo condiciones de incertidumbre.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se observan las decisiones de cobertura de las inversiones, destacándose el alto nivel de endeudamiento, la baja capitalización, pero la alta rentabilidad para los inversionistas. De

manera simultánea, se pueden observar los rendimientos promedio de las operaciones del eslabón agrícola (producción de caña, semilla y siembra de cultivos) y de la BR (nivel de producción, millones de litros anuales), así como los días de operación promedio producto de la afectación por la incertidumbre de las condiciones climáticas y por la operación de la SBSC. Finalmente, es posible visualizar el resultado de los desempeños de las dimensiones de la sostenibilidad.

Aunque en la Figura 3-40 muestre resultados agregados, la demanda de biocombustibles, junto con la capacidad procesamiento de la BR y la duración de la temporada de cosecha (fuente de incertidumbre), generan las condiciones y limitaciones que despliegan la combinación de decisiones estratégicas y tácticas de la SBSC. Inicialmente, se establecen la dimensión del cultivo, y la estrategia de adquisición de predios, seguido el establecimiento del cultivo de caña, la producción de semilla y paralelamente, la construcción de la BR. Seguidamente, se encuentra la fase de operación, en la cual las actividades de cosecha de biomasa y producción de biocombustibles se realizan de manera sincronizada. Por un lado, considerando la ventana de tiempo de la temporada de cosecha y la disponibilidad de cultivos maduros. Por otro lado, las actividades de siembra continúan de forma tal que el cultivo no pierda productividad el cumplimiento de ciclos de vida y por envejecimiento, en las múltiples fincas asignadas. Todas las inversiones y operaciones son ejecutadas teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos económicos, identificando los periodos de capitalización y endeudamiento adecuados, con el fin de garantizar la sostenibilidad financiera en el largo plazo. Todo el conjunto de decisiones antes descrito es liderado por la optimización del desempeño sostenible en sus dimensiones.

Luego de recapitular los resultados de los modelos se evidencia que la información obtenida es suficiente para dar cumplimiento al sistema de objetivos específicos propuestos, con los cuales se llena el vacío de conocimiento identificado, aunque parcialmente, dado que existen muchas oportunidades de investigación, las cuales ameritan mayor profundidad y un enfoque multidisciplinario en los estudios. Adicionalmente, con la utilización del caso de estudio fue posible evaluar la efectividad de los modelos propuestos, identificar los factores relevantes que inciden en el diseño y operación de la cadena, así como proponer un marco de evaluación de potenciales zonas de expansión agrícola en Colombia. En ese sentido, también se logró recolectar la información suficiente para comprobar la hipótesis de investigación planteada, es decir que, los modelos propuestos permiten obtener la combinación de decisiones de diseño y gestión de operaciones de la cadena de abastecimiento de los biocombustibles a partir de la caña de azúcar, bajo condiciones de incertidumbre, considerando al desempeño sostenible como medida de rendimiento. Por tanto, es posible afirmar que con los resultados obtenidos se pudo dar solución al problema científico y comprobar la hipótesis de investigación propuesta en esta tesis doctoral.

3.8. Conclusiones Parciales

Este capítulo presenta los resultados obtenidos luego de la aplicación de los modelos propuestos sobre el caso de estudio y sus respectivos análisis de sensibilidad. La articulación de diferentes fases de modelamiento matemático, a nivel estratégico y táctico, permitió conocer el desempeño del sistema en sus dimensiones económicas, sociales y ambientales. También, identificar factores relevantes que deben ser tenidos en cuenta al momento de diseñar una cadena de abastecimiento de biocombustibles a partir de la caña de azúcar considerando el desempeño sostenible. Dos enfoques de modelamiento fueron probados. El primero considera el diseño de la cadena de abastecimiento desde la perspectiva centralizada, en el cual los ingresos y costos son compartidos por ambos eslabones (eslabón agrícola y eslabón de producción). El segundo considera los eslabones de manera independiente y la relación entre los diferentes actores, lográndose demostrar la equivalencia de los modelos respecto a los resultados, y también, una reducción sustancial de la complejidad computacional. Tomando como base el MA-MAB se implementó la evaluación del caso de estudio con relación al desempeño sostenible. Por consiguiente, las conclusiones parciales más relevantes son las siguientes:

- (1) Con base en la aplicación de los modelos propuestos al caso de estudio, se derivaron soluciones respecto a la combinación de decisiones estratégicas y tácticas en el diseño y gestión de operaciones de la SBSC, considerando el eslabón agrícola y la biorefinería. Se tuvieron en cuenta las afectaciones de las fuentes de incertidumbre de las condiciones climáticas; así como la optimización del desempeño sostenible, en sus dimensiones económicas, ambientales y sociales. En ese sentido, se encontraron soluciones robustas en términos de diseño frente a los diferentes cambios del entorno. Por lo tanto, los resultados obtenidos permiten integrar los tres elementos identificados en la situación problemática, evidenciando el cumplimiento de los objetivos específicos planteados, y contribuyendo al estado del arte con el modelo propuesto y con la identificación de factores relevantes que influyen en el diseño de la SBSC desde el punto de vista de la vinculación de las operaciones agrícolas bajo la influencia de condiciones de incertidumbre.
- (2) La propuesta de múltiples modelos matemáticos permitió identificar los retos a nivel de complejidad a medida que se iba detallando la situación problemática y abarcando el alcance del estudio. En ese sentido, la utilización de la cadena de Markov para generación de escenarios y la abstracción de los periodos del horizonte de planeación, permitieron dar un manejo adecuado a la complejidad computacional, garantizando la precisión de los resultados y a la obtención de soluciones óptimas en tiempos prudenciales. En ese sentido, la estrategia de modelamiento y solución contribuye a la comprobación de la hipótesis de investigación al controlar la complejidad computacional intrínseca en la SBSC y al considerar fuentes de incertidumbre. Por otro lado, este modelo contribuye al estado del arte, ofreciendo una estrategia de modelamiento en el campo de la programación estocástica de dos etapas basados simulación de escenarios, por medio de las cadenas de Markov.
- (3) Los análisis de sensibilidad conducidos por medio de los modelos MAg y MA-MAB permitieron la identificación de aspectos relevantes que deben ser tenidos en cuenta en el diseño y gestión de las operaciones de la SBSC. La curva de adaptabilidad de los cultivos durante el horizonte de planeación, el retraso en la construcción de la BR, la cantidad de maquinaria agrícola considerada (para siembra y cosecha), el precio de adquisición de la tierra, la distancia entre las fincas y la BR, y el precio de la caña de azúcar. Este último analizado desde la perspectiva

exógena de la dinámica del precio del biocombustible; y desde la perspectiva endógena, relacionado con el mecanismo de fijación de precio de la caña de azúcar entre la BR y las fincas.

- (4) Por medio de los modelos MAg, MABE y MABV se pudo establecer la combinación de decisiones estratégicas y tácticas en el diseño y gestión de la SBSC bajo condiciones de incertidumbre, al igual que refinar la evaluación del desempeño económico. En ese sentido, se identificó que el valor económico agregado (EVA) permite medir el desempeño de la cadena y garantizar la su sostenibilidad financiera en el largo plazo. De manera complementaria, el modelo MA-MAB permitió la optimización del diseño y gestión de la SBSC desde las tres dimensiones del desempeño sostenible, enfrentando la complejidad computacional de abordar las decisiones de cada uno de los actores de manera independiente, así como su interconexión. En ese sentido, la aplicación de los modelos propuestos al caso de estudio reunió la evidencia suficiente para resolver el problema científico y comprobar la hipótesis de investigación propuesta
- (5) Finalmente, la contribución de esta tesis es posible evidenciarla desde tres perspectivas. La primera respecto a los aspectos de modelamiento de la SBSC, involucrando a múltiples actores de manera independiente, así como su interacción, con el fin de diseñar la cadena y gestionar las operaciones de manera sincronizada. Por otro lado, desde el punto de vista metodológico, el MA-MAB propone un procedimiento de evaluación del desempeño social que involucra a la programación compromiso. Esto con el fin de establecer niveles de importancia para los indicadores sociales, y además como estrategia de estandarización, al minimizar la máxima desviación de cada indicador frente a sus límites ideales. Finalmente, las implicaciones a nivel práctico en el campo específico de la industria de la caña de azúcar y de los biocombustibles, para lo cual se logró evidenciar factores externos que inciden en el desempeño de la SBSC, y resultados del diseño de la cadena que favorecen o no, a la reducción de los impactos ambientales, al igual que las repercusiones a las diversas comunidades involucradas.

4. Conclusiones finales y recomendaciones

En esta sección, se introducen inicialmente conclusiones generales de esta tesis doctoral, retomando la relevancia de los resultados obtenidos, su valor e importancia teórica, metodológica y práctica. De igual manera, se discute cómo los resultados obtenidos son utilizados para la comprobación de la hipótesis de investigación planteada. Dado que en cada uno de los capítulos se han mencionado las conclusiones parciales, éstas son sintetizadas y organizadas de manera sistemática. Además, se identifican las limitaciones del estudio y, en ese sentido, se proyectan un conjunto de recomendaciones que pueden ser utilizadas como líneas futuras de investigación. Por último, las contribuciones sintetizadas en productos de divulgación científica derivadas de la realización de esta tesis.

4.1. Conclusiones finales

Durante el desarrollo de esta investigación doctoral se abordó el diseño y gestión de las operaciones de la SBSC desde la perspectiva sostenible teniendo en cuenta fuentes de incertidumbre, un problema recurrente en la sociedad actual, debido a que la producción de biocombustibles es considerada una de las principales estrategias para combatir el calentamiento global. La conceptualización de este tipo de problemáticas relaciona la producción de biocombustibles con la operación agrícola necesaria para la producción de biomasa. En ese sentido, se logró establecer la conexión entre las ASC de la caña de azúcar y las BSC, destacando que el diseño y planeación de operaciones de la cadena de abastecimiento deben involucrar el eslabón agrícola y a la biorefinería de manera simultánea. Sin embargo, el estado del arte revela que esta vinculación no ha sido estudiada de manera integrada en la literatura especializada, especialmente al considerar fuentes de incertidumbre, particularmente por aquellas generadas por las condiciones climáticas. Otro aspecto que no ha sido bien estudiado corresponde al criterio de sostenibilidad como medida de desempeño para evaluar el diseño de la SBSC que, al adherirse a la situación problemática estudiada, configura un vacío de conocimiento sobre el cual esta tesis doctoral realiza su principal contribución. Con base en lo anterior, es posible afirmar que el objetivo propuesto, relacionado con la construcción del marco teórico alrededor de la pregunta de investigación planteada, ha sido cumplido.

A través del enfoque metodológico de la investigación de operaciones, se propuso un modelo conceptual que enmarca las operaciones estratégicas y tácticas de la SBSC, estableciendo un alcance del estudio sobre el eslabón agrícola y la biorefinería. De esta manera se logró evidenciar la conexidad entre las actividades agrícolas, de las cuales depende el rendimiento de la biomasa, las operaciones de transporte, y procesamiento en la biorefinería; además, se estableció la importancia de abordar las condiciones climáticas como fuente de incertidumbre, la cual afecta transversalmente los procesos de planificación de la cadena, al incidir en la duración de la temporada de cosecha y el rendimiento de los cultivos. Respecto al proceso de modelación matemática, la combinación de decisiones estratégicas y tácticas en el diseño y gestión de operaciones de la SBSC deben estudiarse de manera conjunta, dado que las actividades de inversión, las operaciones de producción de semilla, la siembra y la cosecha, inciden en la operación de suministro y el procesamiento en la biorefinería; y a su vez, la biorefinería incide en el dimensionamiento del eslabón agrícola.

Del proceso de modelación también se identificó la complejidad de los modelos, debido a la combinación de decisiones, la modelación de la incertidumbre y la naturaleza multi-objetivo y multi-periodo de optimizar el desempeño sostenible. En ese sentido, dos estrategias fueron implementadas con el fin de dar tratamiento a la dimensión y complejidad computacional resultante en instancias reales del caso de estudio. En ese sentido, los modelos contribuyen al estado del arte desde el punto de vista teórico al campo de las SBSC, y de forma metodológica al campo de la sostenibilidad social, al incorporar una metodología de medición multidimensional basadas en el social-LCA, así como al campo de la optimización estocástica basado en escenarios, entre otras.

A través de la aplicación de los modelos al caso de estudio se logró la definición del valor económico agregado como medida de desempeño que ofrece una sostenibilidad financiera de la SBSC. En ese sentido, se obtuvo un modelo robustecido que incorpora la medición del desempeño individual de los miembros de la cadena, al mismo tiempo que optimiza el desempeño sostenible en el diseño de la SBSC desde un punto de vista centralizado sincronizando las decisiones de los actores. Con los modelos propuestos y su metodología de solución, y los resultados obtenidos se da cumplimiento a los objetivos planteados, con relación a la identificación de todos los elementos que componen el proceso de modelación; la derivación de una estrategia de solución que de manejo a la complejidad computacional; así como la validación mediante la aplicación a un caso de estudio.

Por otro lado, con los resultados de la aplicación del modelo MA-MAB al caso de estudio fue posible encontrar la combinación de decisiones estratégicas y tácticas del proceso de diseño y gestión de operaciones de la SBSC, considerando el eslabón agrícola y la biorefinería, las condiciones climáticas como fuente de incertidumbre y optimizando el desempeño sostenible en sus tres dimensiones, económica, ambiental y social. Adicionalmente, por medio de un proceso de experimentación sobre los modelos, fue posible identificar un conjunto de factores, tanto endógenos como exógenos, que inciden en el proceso de diseño de la SBSC. Entre los factores más relevantes están: el retraso de construcción de la biorefinería, la adaptabilidad del cultivo, el precio de comercialización de la caña de azúcar y la distancia entre las fincas y la biorefinería. Al reunir estos dos aspectos previos, la obtención de una solución al problema científico, y la identificación de los factores relevantes en el proceso de planificación estratégica de la SBSC, es posible afirmar que se reunió la suficiente evidencia para comprobar la hipótesis de investigación, al igual que se puede dar cumplimiento a todo el sistema de objetivos propuestos en esta tesis doctoral.

Adicionalmente, esta tesis doctoral generó un conjunto de contribuciones al estado del arte desde múltiples perspectivas. La primera con la derivación de un vacío de conocimiento en el campo de las SBSC, el cual permitió la identificación de la situación problemática como un problema científico que requiere ser solucionado. De igual forma, se contribuye con un enfoque de modelación matemática que integra las decisiones de la SBSC de manera vertical y horizontal, vinculando las operaciones agrícolas de manera sincronizada con las operaciones industriales, así como sus requerimientos de inversión. Desde la perspectiva metodológica se contribuye con la propuesta de un enfoque de programación estocástico basado en escenarios, por medio de la implementación de cadenas de Markov para la obtención de un conjunto reducido de escenarios representativos de las condiciones de incertidumbre. En esa misma línea, se involucró una metodología de modelación del desempeño social con múltiples dimensiones de afectación a las comunidades involucradas en la SBSC. Por otro lado, desde el punto de vista de la contribución práctica, se identificó un conjunto de factores relevantes que inciden en el diseño de la SBSC.

Como se esbozó en la identificación del estado del arte alrededor de la SBSC, aspectos como la

integración de decisiones en la cadena, las condiciones climáticas como fuente de incertidumbre, la consideración de las decisiones agrícolas en la evaluación ambiental, la evaluación social multidimensional, son reconocidas como los principales *gaps* de la literatura. Ese sentido, esta tesis doctoral ha generado un conjunto de contribuciones alineadas fielmente con los vacíos de conocimiento declarados, generando aportaciones teóricas, metodológicas y prácticas; estas últimas enfocadas en la evaluación de proyectos de inversión en las nuevas zonas de expansión agrícola. Finalmente, dado que el problema planteado nace desde las necesidades de la empresa privada para valorar la expansión de la industria de biocombustibles en el país, el aporte a la planificación de operaciones y las recomendaciones estratégicas identificadas, les permiten a las empresas públicas y privadas mitigar sus riesgos, operativos y financieros; así como a los órganos de control, una herramienta de evaluación de la sostenibilidad de dichas iniciativas.

4.2. Recomendaciones

Es importante reconocer que el vacío de conocimiento detectado es más grande que la contribución realizada en esta tesis doctoral, por lo se abren nuevas oportunidades de investigación en esta línea de trabajo. Estas cubren rango amplio, las cuales van desde la revisión de la literatura, el enfoque de modelamiento, sus técnicas de solución y enfoques de experimentación. Por lo tanto, se plantean recomendaciones para la academia, para el sector de biocombustibles y para el Estado Colombiano.

- **Recomendaciones para la academia**

Durante la construcción del marco teórico, se identificaron un conjunto de características y actividades pertenecientes a la SBSC las cuales no han sido abordadas en el diseño de la cadena, entre ellas, el tipo de variedades de caña de azúcar que se pueden utilizar, las curvas de mantenimiento de maquinaria agrícola que afectan su disponibilidad e inversión, la localización de la BR de manera conjunta con la planificación del eslabón agrícola, y además, la capacidad variable de la BR. La inclusión de estos aspectos en el proceso de diseño de la cadena puede incrementar de gran manera la complejidad computacional; sin embargo, puede ayudar a refinar de una mejor manera la medición del desempeño.

El modelo M-MAB tiene características muy interesantes al involucrar los periodos mensuales durante el horizonte de planificación. No obstante, la complejidad que exhibió no permite su aplicación en instancias reales. Lo que representa una línea de investigación abierta, con el fin de mejorar la precisión en la captura de la medición del desempeño, atacando el problema desde lo computacional, ya sea a través de modelos de descomposición matemática o por medio de meta-heurísticas. Así mismo, la identificación de los factores de distancia y el precio de caña de azúcar, pueden involucrarse de manera integral, ya que se identificaron como aspectos claves a tener en cuenta durante el proceso de diseño.

Si bien es cierto que una de las contribuciones más relevantes de esta tesis doctoral corresponde a la medición multidimensional del desempeño social de la cadena, aspecto poco estudiado en el contexto del SC, se reconoce que existen múltiples factores a considerar en esta dimensión de desempeño, especialmente al involucrar comunidades relacionadas con la SBSC como los clientes y la contribución al desarrollo económico de las

regiones de manera diferencial, entre otros. En esta misma vía, el estudio de la dimensión ambiental es posible abordarlo con la incorporación de implementaciones tecnológicas que reduzcan los impactos ambientales de la producción en la biorefinería, tales como el manejo de aguas, el impacto de las vinazas, la utilización de diseños de campo que minimicen los riegos, implementación de reservorios y la rotación de cultivos, entre otros. Estos aspectos pueden ayudar a reducir los impactos al medio ambiente y mejorar el equilibrio con la dimensión económica.

- **Recomendaciones para el sector de biocombustibles**

El sector de los biocombustibles tiene un marco legal robusto que encamina los proyectos de inversión para garantizar el desarrollo sostenible de la industria. A pesar de lo anterior, pocas han sido las iniciativas para incrementar las capacidades de producción y las zonas de expansión agrícola han sido escasamente explotadas, posiblemente, por la falta de un marco de evaluación definido, que establezca el alcance de los proyectos, los indicadores de desempeño, las dimensiones del diseño y los planes de ejecución de las actividades tanto agrícola e industrial. En consecuencia, se recomienda al sector la implementación del modelo propuesto en esta tesis doctoral, como herramienta de apoyo al proceso de toma de decisiones alrededor de la inversión y la gestión de las cadenas de biocombustibles a partir de caña de azúcar.

La identificación de un mecanismo para establecer el precio de la caña de azúcar considerando la distribución óptima de los beneficios económicos de los actores de la cadena contribuye al establecimiento de un relacionamiento estratégico, entre el sector agrícola e industrial. Se podría entonces involucrar este factor dentro de la medición del desempeño social, junto a la huella de tierra y la generación de empleo en la región, aspecto que concreta y operacionaliza el lineamiento del gobierno respecto a la contribución del desarrollo económico y social de las regiones. En ese sentido, la industria de los biocombustibles puede involucrar el enfoque de evaluación propuesto en esta tesis doctoral para medir la factibilidad del desarrollo de la industria en las nuevas zonas de expansión agrícola propuestas por el gobierno nacional.

Entre varios aspectos identificados como críticos para la industria, se recomienda establecer un control y vigilancia prioritaria sobre factores como la productividad agrícola, la distancia entre fincas y la biorefinería, y el avance del cronograma de construcción de la biorefinería, dado su nivel de incidencia en el desempeño económico, social y ambiental. De igual manera, factores como el régimen de lluvias, su intensidad y frecuencia, se identifican como prioritarios dado su nivel de incidencia en el rendimiento de los cultivos y la duración de la temporada de cosecha, aspectos claves en la evaluación de un proyecto de inversión en biocombustibles.

- **Recomendaciones para el Gobierno Nacional y su política pública**

La evaluación del desempeño sostenible en los proyectos de biocombustibles a partir de caña de azúcar se ha establecido como uno de los requisitos por parte de la política pública del Gobierno Colombiano para contrarrestar el consumo de combustibles fósiles. Sin embargo, la política hace énfasis en los impactos ambientales los cuales deben ser minimizados. Sin embargo, esta tesis doctoral propone un marco de evaluación de las tres

dimensiones, derivando soluciones equilibradas del diseño de la SBSC. Por lo tanto, se recomienda involucrar líneas de financiación especial para el eslabón agrícola e industrial de forma diferencial, buscando ventajas para garantizar bienestar financiero de largo plazo. También, un régimen especial para el desarrollo de la industria, especialmente durante los primeros años de construcción y estabilización de la producción de caña de azúcar y bioetanol.

Así mismo, se recomienda la estabilización de precios de bioetanol como medida proteccionista de la producción interna, con el fin de garantizar el desempeño sostenible. De esta manera, en términos económicos se garantizan los ingresos por ventas de biocombustibles a los productores a lo largo de la cadena. Desde lo ambiental se reducen las emisiones de GHG por transporte de etanol importado, el cual no haría frente a la política de reducción de emisiones para enfrentar el cambio climático. Desde lo social, apalanca la generación de puestos de trabajo en zonas rurales y se facilita el desarrollo económico a las regiones con zonas potenciales de expansión agrícola.

El desarrollo de un proyecto de inversión en la producción de biocombustibles a partir de caña de azúcar, requiere de una gran extensión de tierra, por lo que los costos de inversión inciden directamente en el desempeño sostenible. Durante el inicio del proyecto se genera gran expectativa, aspecto que repercute en el incremento del costo de adquisición o renta de predios rurales. En ese sentido, es necesario que el gobierno nacional facilite la adquisición, control de precios e intervención en los procesos legalización de predios con fines de explotación agrícola. Finalmente, se deben proponer líneas de financiación para la adquisición de las tierras y la maquinaria agrícola necesaria.

Con los resultados de esta tesis, se identificaron múltiples factores que inciden en el desempeño sostenible de la SBSC. En ese sentido, se recomienda que los dichos factores sean incorporados en una política pública robustecida en términos de diseño y gestión de las operaciones, involucrando a los eslabones agrícola e industrial de forma simultánea. Adicionalmente, el campo de las cadenas de biocombustibles a partir de caña de azúcar es amplio y, en algunos aspectos ha sido poco explorado, desde el punto de vista de la investigación científica. En ese sentido, se exhorta al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación a fortalecer la investigación científica en este campo ofreciendo mayores recursos económicos; al igual que crear mecanismos de conexión entre la investigación científica y la industria de la caña de azúcar y de biocombustible en Colombia.

5. Producción científica derivada de la investigación

Con los resultados obtenidos a lo largo de este estudio, se generó un conjunto de productos de investigación, que se resumen en cuatro artículos de investigación (dos publicados en revistas del cuartil 1 y dos bajo evaluación), cuatro ponencias en eventos científicos, un capítulo de libro y un informe de pasantía. Estos productos dan cuenta de los esfuerzos de difusión de resultados ante la comunidad científica y fueron sometidos a revisión por pares evaluadores. Tales productos son los siguientes:

Artículos científicos

- Carvajal, J., Sarache, W., & Costa, Y. (2019). **Addressing a robust decision in the sugarcane supply chain: Introduction of a new agricultural investment project in Colombia.** *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.030>
- Carvajal, J., Castaño, F., Sarache, W., & Costa, Y. (2020). **Heuristic approaches for a two-echelon constrained joint replenishment and delivery problem.** *International Journal of Production Economics*, 220, 107420. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.06.016>
- Carvajal, J., Sarache, W., & Costa, Y. **A fair profit distribution approach in a biofuel supply chain design.** Submitted to *Annals of Operations Research*. Under Review.

Memorias en eventos científicos

- Carvajal, J., & Sarache, W. (2018). **Planeación óptima de cultivos de caña de azúcar bajo efectos de incertidumbre en los rendimientos y en la fecha de inicio del abastecimiento.** *The 9th International Conference on Production Research–Americas*. Julio 2018, Bogotá / Colombia.
- Carvajal, J., Sarache, W., & Costa, Y. (2018). **Integrating strategic and tactical decision for sugarcane sowing, growing and harvesting.** En *IV Coloquio de Investigación Posgrados Ingeniería Industrial 2017 – Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales*. Octubre / 2017, Manizales, Colombia.
- Carvajal, J., Sarache, W., & Costa, Y. (2019). **A novel matheuristic approach to solve the problem of one warehouse, N retailers and M items.** *47th International Conference on Computers & Industrial Engineering 2017 (CIE47)*, 11-13 October 2017, Lisbon / Portugal.
- Carvajal, J., Sarache, W., & Costa, Y. (2020). **Fairness profit distribution approach in the biofuels supply chain.** En: *Escuela Latinoamericana de Verano en Investigación Operativa (ELAVIO 2019)*. Julio / 2019, Lleida, España.

Capítulo de libro

- Carvajal, J., Sarache, W., & Costa, Y. (2020). **Cadenas de abastecimiento sostenibles**. En: *La sostenibilidad en cadenas de abastecimiento: avances de investigación*. Manizales / Colombia, Universidad Nacional de Colombia. ISBN:978-958-794-441-9.

Informe Pasantía Internacional

- MIT – Zaragoza Logistics Center (ZLC). Enfoque de métodos exactos para la distribución justa de la utilidad en cadenas de abastecimiento de biocombustibles a partir de caña de azúcar. Zaragoza (España), junio 30-septiembre 26 de 2019.

6. Referencias

Abdul-Jalbar, B., Colebrook, M., Dorta-Guerra, R., & Gutiérrez, J. M. (2016). Centralized and decentralized inventory policies for a single-vendor two-buyer system with permissible delay in payments. *Computers & Operations Research*, 74, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.04.030>

Adam, N.-R. B., Dauhoo, M. Z., Khoodaruth, A. A. H., & Elahee, M. K. (2016). A two-stage stochastic programming optimisation for sugar-ethanol-electricity production from sugarcane: A case study of Mauritius. *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, 7(1), 20-32.

Ahumada, O., Rene Villalobos, J., & Nicholas Mason, A. (2012). Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty. *Agricultural Systems*, 112, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.06.002>

Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>

Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2011). A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research*, 190(1), 339-358. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0614-4>

Alonso Pippo, W., Luengo, C. A., Alonsoamador Morales Alberteris, L., Garzone, P., & Cornacchia, G. (2011). Energy Recovery from Sugarcane-Trash in the Light of 2nd Generation Biofuel. Part 2: Socio-Economic Aspects and Techno-Economic Analysis. *Waste and Biomass Valorization*, 2(3), 257-266. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9069-3>

Alonso-Pippo, W., Luengo, C. A., Alonsoamador Morales Alberteris, L., García del Pino, G., & Duvoisin, S. (2013). Practical implementation of liquid biofuels: The transferability of the Brazilian experiences. *Energy Policy*, 60, 70-80. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.038>

Álvarez-Rodríguez, D. A., Normey-Rico, J. E., & Flesch, R. C. C. (2017). Model predictive control for inventory management in biomass manufacturing supply chains. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3596-3608. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1315191>

Amu, L.G., Garcia, J.A., Galvis, D.E., & Rubiano, O. (2013). Optimisation of harvest resources in a colombian sugar mill by use of simulation models. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, 28, 2042-2049. <http://bonsucro.com/site/wp-content/uploads/2013/02/ISSCT-Development-Bonsucro-Standard-Viart-N-and-Rein-P-2013.pdf>

Asocaña. (2017). *Más que azúcar, una fuente de energía renovable para el país*. <https://www.asocana.org/documentos/562017-ED2FFB51-00FF00,000A000,878787,C3C3C3,0F0F0F,B4B4B4,FF00FF,2D2D2D.pdf>

Baghalian, A., Rezapour, S., & Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case. *European Journal of Operational*

Research, 227(1), 199-215. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.017>

Ballou, R. H. (2007). *Business logistics/supply chain management: Planning, organizing, and controlling the supply chain*. Pearson Education India.

Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2012). "Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia".

Barbosa-Póvoa, A. P., da Silva, C., & Carvalho, A. (2017). Opportunities and Challenges in Sustainable Supply Chain: An Operations Research Perspective. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.10.036>

Barrett, C. B. (2021). Overcoming Global Food Security Challenges through Science and Solidarity. *American Journal of Agricultural Economics*, 103(2), 422-447. <https://doi.org/10.1111/ajae.12160>

Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L., & Zhang, A. (2017). Agribusiness Supply Chain Risk Management: A Review of Quantitative Decision Models. *Omega*. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.005>

Bekkering, J., Broekhuis, A. A., & van Gemert, W. J. T. (2010). Optimisation of a green gas supply chain – A review. *Bioresource Technology*, 101(2), 450-456. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.106>

Benoît, C., Norris, G. A., Valdivia, S., Citroth, A., Moberg, A., Bos, U., Prakash, S., Ugaya, C., & Beck, T. (2010). The guidelines for social life cycle assessment of products: Just in time! *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(2), 156-163. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0147-8>

Bertsimas, D., Farias, V. F., & Trichakis, N. (2011). The Price of Fairness. *Operations Research*, 59(1), 17-31. <https://doi.org/10.1287/opre.1100.0865>

Bezuidenhout, C. N., & Singels, A. (2007a). Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 1 – System description. *Agricultural Systems*, 92(1), 23-38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.02.001>

Bezuidenhout, C. N., & Singels, A. (2007b). Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 2 – System evaluation. *Agricultural Systems*, 92(1), 39-51. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2006.03.002>

Bhattacharya, A. (2006). A goal programming approach for developing pre-harvest forecasts of crop yield. *Journal of the Operational Research Society*, 57(8). <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1057/palgrave.jors.2602098?needAccess=true&>

Birge, J. R., & Louveaux, F. (2011). *Introduction to stochastic programming*. Springer Science & Business Media.

Blanco, V., Carpena, L., Hinojosa, Y., & Puerto, J. (2010). Planning for Agricultural Forage Harvesters and Trucks: Model, Heuristics, and Case Study. *Networks and Spatial Economics*, 10(3), 321-343. <https://doi.org/10.1007/s11067-009-9120-0>

Bocca, F. F., & Rodrigues, L. H. A. (2016). The effect of tuning, feature engineering, and feature selection in data mining applied to rainfed sugarcane yield modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, *128*, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.015>

Bojesen, M., Skov-Petersen, H., & Gylling, M. (2015). Forecasting the potential of Danish biogas production – Spatial representation of Markov chains. *Biomass and Bioenergy*, *81*, 462-472. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.030>

Borgonovo, E., Gatti, S., & Peccati, L. (2010). What drives value creation in investment projects? An application of sensitivity analysis to project finance transactions. *European Journal of Operational Research*, *205*(1), 227-236. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.12.006>

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>

Bot, P., van Donk, D. P., Pennink, B., & Simatupang, T. M. (2015). Uncertainties in the Bidirectional Biodiesel Supply Chain. *Journal of Cleaner Production*, *95*, 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.064>

Branco, J. E. H., Branco, D. H., de Aguiar, E. M., Caixeta Filho, J. V., & Rodrigues, L. (2019). Study of optimal locations for new sugarcane mills in Brazil: Application of a MINLP network equilibrium model. *Biomass and Bioenergy*, *127*, 105249.

Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, *233*(2), 299-312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>

Bubicz, M. E., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., & Carvalho, A. (2019). Incorporating social aspects in sustainable supply chains: Trends and future directions. *Journal of Cleaner Production*, *237*, 117500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.331>

Budzianowski, W. M., & Postawa, K. (2016). Total Chain Integration of sustainable biorefinery systems. *Applied Energy*, *184*, 1432-1446. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.050>

Caixeta-Filho, J. V. (2006). Orange harvesting scheduling management: A case study. *Journal of the Operational Research Society*, *57*(6), 637-642. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602041>

Campos-Guzmán, V., García-Cáscales, M. S., Espinosa, N., & Urbina, A. (2019). Life Cycle Analysis with Multi-Criteria Decision Making: A review of approaches for the sustainability evaluation of renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *104*, 343-366. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.031>

Cardoso, T. F., Chagas, M. F., Rivera, E. C., Cavalett, O., Morais, E. R., Geraldo, V. C., Braunbeck, O., da Cunha, M. P., Cortez, L. A. B., & Bonomi, A. (2015). A vertical integration simplified model for straw recovery as feedstock in sugarcane biorefineries. *Biomass and Bioenergy*, *81*, 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.07.003>

Carvajal, J., Sarache, W., & Costa, Y. (2019). Addressing a robust decision in the sugarcane supply

chain: Introduction of a new agricultural investment project in Colombia. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.030>

Castaño, F., Rossi, A., Sevaux, M., & Velasco, N. (2014). A column generation approach to extend lifetime in wireless sensor networks with coverage and connectivity constraints. *Computers & Operations Research*, 52, 220-230.

Castaño, F., Velasco, N., & Carvajal, J. (2019). Content-Based Conference Scheduling Optimization. *IEEE Latin America Transactions*, 17(04), 597-606.

Chen, Y., Wang, S., Yao, J., Li, Y., & Yang, S. (2018). Socially responsible supplier selection and sustainable supply chain development: A combined approach of total interpretive structural modeling and fuzzy analytic network process. *Business Strategy and the Environment*, 27(8), 1708-1719. <https://doi.org/10.1002/bse.2236>

Colin, E. C. (2009). Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex. *European Journal of Operational Research*, 199(1), 232-235. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.11.016>

Congreso de Colombia. (2014). LEY 1715 DE 2014 Diario Oficial No. 49.150. *Bogotá, DC: Imprenta Nacional. Retrieved, 9, 2017.*

Congreso de Colombia. (2019). *LEY 1955 DE 2019, Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. "Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad"*. <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30036488>

Costa, A. M., dos Santos, L. M. R., Alem, D. J., & Santos, R. H. S. (2011). Sustainable vegetable crop supply problem with perishable stocks. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-010-0830-y>

Council of Supply Chain Management Professionals, CSCMP. (2017). *CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary*.

da Silva, A. F., & Marins, F. A. S. (2014). A Fuzzy Goal Programming model for solving aggregate production-planning problems under uncertainty: A case study in a Brazilian sugar mill. *Energy Economics*, 45, 196-204. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.07.005>

da Silva, A. F., Marins, F. A. S., & Dias, E. X. (2015). Addressing uncertainty in sugarcane harvest planning through a revised multi-choice goal programming model. *Applied Mathematical Modelling*, 39(18), 5540-5558. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.007>

Darby-Dowman, K., Barker, S., Audsley, E., & Parsons, D. (2000). A two-stage stochastic programming with recourse model for determining robust planting plans in horticulture. *Journal of the Operational Research Society*, 51(1), 83-89. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600858>

Das, R., Shaw, K., & Irfan, Mohd. (2020). Supply chain network design considering carbon footprint, water footprint, supplier's social risk, solid waste, and service level under the uncertain condition. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(2), 337-370. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01785-y>

Davis, K. F., Gephart, J. A., Emery, K. A., Leach, A. M., Galloway, J. N., & D'Odorico, P. (2016). Meeting future food demand with current agricultural resources. *Global Environmental Change*, *39*, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.004>

De Oliveira Florentino, H., De Lima, A. D., De Carvalho, L. R., Balbo, A. R., & Homem, T. P. D. (2011). Multiobjective 0-1 integer programming for the use of sugarcane residual biomass in energy cogeneration. *International Transactions in Operational Research*, *18*(5), 605-615. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2011.00818.x>

de Oliveira Florentino, H., & Pato, M. V. (2014). A bi-objective genetic approach for the selection of sugarcane varieties to comply with environmental and economic requirements. *Journal of the Operational Research Society*, *65*(6), 842-854. <https://doi.org/10.1057/jors.2013.21>

de Oliveira Florentino, H., & Pereira Sartori, M. M. (2003). Game theory in sugarcane crop residue and available energy optimization. *Biomass and Bioenergy*, *25*(1), 29-34. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00189-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00189-7)

de Souza Dias, M. O., Maciel Filho, R., Mantelatto, P. E., Cavalett, O., Rossell, C. E. V., Bonomi, A., & Leal, M. R. L. V. (2015). Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development*, *15*, 35-51.

Departamento Nacional de Planeación. (2008). *Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia (Documento CONPES 3510)*. DNP Bogotá, Colombia.

dos Reis Ferreira, R. A., da Silva Meireles, C., Assunção, R. M. N., Barrozo, M. A. S., & Soares, R. R. (2020). Optimization of the oxidative fast pyrolysis process of sugarcane straw by TGA and DSC analyses. *Biomass and Bioenergy*, *134*, 105456.

Du, C., Dias, L. C., & Freire, F. (2019). Robust multi-criteria weighting in comparative LCA and S-LCA: A case study of sugarcane production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *218*, 708-717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.035>

Dunford, R. W., Marti, C. E., & Mittelhammer, R. C. (1985). A Case Study of Rural Land Prices at the Urban Fringe Including Subjective Buyer Expectations. *Land Economics*, *61*(1), 10. <https://doi.org/10.2307/3146135>

Ebadian, M., van Dyk, S., McMillan, J. D., & Saddler, J. (2020). Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective. *Energy Policy*, *147*, 111906. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111906>

Eizenberg, E., & Jabareen, Y. (2017). Social Sustainability: A New Conceptual Framework. *Sustainability*, *9*(1), 68. <https://doi.org/10.3390/su9010068>

El Espectador. (2021, septiembre 20). ELESPECTADOR.COM. *ELESPECTADOR.COM*. <https://www.elespectador.com/judicial/megaproyecto-de-produccion-de-etanol-el-alcaravan-fue-un-fracaso-contraloria/>

Elkington, J. (1997). Cannibals with forks. *The triple bottom line of 21st century*, 73.

Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega*, 54, 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>

Espinoza-Pérez, A. T., Camargo, M., Narváez-Rincón, P. C., & Alfaro-Marchant, M. (2017). Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 350-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.084>

Esteso, A., Alemany, M. M. E., & Ortiz, A. (2018). Conceptual framework for designing agri-food supply chains under uncertainty by mathematical programming models. *International Journal of Production Research*, 56(13), 4418-4446. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1447706>

Fahimnia, B., Sarkis, J., & Davarzani, H. (2015). Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, 162, 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003>

Farahani, R. Z., Hekmatfar, M., Fahimnia, B., & Kazemzadeh, N. (2014). Hierarchical facility location problem: Models, classifications, techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 68, 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.005>

Faria, L. F. F., Silva, J. E. A. R., Faria, L. F. F., & Silva, J. E. A. R. (2015). Effects of maintenance management procedures in sugarcane mechanic harvesting system equipment. *Engenharia Agrícola*, 35(6), 1187-1197. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1187-1197/2015>

Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2018). Multi-objective stochastic closed-loop supply chain network design with social considerations. *Applied Soft Computing*, 71, 505-525. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.07.025>

Fattahi, M., & Govindan, K. (2018). A multi-stage stochastic program for the sustainable design of biofuel supply chain networks under biomass supply uncertainty and disruption risk: A real-life case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 534-567. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.08.008>

Fedebiocombustibles. (2021, enero 1). *Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia, Marco Normativo de los biocombustibles en Colombia*. fedebiocombustibles.com. [http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_\(Etanol\).htm](http://www.fedebiocombustibles.com/v3/estadistica-mostrar_info-titulo-Alcohol_Carburante_(Etanol).htm)

Florentino, H. de O., Irawan, C., Aliano, A. F., Jones, D. F., Cantane, D. R., & Nervis, J. J. (2018). A multiple objective methodology for sugarcane harvest management with varying maturation periods. *Annals of Operations Research*, 267(1-2), 153-177. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2568-2>

Florentino, H. de O., Jones, D. F., Irawan, C. A., Ouelhadj, D., Khosravi, B., & Cantane, D. R. (2020). An optimization model for combined selecting, planting and harvesting sugarcane varieties. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03610-y>

Florio, M., & Colautti, S. (2005). A logistic growth theory of public expenditures: A study of five

countries over 100 years. *Public Choice*, 122(3-4), 355-393. <https://doi.org/10.1007/s11127-005-3900-y>

Furlan, F. F., Costa, C. B. B., de Castro Fonseca, G., de Pelegrini Soares, R., Secchi, A. R., da Cruz, A. J. G., & de Campos Giordano, R. (2012). Assessing the production of first and second generation bioethanol from sugarcane through the integration of global optimization and process detailed modeling. *Computers & Chemical Engineering*, 43, 1-9.

Gao, J., & You, F. (2019). A stochastic game theoretic framework for decentralized optimization of multi-stakeholder supply chains under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 122, 31-46. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.05.016>

Gatti, S. (2013). *Project finance in theory and practice: Designing, structuring, and financing private and public projects*. Academic Press.

Ghaderi, H., Pishvaei, M. S., & Moini, A. (2016). Biomass supply chain network design: An optimization-oriented review and analysis. *Industrial Crops and Products*, 94, 972-1000. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.027>

Gheewala, S., Silalertruksa, T., Nilsalab, P., Mungkung, R., Perret, S., & Chaiyawannakarn, N. (2014). Water Footprint and Impact of Water Consumption for Food, Feed, Fuel Crops Production in Thailand. *Water*, 6(6), 1698-1718. <https://doi.org/10.3390/w6061698>

Giannakis, M., & Papadopoulos, T. (2016). Supply chain sustainability: A risk management approach. *International Journal of Production Economics*, 171, 455-470. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.032>

Gilani, H., & Sahebi, H. (2020). A multi-objective robust optimization model to design sustainable sugarcane-to-biofuel supply network: The case of study. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00639-8>

Gnansounou, E., Pachón, E. R., Sinsin, B., Teka, O., Togbé, E., & Mahamane, A. (2020). Using agricultural residues for sustainable transportation biofuels in 2050: Case of West Africa. *Bioresource Technology*, 305, 123080. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123080>

Gobierno Digital Colombia. (2018). *Datos abiertos Ministerio de Minas y energía Colombia*. <https://www.datos.gov.co/Minas-y-Energ-a/Tarifas-aplicadas-de-Gas-Natural/ek3f-5wn4/data>

Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108-141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>

Govindan, K., Shaw, M., & Majumdar, A. (2020). Social Sustainability Tensions in Multi-tier Supply Chain: A Systematic Literature Review towards Conceptual Framework Development. *Journal of Cleaner Production*, 123075. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123075>

Grimsey, D., & Lewis, M. (2007). *Public private partnerships: The worldwide revolution in infrastructure provision and project finance*. Edward Elgar Publishing.

Grunow, M., Günther, H.-O., & Westinner, R. (2007). Supply optimization for the production of raw sugar. *International Journal of Production Economics*, 110(1-2), 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.019>

Guo, M., van Dam, K. H., Touhami, N. O., Nguyen, R., Delval, F., Jamieson, C., & Shah, N. (2020). Multi-level system modelling of the resource-food-bioenergy nexus in the global south. *Energy*, 197, 117196. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117196>

Haberl, H., Wackernagel, M., & Wrbka, T. (2004). Land use and sustainability indicators. An introduction. *Land Use Policy*, 21(3), 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.10.004>

Hahn, M. H., & Ribeiro, R. V. (1999). Heuristic guided simulator for the operational planning of the transport of sugar cane. *Journal of the Operational Research Society*, 50(5), 451-459.

Haj Hasan, A., & Avami, A. (2018). Comparative assessment of bioethanol supply chain: Insights from Iran. *Biofuels*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1496385>

Hall, J., Matos, S., & Silvestre, B. (2012). Understanding why firms should invest in sustainable supply chains: A complexity approach. *International Journal of Production Research*, 50(5), 1332-1348. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571930>

Hasani, A., & Khosrojerdi, A. (2016). Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 87, 20-52. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.12.009>

Henao, R., Sarache, W., & Gómez, I. (2019). Lean manufacturing and sustainable performance: Trends and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 208, 99-116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.116>

Henao, R., Sarache, W., & Gomez, I. (2021). A social performance metrics framework for sustainable manufacturing. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 38(2), 167-197.

Higgins, A. (2006). Scheduling of road vehicles in sugarcane transport: A case study at an Australian sugar mill. *European Journal of Operational Research*, 170(3), 987-1000. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.055>

Higgins, A., Antony, G., Sandell, G., Davies, I., Prestwidge, D., & Andrew, B. (2004). A framework for integrating a complex harvesting and transport system for sugar production. *Agricultural Systems*, 82(2), 99-115. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2003.12.004>

Higgins, A., & Davies, I. (2005). A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. *Computers and Electronics in Agriculture*, 47(2), 85-102. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.006>

Higgins, A. J. (1999). Optimizing cane supply decisions within a sugar mill region. *Journal of Scheduling*, 2(5), 229-244.

Higgins, A. J. (2002). Australian Sugar Mills Optimize Harvester Rosters to Improve Production.

Interfaces, 32(3), 15-25. <https://doi.org/10.1287/inte.32.3.15.41>

Higgins, A. J., & Laredo, L. A. (2006). Improving harvesting and transport planning within a sugar value chain. *Journal of the Operational Research Society*, 57(4), 367-376. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602024>

Higgins, A. J., & Muchow, R. C. (2003). Assessing the potential benefits of alternative cane supply arrangements in the Australian sugar industry. *Agricultural Systems*, 76(2), 623-638.

Higgins, A., Muchow, R. C., Rudd, A. V., & Ford, A. W. (1998). Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. *Field Crops Research*, 57, 153-162.

Higgins, A., Thorburn, P., Archer, A., & Jakku, E. (2007). Opportunities for value chain research in sugar industries. *Agricultural Systems*, 94(3), 611-621. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.02.011>

Hua, Z., Jun, L., Zhaonian, Y., Sanji, G., Yingying, Y., & Zhaoli, L. (2013). Agronomic techniques to sugarcane mechanical seeding [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 1, 020.

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138-147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>

Illukpitiya, P., Yanagida, J. F., Ogoshi, R., & Uehara, G. (2013). Sugar-ethanol-electricity co-generation in Hawai'i: An application of linear programming (LP) for optimizing strategies. *Biomass and Bioenergy*, 48, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.11.003>

J. W. Mishoe, J. W. Jones, & G. J. Gascho. (1979). Harvesting Scheduling of Sugarcane for Optimum Biomass Production. *Transactions of the ASAE*, 22(6), 1299-1304. <https://doi.org/10.13031/2013.35202>

Jaehn, F. (2016). Sustainable Operations. *European Journal of Operational Research*, 253(2), 243-264. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.02.046>

Jahani, H., Abbasi, B., & Talluri, S. (2019). Supply Chain Network Redesign: A Technical Note on Optimising Financial Performance. *Decision Sciences*, deci.12374. <https://doi.org/10.1111/dec.12374>

Jena, S. D., & Poggi, M. (2013). Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer programming. *European Journal of Operational Research*, 230(2), 374-384. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.04.011>

Jiao, Z., Higgins, A. J., & Prestwidge, D. B. (2005). An integrated statistical and optimisation approach to increasing sugar production within a mill region. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48(2), 170-181. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.03.004>

Jin, S., Jeong, S., & Kim, K. (2017). A Linkage Model of Supply Chain Operation and Financial Performance for Economic Sustainability of Firm. *Sustainability*, 9(1), 139.

<https://doi.org/10.3390/su9010139>

Joelsson, E., Erdei, B., Galbe, M., & Wallberg, O. (2016). Techno-economic evaluation of integrated first- and second-generation ethanol production from grain and straw. *Biotechnology for Biofuels*, 9, 1. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0423-8>

Jonker, J. G. G., Junginger, H. M., Verstegen, J. A., Lin, T., Rodríguez, L. F., Ting, K. C., Faaij, A. P. C., & van der Hilst, F. (2016). Supply chain optimization of sugarcane first generation and eucalyptus second generation ethanol production in Brazil. *Applied Energy*, 173, 494-510. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.069>

Junqueira, R. de Á. R., & Morabito, R. (2019). Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 213, 150-160.

Karp, S. G., Medina, J. D. C., Letti, L. A. J., Woiciechowski, A. L., de Carvalho, J. C., Schmitt, C. C., de Oliveira Penha, R., Kumlehn, G. S., & Soccol, C. R. (2021). Bioeconomy and biofuels: The case of sugarcane ethanol in Brazil. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, n/a(n/a). <https://doi.org/10.1002/bbb.2195>

Khamjan, W., Khamjan, S., & Pathumnakul, S. (2013). Determination of the locations and capacities of sugar cane loading stations in Thailand. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 663-674. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.006>

Khan, S. A. R., Yu, Z., Golpira, H., Sharif, A., & Mardani, A. (2021). A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123357. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123357>

Khatiwada, D., Leduc, S., Silveira, S., & McCallum, I. (2016). Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable Energy*, 85, 371-386. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.009>

Kittilertpaisan, K., & Pathumnakul, S. (2017). Integrating a multiple crop year routing design for sugarcane harvesters to plant a new crop. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.001>

Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M. J., & Jiménez, L. (2010). Integrating pricing policies in the strategic planning of supply chains: A case study of the sugar cane industry in Argentina. En S. Pierucci & G. B. Ferraris (Eds.), *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 28, pp. 103-108). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(10\)28018-5](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(10)28018-5)

Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M. J., & Jiménez, L. (2011). A novel rolling horizon strategy for the strategic planning of supply chains. Application to the sugar cane industry of Argentina. *Computers & Chemical Engineering*, 35(11), 2540-2563. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.04.006>

Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., Mele, F. D., Bagajewicz, M. J., & Jiménez, L. (2012). Design and planning of infrastructures for bioethanol and sugar production under demand uncertainty. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(3), 359-376. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.07.013>

Kravanja, Z., & Čuček, L. (2013). Multi-objective optimisation for generating sustainable solutions considering total effects on the environment. *Applied Energy*, 101, 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.025>

Kulkarni, V. G. (2016). *Modeling and analysis of stochastic systems*. Chapman and Hall/CRC.

Kumar, N., Patel, S. S., Chalodia, A. L., Vadaviya, O. U., Pandya, H. R., Pisal, R. R., Dakhore, K. K., & Patel, M. L. (2015). Markov chain and incomplete Gamma distribution analysis of weekly rainfall over Navsari region of south Gujarat. *Mausam*, 10.

Kusumastuti, R. D., Donk, D. P. van, & Teunter, R. (2016). Crop-related harvesting and processing planning: A review. *International Journal of Production Economics*, 174, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.010>

Le Gal, P.-Y., Le Masson, J., Bezuidenhout, C. N., & Lagrange, L. F. (2009). Coupled modelling of sugarcane supply planning and logistics as a management tool. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(2), 168-177. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.05.006>

Le Gal, P.-Y., Lyne, P. W. L., Meyer, E., & Soler, L.-G. (2008). Impact of sugarcane supply scheduling on mill sugar production: A South African case study. *Agricultural Systems*, 96(1), 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.05.006>

Leduc, S., Starfelt, F., Dotzauer, E., Kindermann, G., McCallum, I., Obersteiner, M., & Lundgren, J. (2010). Optimal location of lignocellulosic ethanol refineries with polygeneration in Sweden. *Energy*, 35(6), 2709-2716. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.018>

Lejars, C., Le Gal, P.-Y., & Auzoux, S. (2008). A decision support approach for cane supply management within a sugar mill area. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60(2), 239-249. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.08.008>

Liobikiene, G., Balezentis, T., Streimikiene, D., & Chen, X. (2019). Evaluation of bioeconomy in the context of strong sustainability. *Sustainable Development*, 27(5), 955-964. <https://doi.org/10.1002/sd.1984>

Liu, L., Parlar, M., & Zhu, S. X. (2007). Pricing and Lead Time Decisions in Decentralized Supply Chains. *Management Science*, 53(5), 713-725. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1060.0653>

Liu, S., & Papageorgiou, L. G. (2018). Fair profit distribution in multi-echelon supply chains via transfer prices. *Omega*, 80, 77-94. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.08.010>

Londoño, L. (2017). *Desempeño de la Agroindustria de la Caña en Colombia 2016-2017, Performance of the Agroindustry of the Sugarcane in Colombia 2016-2017* (pp. 1-32). <http://www.asocana.org/documentos/2452017.pdf>

Longinidis, P., & Georgiadis, M. C. (2011). Integration of financial statement analysis in the optimal design of supply chain networks under demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 129(2), 262-276. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.018>

Longinidis, P., & Georgiadis, M. C. (2013). Managing the trade-offs between financial performance

and credit solvency in the optimal design of supply chain networks under economic uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 48, 264-279. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.09.019>

Longinidis, P., & Georgiadis, M. C. (2014). Integration of sale and leaseback in the optimal design of supply chain networks. *Omega*, 47, 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.004>

Longinidis, P., Georgiadis, M. C., & Kozanidis, G. (2015). Integrating Operational Hedging of Exchange Rate Risk in the Optimal Design of Global Supply Chain Networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(24), 6311-6325. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b00349>

Lopez Milan, E., Miquel Fernandez, S., & Pla Aragones, L. M. (2006). Sugar cane transportation in Cuba, a case study. *European Journal of Operational Research*, 174(1), 374-386. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.028>

Lowe, T. J., & Preckel, P. V. (2004). Decision Technologies for Agribusiness Problems: A Brief Review of Selected Literature and a Call for Research. *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(3), 201-208. <https://doi.org/10.1287/msom.1040.0051>

Macowski, D. H., Bonfim-Rocha, L., Orgeda, R., Camilo, R., & Ravagnani, M. A. S. S. (2020). Multi-objective optimization of the Brazilian industrial sugarcane scenario: A profitable and ecological approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(3), 591-611. <https://doi.org/10.1007/s10098-019-01802-0>

Mallawaarachchi, T., & Quiggin, J. (2001). Modelling socially optimal land allocations for sugar cane growing in North Queensland: A linked mathematical programming and choice modelling study. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 45(3), 383-409. <https://doi.org/10.1111/1467-8489.00149>

Marin, F., Jones, J. W., & Boote, K. J. (2017). A Stochastic Method for Crop Models: Including Uncertainty in a Sugarcane Model. *Agronomy Journal*, 109(2), 483. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0103>

Martínez-Guido, Sergiol., Betzabe González-Campos, J., Ponce-Ortega, JoséM., Nápoles-Rivera, F., & El-Halwagi, MahmoudM. (2016). Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(2), 553-562. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1039-1>

Martinez-Hernandez, E. (2017). Trends in sustainable process design—From molecular to global scales. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 17, 35-41. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2017.05.005>

Matindi, R., Masoud, M., Hobson, P., Kent, G., & Liu, S. Q. (2018). Harvesting and transport operations to optimise biomass supply chain and industrial biorefinery processes. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 265-288. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.9.001>

Matis, J. H., Saito, T., Grant, W. E., Iwig, W. C., & Ritchie, J. T. (1985). A Markov chain approach to crop yield forecasting. *Agricultural Systems*, 18(3), 171-187. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(85\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0308-521X(85)90030-7)

- Maxwell, D., & van der Vorst, R. (2003). Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production*, 11(8), 883-895. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00164-6)
- Meemken, E.-M., Barrett, C. B., Michelson, H. C., Qaim, M., Reardon, T., & Sellare, J. (2021). Sustainability standards in global agrifood supply chains. *Nature Food*, 2(10), 758-765. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00360-3>
- Mele, F. D., Kostin, A. M., Guillén-Gosálbez, G., & Jiménez, L. (2011). Multiobjective Model for More Sustainable Fuel Supply Chains. A Case Study of the Sugar Cane Industry in Argentina. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(9), 4939-4958. <https://doi.org/10.1021/ie101400g>
- 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>
- 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>
- Meza-Palacios, R., Aguilar-Lasserre, A. A., Morales-Mendoza, L. F., Pérez-Gallardo, J. R., Rico-Contreras, J. O., & Avarado-Lassman, A. (2019). Life cycle assessment of cane sugar production: The environmental contribution to human health, climate change, ecosystem quality and resources in México. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(7), 668-678. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1579537>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2019). *Descripción de focos y líneas de investigación*. https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_1._descripcion_de_focos_y_lineas_de_investigacion.pdf
- Ministerio Minas y Energía. (2018). *Resolución 40185*. República de Colombia.
- Mohammadi, A., Abbasi, A., Alimohammadlou, M., Eghtesadifard, M., & Khalifeh, M. (2017). Optimal design of a multi-echelon supply chain in a system thinking framework: An integrated financial-operational approach. *Computers & Industrial Engineering*, 114, 297-315. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.019>
- Morales Chávez, 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, 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*, 276, 123305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123305>
- Morales-Chávez, M. M., Soto-Mejía, J. A., & Sarache, W. A. (2016). A mixed-integer linear programming model for harvesting, loading and transporting sugarcane. A case study in Peru. *DYNA*, 83(195), 173-179. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.49490>

- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2015). Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, *105*, 14-27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>
- Muchow, R. C., Higgins, A. J., Rudd, A. V., & Ford, A. W. (1998). Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia: II. Sensitivity to crop age and crop class distribution. *Field Crops Research*, *57*(3), 243-251.
- Mutenurea, M., Čučekb, L., Isafiade, A. J., & Kravanjab, Z. (2016). Synthesis of South Africa's Biomass to Bioethanol Supply Network. *CHEMICAL ENGINEERING*, *52*.
- Mutran, V. M., Ribeiro, C. O., Nascimento, C. A. O., & Chachuat, B. (2020). Risk-conscious optimization model to support bioenergy investments in the Brazilian sugarcane industry. *Applied Energy*, *258*, 113978. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113978>
- Oliveira, J. B., Lima, R. S., & Montevechi, J. A. B. (2016). Perspectives and relationships in Supply Chain Simulation: A systematic literature review. *Simulation Modelling Practice and Theory*, *62*, 166-191. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2016.02.001>
- Ometto, A. R., Hauschild, M. Z., & Roma, W. N. L. (2009). Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *Int J Life Cycle Assess*, *12*.
- Osaki, M. R., & Seleglim Jr, P. (2017). Bioethanol and power from integrated second generation biomass: A Monte Carlo simulation. *Energy Conversion and Management*, *141*, 274-284.
- Osmani, A., & Zhang, J. (2013). Stochastic optimization of a multi-feedstock lignocellulosic-based bioethanol supply chain under multiple uncertainties. *Energy*, *59*, 157-172. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.043>
- Paiva, R. P. O., & Morabito, R. (2009). An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. *Annals of Operations Research*, *169*(1), 117-130. <https://doi.org/10.1007/s10479-008-0428-9>
- Pashangpour, R., Faghihi, F., & Soleymani, S. (2018). Optimized scheduling for electric lift trucks in a sugarcane agro-industry based on thermal, biomass and solar resources. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *15*(11), 2349-2358.
- Pathumnakul S., & Nakrachata-Amon T. (2015). The Applications of Operations Research in Harvest Planning: A Case Study of the Sugarcane Industry in Thailand. *Journal of Japan Industrial Management Association*, *65*(4E), 328-333. <https://doi.org/10.11221/jima.65.328>
- Pelletier, N., Ustaoglu, E., Benoit, C., Norris, G., Rosenbaum, E., Vasta, A., & Sala, S. (2018). Social sustainability in trade and development policy. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *23*(3), 629-639. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1059-z>
- Pereira, R. D., Badino, A. C., & Cruz, A. J. (2020). Framework Based on Artificial Intelligence to Increase Industrial Bioethanol Production. *Energy & Fuels*, *34*(4), 4670-4677.
- Piewthongngam, K., Pathumnakul, S., & Setthanan, K. (2009). Application of crop growth simulation

and mathematical modeling to supply chain management in the Thai sugar industry. *Agricultural Systems*, 102(1-3), 58-66. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.07.002>

Pitakaso, R., & Sethanan, K. (2019). Adaptive large neighborhood search for scheduling sugarcane inbound logistics equipment and machinery under a sharing infield resource system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 158, 313-325. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.001>

Plà, L. M., Sandars, D. L., & Higgins, A. J. (2014). A perspective on operational research prospects for agriculture. *Journal of the Operational Research Society*, 65(7), 1078-1089. <https://doi.org/10.1057/jors.2013.45>

Polo, A., Peña, N., Muñoz, D., Cañón, A., & Escobar, J. W. (2018). Robust design of a closed-loop supply chain under uncertainty conditions integrating financial criteria. *Omega*. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.09.003>

Poltroniere, S. C., Aliano Filho, A., Caversan, A. S., Balbo, A. R., & Florentino, H. de O. (2021). Integrated planning for planting and harvesting sugarcane and energy-cane for the production of sucrose and energy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 105956. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105956>

Prasara-A, J., & Gheewala, S. H. (2016). Sustainability of sugarcane cultivation: Case study of selected sites in north-eastern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 134, 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.029>

Procaña. (2018). *Colombian sugarcane Industry: Description*. <http://www.procana.org/new/quienes-somos/presentacion-del-sector.html>

Qureshi, M. E., Qureshi, S. E., Bajracharya, K., & Kirby, M. (2008). Integrated Biophysical and Economic Modelling Framework to Assess Impacts of Alternative Groundwater Management Options. *Water Resources Management*, 22(3), 321-341. <https://doi.org/10.1007/s11269-007-9164-1>

Qureshi, M. E., Qureshi, S. E., & Wegener, M. K. (2007). Economic implications of alternative mill mud management options in the Australian sugar industry. *Agricultural Economics*, 36(1), 113-122.

Ramezani, M., Kimiagari, A. M., & Karimi, B. (2014). Closed-loop supply chain network design: A financial approach. *Applied Mathematical Modelling*, 38(15-16), 4099-4119. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.02.004>

Ramirez, C. A. M. (2017). *Asocaña*. Sector Agroindustrial de la Caña. <https://www.asocana.org/>

Ramirez, C. A. M. (2021a). *Balance azucarero colombiano Asocaña 2000—2020 (toneladas)*. Asocaña - Sector Agroindustrial de la Caña. <http://www.asocana.org/modules/documentos/5528.aspx>

Ramirez, C. A. M. (2021b). *Informe anual 2019—2020*. Asocaña - Sector Agroindustrial de la Caña. <http://www.asocana.org/modules/documentos/15398.aspx>

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B. P., & Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment. Part 1: Framework, goal and

scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701-720. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005>

Renouf, M. A., Wegener, M. K., & Pagan, R. J. (2010). Life cycle assessment of Australian sugarcane production with a focus on sugarcane growing. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), 927-937. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0226-x>

Reynolds, C., Buckley, J., Weinstein, P., & Boland, J. (2014). Are the Dietary Guidelines for Meat, Fat, Fruit and Vegetable Consumption Appropriate for Environmental Sustainability? A Review of the Literature. *Nutrients*, 6(6), 2251-2265. <https://doi.org/10.3390/nu6062251>

Rivera-Cadavid, L., Manyoma-Velásquez, P. C., & Manotas-Duque, D. F. (2019). Supply Chain Optimization for Energy Cogeneration Using Sugarcane Crop Residues (SCR). *Sustainability*, 11(23), 6565.

Rojas, L. S. B. (2011). *OPORTUNIDADES Y AMENAZAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA* [PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA]. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12377/BuenoRojasLucySikint2011.pdf?sequence=1>

Rosa, W. (Ed.). (2017). *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. En A New Era in Global Health*. Springer Publishing Company. <https://doi.org/10.1891/9780826190123.ap02>

Ross, S. M. (2014). *Introduction to probability models*. Academic press.

Rota, C., Pugliese, P., Hashem, S., & Zanasi, C. (2018). Assessing the level of collaboration in the Egyptian organic and fair trade cotton chain. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1665-1676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.011>

Sahebi, H., Nickel, S., & Ashayeri, J. (2014). Strategic and tactical mathematical programming models within the crude oil supply chain context—A review. *Computers & Chemical Engineering*, 68, 56-77. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.05.008>

Santibañez-Aguilar, J. E., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal planning and site selection for distributed multiproduct biorefineries involving economic, environmental and social objectives. *Journal of Cleaner Production*, 65, 270-294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.004>

Santoro, E., Soler, E. M., & Cherri, A. C. (2017). Route optimization in mechanized sugarcane harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 140-146. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.013>

Saranwong, S., & Likasiri, C. (2017). Bi-level programming model for solving distribution center problem: A case study in Northern Thailand's sugarcane management. *Computers & Industrial Engineering*, 103, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.10.031>

Sarkar, B., Mridha, B., Pareek, S., Sarkar, M., & Thangavelu, L. (2021). A flexible biofuel and bioenergy production system with transportation disruption under a sustainable supply chain network. *Journal*

of *Cleaner Production*, 317, 128079. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128079>

Sartori, M. M. P., de Oliveira Florentino, H., Basta, C., & Leão, A. L. (2001). Determination of the optimal quantity of crop residues for energy in sugarcane crop management using linear programming in variety selection and planting strategy. *Energy*, 26(11), 1031-1040.

Scully, M. J., Norris, G. A., Alarcon Falconi, T. M., & MacIntosh, D. L. (2021). Carbon intensity of corn ethanol in the United States: State of the science. *Environmental Research Letters*, 16(4), 043001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abde08>

Semboloni, F. (2006). The CityDev Project: An Interactive Multi-agent Urban Model on the Web. En J. Portugali (Ed.), *Complex Artificial Environments* (pp. 155-163). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/3-540-29710-3_10

Semenzato, R. (1995). A simulation study of sugar cane harvesting. *Agricultural Systems*, 47(4), 427-437. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(95\)92108-1](https://doi.org/10.1016/0308-521X(95)92108-1)

Seuring, S., & 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>

Shafie, S. M., Othman, Z., & Hami, N. (2020). Optimum location of biomass waste residue power plant in northern region: Economic and environmental assessment. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(1), 150.

Shapiro, A. (2003). Monte Carlo Sampling Methods. En *Handbooks in Operations Research and Management Science* (Vol. 10, pp. 353-425). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(03\)10006-0](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(03)10006-0)

Shukla, M., & Jharkharia, S. (2013). Agri-fresh produce supply chain management: A state-of-the-art literature review. *International Journal of Operations & Production Management*, 33(2), 114-158. <https://doi.org/10.1108/01443571311295608>

Sihombing, L., Latief, Y., Rarasati, A. D., & Wibowo, A. (2018). Utilizing uncertainty management to analyze the uncertainty of toll road land acquisition. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(6), 1221-1228. Scopus.

Simchi-Levi, D., Chen, X., & Bramel, J. (2005). The logic of logistics. *Theory, Algorithms, and Applications for Logistics and Supply Chain Management*.

Sørensen, C. G., & Bochtis, D. D. (2010). Conceptual model of fleet management in agriculture. *Biosystems Engineering*, 105(1), 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.09.009>

Soto-Silva, W. E., González-Araya, M. C., Oliva-Fernández, M. A., & Plà-Aragónés, L. M. (2017). Optimizing fresh food logistics for processing: Application for a large Chilean apple supply chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.020>

Soto-Silva, W. E., Nadal-Roig, E., González-Araya, M. C., & Pla-Aragones, L. M. (2016). Operational

research models applied to the fresh fruit supply chain. *European Journal of Operational Research*, 251(2), 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.046>

Sowlati, T. (2016). Modeling of forest and wood residues supply chains for bioenergy and biofuel production. En *Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining* (pp. 167-190). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-366-9.00008-3>

Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Meuwissen, M. P., & van der Vorst, J. G. (2012). A review on quantitative models for sustainable food logistics management. *International Journal on Food System Dynamics*, 3(2), 136-155.

Standfield, L., Comans, T., & Scuffham, P. (2014). Markov modeling and discrete event simulation in health care: A systematic comparison. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 30(2), 165-172. <https://doi.org/10.1017/S0266462314000117>

Stray, B. J., van Vuuren, J. H., & Bezuidenhout, C. N. (2012). An optimisation-based seasonal sugarcane harvest scheduling decision support system for commercial growers in South Africa. *Computers and Electronics in Agriculture*, 83, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.009>

Sun, F., Aguayo, M. M., Ramachandran, R., & Sarin, S. C. (2018). Biomass feedstock supply chain design—a taxonomic review and a decomposition-based methodology. *International Journal of Production Research*, 56(17), 5626-5659.

Sun, O., & Fan, N. (2020). A Review on Optimization Methods for Biomass Supply Chain: Models and Algorithms, Sustainable Issues, and Challenges and Opportunities. *Process Integration and Optimization for Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00108-9>

Teixeira, E. dos S., Rangel, S., Florentino, H. de O., & de Araujo, S. A. (2021). A review of mathematical optimization models applied to the sugarcane supply chain. *International Transactions in Operational Research*.

Tsolakis, N. K., Keramydas, C. A., Toka, A. K., Aidonis, D. A., & Iakovou, E. T. (2014). Agrifood supply chain management: A comprehensive hierarchical decision-making framework and a critical taxonomy. *Biosystems Engineering*, 120, 47-64. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.10.014>

UN. (2017). United Nations sustainable development agenda. *United Nations Sustainable Development*. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>

UPME. (2018). BOLETÍN ESTADÍSTICO DE MINAS Y ENERGÍA 2016—2018. *Unidad de Planeación Minero Energética*, UPME. Bogotá. https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2018.pdf

Valin, H., Sands, R. D., van der Mensbrugghe, D., Nelson, G. C., Ahammad, H., Blanc, E., Bodirsky, B., Fujimori, S., Hasegawa, T., Havlik, P., Heyhoe, E., Kyle, P., Mason-D'Croze, D., Paltsev, S., Rolinski, S., Tabeau, A., van Meijl, H., von Lampe, M., & Willenbockel, D. (2014). The future of food demand: Understanding differences in global economic models. *Agricultural Economics*, 45(1), 51-67. <https://doi.org/10.1111/agec.12089>

van den Wall Bake, J. D., Junginger, M., Faaij, A., Poot, T., & Walter, A. (2009). Explaining the experience curve: Cost reductions of Brazilian ethanol from sugarcane. *Biomass and Bioenergy*, 33(4), 644-658. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.10.006>

van Eijck, J., Batidzirai, B., & Faaij, A. (2014). Current and future economic performance of first and second generation biofuels in developing countries. *Applied Energy*, 135, 115-141. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.015>

Verweij, B., Ahmed, S., Kleywegt, A. J., Nemhauser, G., & Shapiro, A. (2003). The Sample Average Approximation Method Applied to Stochastic Routing Problems: A Computational Study. *Computational Optimization and Applications*, 24(2), 289-333. <https://doi.org/10.1023/A:1021814225969>

Will M. Bertrand, J., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, 22(2), 241-264.

Wu, D., Baron, O., & Berman, O. (2009). Bargaining in competing supply chains with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 197(2), 548-556.

Yue, D., & You, F. (2014). Game-theoretic modeling and optimization of multi-echelon supply chain design and operation under Stackelberg game and market equilibrium. *Computers & Chemical Engineering*, 71, 347-361. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.08.010>

Yue, D., You, F., & Snyder, S. W. (2014). Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 36-56. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.11.016>

Zahraee, S. M. (2020). Biomass supply chain environmental and socio-economic analysis: 40-Years comprehensive review of methods, decision issues, sustainability challenges, and the way forward. *Biomass and Bioenergy*, 33.

Zandi Atashbar, N., Labadie, N., & Prins, C. (2018). Modelling and optimisation of biomass supply chains: A review. *International Journal of Production Research*, 56(10), 3482-3506. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1343506>

Zheng, X.-X., Liu, Z., Li, K. W., Huang, J., & Chen, J. (2019). Cooperative game approaches to coordinating a three-echelon closed-loop supply chain with fairness concerns. *International Journal of Production Economics*, 212, 92-110. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.011>

Ziolkowska, J. R. (2020). Biofuels technologies: An overview of feedstocks, processes, and technologies. En *Biofuels for a More Sustainable Future* (pp. 1-19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815581-3.00001-4>

Anexo A. Revisión de literatura. Nivel de integración de decisiones y operaciones de la SC de la caña de azúcar basado en la revisión de literatura implementada

Autores	Alcance			Variables de decisión					MD	Observaciones
	Stg	Tc	O	S	C	T	Pcc	I		
Semenzato (1995)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Propone un modelo de simulación para la programación de operaciones y planeación de recursos, minimizando el tiempo entre la quema de caña y el inicio de la cosecha.
Higgins et al. (1998)	-	x	x	x	x	-	-	-	p	El modelo asigna los campos a ser cosechados.
Muchow et al. (1998)	-	x	x	-	x	-	-	-	v	Modelo que determina el número óptimo de cortes de caña.
Higgins (1999)	-	x	x	-	x	-	-	-	p	Aborda limitaciones de recursos para la cosecha y el molino de caña. Sin embargo, no aborda las operaciones
Higgins (2002)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Se propone un modelo de optimización no lineal para programar cosechadoras en un enfoque de sistema de cosecha y transporte de caña de azúcar
Higgins & Muchow (2003)	-	x	-	-	x	-	-	-	p	En orden de maximizar los beneficios de la SC, proponen un modelo que integra las decisiones de operaciones agrícolas e industriales. Solo se analiza una temporada de cosecha
Jiao et al. (2005)	-	x	-	-	x	-	-	-	p	Por medio de un modelo, agrupan cultivadores de caña en zonas de máxima producción de azúcar. Sin embargo, no se aborda el rendimiento de los cultivo y las operaciones agrícolas
Higgins & Laredo (2006)	-	x	-	-	x	x	-	-	p	A través de modelos de optimización se aborda la planificación táctica de las operaciones de cosecha y transporte en la SC del azúcar
Higgins (2006)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Para reducir el tiempo de espera de los tráileres cañero en la entrada de la refinería, un modelo se propone para integrar la cosecha y el transporte de caña desde el punto de vista operacional
Lopez Milan et al. (2006)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Proponen un modelo para asignar el equipo de cosecha a cada uno de los cultivos durante cada uno de los días de la temporada de cosecha. Solo un parámetro es incluido para definir la temporada de cosecha.
Bezuidenhout & (Singels, 2007b)	-	-	-	x	-	-	-	-	v	Desde un enfoque estratégico, un modelo de escala nacional para el pronóstico del desempeño de los cultivos de caña de azúcar, allí se considera la operación de siembra necesaria para mejorar el rendimiento del cultivo
Bezuidenhout & Singels (2007a)	x	-	-	x	-	-	x	-	v	A través de información climática, el modelo propuesto en (Bezuidenhout & Singels, 2007b) fue testeado, también, se simulo la producción de los

Autores	Alcance			Variables de decisión					MD	Observaciones
	Stg	Tc	O	S	C	T	Pcc	I		
										molinos con el desempeño obtenido
Grunow et al. (2007)	-	x	x	-	x	-	-	-	p	Proponen un modelo para la programación de la cosecha, considerando los tiempos de corte y las distancias entre los campos y la refinera. El alcance de planificación es táctico y operativo
Qureshi et al. (2007)	x	x	-	-	-	-	x	-	p	Problemas ambientales y relaciones entre los cultivadores y la refinera de azúcar son evaluadas, sin embargo, no se analiza las operaciones en el cultivo
Le Gal et al. (2008)	-	x	x	-	x	x	-	-	p	Desde una perspectiva táctica y operativa, modelan las operaciones de cosecha y transporte de caña, a fin de evaluar eficiencias al modificar la programación de cosecha de cada uno de los campos durante la temporada de cosecha
Lejars et al. (2008)	-	x	x	-	x	x	-	-	p	Basados en la herramienta de simulación MAGI®, proponen un sistema de soporte a la a decisión para ayudar a los cultivadores y a los ingenios para la planificación de operaciones de manera conjunta. Sin embargo, las operaciones de siembra no son analizadas
Colin (2009)	x	-	-	x	x	-	x	-	v	Propone un modelo estratégico de evaluación para la programación de la siembra de caña de azúcar, considerando las diferentes socas durante el ciclo de vida de la caña
Le Gal et al. (2009)	-	x	x	-	x	x	x	-	p	Proponen un modelo de planificación táctica de suministro de caña considerando la logística diaria entre los actores
Piewthongngam et al. (2009)	-	x	-	x	x	-	-	-	p	Con el objetivo de maximizar la producción de caña de azúcar, proponen un modelo de simulación - optimización el cual permite recomendar, variedad que se debe cultiva, fechas de siembra y cosecha para una temporada de cosecha
De Oliveira Florentino et al. (2011)	x	-	-	-	x	-	-	-	p	Proponen un modelo para la cogeneración de energía eléctrica usando residuos de la cosecha de caña de azúcar; encontrando un plan de cosecha que balancea el costo de la energía requerida y la generada
Kostin et al. (2011)	x	-	-	-	-	x	x	x	p	A través de métodos heurísticos, los flujos de la cadena de abastecimiento son abordados; No se considera la complejidad de las ASC, y tampoco la coordinación entre la siembra y la cosecha
Kostin et al. (2012)	x	-	-	-	-	x	x	x	p	El modelamiento de la SC involucra la incertidumbre de la demanda. Solo se analizan las operaciones del componente industrial
Stray et al. (2012)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Por medio del modelo de ruteo de vehículos se programa la cosecha a corto plazo
Jena & Poggi, (2013)	-	x	x	-	x	x	-	-	p	Planifican las operaciones de siembra y cosecha a un nivel táctico y operativo. También, el modelo evalúa el efecto del periodo de maduración en la programación de la cosecha
Khamjan et al.	x	-	-	-	x	x	-	-	p	Analiza, desde el punto de vista logístico, la

Autores	Alcance			Variables de decisión					MD	Observaciones
	Stg	Tc	O	S	C	T	Pcc	I		
(2013)										localización de puntos de consolidación de caña de azúcar durante el proceso de cosecha y transporte. No se consideran las operaciones agrícolas
Amu, L.G. et al. (2013)	-	-	x	-	x	-	-	-	p	Proponen un modelo de simulación - optimización para coordinar las operaciones de cosecha y transporte de caña a un nivel operacional. No se consideran las operaciones de siembra del cultivo
Jonker et al. (2016)	x	-	-	-	-	x	x	-	p	Proponen un modelo de localización para una bio-refinería desde la perspectiva sostenible, sin incluir las actividades agrícolas
Morales-Chávez et al. (2016)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Proponen un modelo para la programación de la cosecha a un nivel operacional; no se consideran las actividades agrícolas
Saranwong & Likasiri (2017)	x	-	-	-	-	x	x	-	p	Proponen un modelo para la localización de centros de distribución y biorefinerías para cumplir la demanda regional de biocombustibles, no se incluyen las operaciones agrícolas
Kittilertpaisan & Pathumnakul (2017)	x	x	x	x	x	-	-	-	p	A través de un modelo VRP para la programación de la cosechadora de caña, se estima las fechas de siembra y cosecha
Santoro et al. (2017)	-	-	x	-	x	-	-	-	p	Propone un modelo para optimizar la ruta de la cosechadora y mejorar el rendimiento
Matindi et al., (2018)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Proponen un modelo para la programación de las actividades de cosecha y transporte de caña multi-modal
Haj Hasan & Avami (2018)	x	-	-	-	-	x	x	x	p	Desde la perspectiva sostenible, los autores proponen un modelo para la evaluación de la SC de biocombustibles. No considera aspectos de la ASC
de Oliveira Florentino et al. (2018)	x	x	-	x	x	x	-	-	v	Proponen un modelo de optimización y una metaheurística para programar la cosecha, considerando el periodo de maduración y la fecha de siembra, así como, los intereses del ingenio
Pitakaso & Sethanan (2019)	-	-	x	-	x	-	-	-	p	Proponen un modelo de asignación y ruteo de cosechadora mecánica aplicado a pequeños cultivadores de caña. Se maximiza el rendimiento de los cultivos al involucrar la ventana de tiempo de maduración
Junqueira & Morabito (2019)	-	-	x	-	x	x	-	-	p	Proponen un modelo de optimización para la programación de la cosecha y transporte de caña desde la perspectiva operativa, realizando el símil con el problema de secuenciación de lotes de producción en máquinas paralelas
Branco et al. (2019)	x	-	-	-	-	x	x	x	p	Proponen un modelo que calcula la expansión de biorefinerías regionales y los flujos asociados con el fin de cumplir la demanda futura de azúcar y etanol en Brasil
Carvajal et al. (2019)	x	x	-	x	x	x	x	x	v	Modelo para la planificación estratégica y táctica de las operaciones de siembra, levante, cosecha, transporte y procesamiento en la bio-refinería;

Autores	Alcance			Variables de decisión					MD	Observaciones
	Stg	Tc	O	S	C	T	Pcc	I		
										también, se evalúa la factibilidad para un proyecto de inversión
de Oliveira Florentino et al. (2020)	x	x	-	x	x	-	-	-	v	Proponen un modelo para la selección de variedades de caña de azúcar sujeto a las fechas de siembra y de cosecha para un ciclo de vida de la caña

Nota: Alcance de decisión *Stg*: Estratégico, *Tc*: Táctico, *O*: Operacional, **Variables de decisión abordadas en la ASC** *S*: Siembra, *C*: Cosecha, *T*: Transporte, *Pcc*: Producción, *I*: Inventario, **MD**: Modelamiento del desempeño.

Anexo B. Revisión de literatura. Artículos que abordan la incertidumbre en la SC de la caña de azúcar y biocombustibles

Trabajos	S	C	T	Pcc	I	Fuente de incertidumbre	Método
Hahn & Ribeiro (1999)	-	x	x	-	-	Tiempos de transporte	Simulación
de Oliveira Florentino et al (2003)	x	-	-	-	-	Rendimiento de campo	GP
Higgins & Davies (2005)	-	x	x	-	-	Fechas de maduración	Simulación
Bhattacharya (2006)	-	x	-	-	-	Rendimiento de campo	GP
Furlan et al. (2012)	-	-	x	x	-	Tasa de producción biocombustible	Simulación
Kostin et al. (2012)	-	-	x	x	x	Demanda y precio	TSSP-MILP
da Silva & Marins (2014)	-	-	x	x	x	Tasa de producción	Lógica difusa, GP
Faria et al. (2015)	-	x	-	-	-	Tiempos de procesamiento durante la cosecha	Simulación
da Silva et al. (2015)	-	x	-	-	-	Rendimiento del campo	SGP
Pathumnakul & Nakrachata-Amon (2015)	-	x	x	-	-	Rendimiento de campo	TSSP-MILP
Cardoso et al. (2015)	-	-	x	x	-	Rendimiento de campo	Simulación
Adam et al. (2016)	-	-	-	x	-	Tasas de producción	TSSP-GA
Osaki & Selegim Jr (2017)	-	-	-	x	-	Tasas de producción	Simulación
Álvarez-Rodríguez et al. (2017)	-	-	-	x	x	Tasas de producción	PL-PNL-Simulación
Marin et al. (2017)	x	-	-	-	-	Rendimiento de campo	Simulación
Pashangpour et al. (2018)	-	-	x	-	-	Consumo de energía	MILP - Simulación
Carvajal et al. (2019)	x	x	x	x	x	Temporada de cosecha, Rendimiento de campo	Cadena de Markov-TSSP-LP
Matindi et al. (2018)	-	x	x	-	-	Rendimiento materia seca	Simulación-GA
Mutran et al. (2020)	-	-	-	x	-	Tasas de producción	Simulación - MILP
Gilani & Sahebi (2020)	-	-	x	x	x	Precio de ventas	Programación Posibilística
Guo et al., (2020)	-	-	x	x	x	abatecimiento y	Simulación -

Trabajos	S	C	T	Pcc	I	Fuente de incertidumbre	Método
						demanda	MILP

Nota: Variables de decisión abordadas en la ASC S: Siembra, C: Cosecha, T: Transporte, Pcc: Producción, I: Inventario.

Anexo C. Información relacionada con los modelos de Optimización. Conjuntos utilizados en el modelo MAg

Conjunto	Descripción
$e \in E$	Conjunto de edades del cultivo (meses) $E = (1, \dots, 20)$
$c \in C$	Conjunto de socas del cultivo $C = (1, \dots, 5)$
$o \in O$	Conjunto de edades de crecimiento de caña que pueden ser usadas para semilla $O = (1, \dots, 6) \rightarrow O \subset E$
$r \in R$	Conjunto de edades de crecimiento para caña que suministrada a la BR $R = (1, \dots, 10) \rightarrow R \subset E$
$q \in Q$	Conjunto de socas del cultivo habilitadas para producir semilla o ser suministrada a la BR $Q = (1, 2) \rightarrow Q \subset C$
$l \in L$	Conjunto de socas del cultivo que para ser suministrada a la BR $L = (3, 4, 5) \rightarrow L \subset C$
$p \in P$	Conjunto de edades de cultivo permitidas para ser cosechadas como semilla $P = (7, \dots, 10) \rightarrow P \subset E$
$w \in W$	Conjunto de edades de cultivo permitidas para ser cosechadas para suministrar la BR $P = (11, \dots, 15) \rightarrow W \subset E$
$y \in Y$	Conjunto de edades de cultivo que excede el punto máximo de madurez $Y = (16, \dots, 20) \rightarrow Y \subset E$
$t \in T$	Horizonte de planeación del diseño de la SBSC en meses $t = (1, \dots, 240)$
$ty \in Ty$	Horizonte de planeación del diseño de la SBSC en años $t = (1, \dots, 20)$
$tm \in Tm_{ty}$	Conjunto de meses incluidos en cada año del horizonte de planificación
$InvS \in Ty$	Conjunto de periodos del horizonte de planificación pertenecientes a la fase de inversión
$ProS \in Ty$	Conjunto de periodos del horizonte de planificación pertenecientes a la fase de Operación
$s \in S$	Conjunto de escenarios aleatoriamente generados
$p \in P$	Conjunto de elementos producidos en la Biorefinería

Anexo D. Información relacionada con los modelos de Optimización Parámetros utilizados en el MAg

Parámetros	Descripción	Unidades
BSD	Fecha de inicio de operación de la BR	mes
DR	Tasa de descuento para obtener el VPN	%
EPR	Tasa de producción de biocombustible	L/t
EP_t	Precio de la caña de azúcar basado en el precio del biocombustible para el mes t	\$/t
$EY_{t,c}^s$	Efecto de la incertidumbre sobre el rendimiento del cultivo para cada periodo t , soca c para el escenario s	t/ha
IDE	Gasto mensual indirecto de la operación agrícola	\$/ha
$ISA_{e,c}$	Cultivo de caña de azúcar inicial, usado como semillero por edad e y soca c	ha
LRC_t	Costo mensual de arrendar una hectárea para el desarrollo del cultivo	\$/ha
LIC_t	Costo de inversión en compra de una hectárea para el desarrollo del cultivo	\$/ha
MHS_t^s	Días de operación disponibles durante de la temporada de cosecha para el mes t para el escenario s	ha
MH_t	Capacidad máxima ofrecida por el equipo de cosecha de operación para el mes t para el escenario s	ha
MS_t	Capacidad máxima ofrecida por el equipo de siembra para el mes t para el escenario s	ha
OHC	Costo de operación sobre la actividad de cosecha	\$/t
$PCSh$	Costo de penalización del faltante de suministro	\$/L
PCP	Costo de penalización de caña descartada por exceder el periodo de madurez	\$/L
RRC_t	Tasa de adaptabilidad del cultivo durante el mes t	%
SCC	Costo de inversión para la operación de siembra	\$/ha
$SCH_{e,c}$	Rendimiento del cultivo de caña de azúcar en función del edad e y la soca c	t/ha
SCS	Cantidad de semilla requerida para sembrar una hectárea de caña de azúcar	t/ha
$SD_{t,s}$	Suministro de caña de azúcar mensual (t) requerido por la BR para el escenario s	t/mes
WHC	Costo operativo de cosechar caña descartada por retraso en la construcción de la BR	\$/ha
μ_j	Tasa de producción del producto final j por tonelada de caña procesada	Und/t

**Anexo E. Información relacionada con los modelos de Optimización
Variables de decisión utilizados en el modelo MAG**

Variable	Descripción	Unidades
$X_{t,e,c}$	Inventario de cultivo (área) de caña de azúcar de edad e y soca c durante el mes t	ha
$Harvest_{t,e,c}$	Área de cosechada de edad e y soca c durante el mes t	ha
HC_t	Cantidad de caña cosechada para suministrar al BR durante el mes t	t
$CD_{t,s}$	Cantidad de caña descartada por exceder el máximo nivel de madurez durante el mes t	t
$Planting_t$	Área sembrada durante el mes t	ha
$CPB_{t,s}$	Cantidad de caña procesada por la BR durante el mes t	t
$CP_{t,s}$	Cantidad de caña descartada por retraso en la construcción de la BR durante el mes t	t
$CS_{t,s}$	Caña de azúcar faltante en la BR durante el mes t	t
$Area_t$	Área utilizada por el cultivo de caña de azúcar durante el mes t	ha
$PLand_t$	Área de tierra adquirida (comprada) al inicio del mes t	ha
$Production_{t,s}^j$	Cantidad de producto final j producido en la Biorefinería durante el periodo t bajo el escenario s	Und/Año
$RLand_t$	Área de tierra adquirida (arrendada) al inicio del mes t	ha
$ILand$	Área total arrendada al final del mes t	ha
$Land_t$	Área total de tierra (comprada) al final del mes t	ha
$Odays_{t,s}$	Días totales operativos en la BR durante el mes t	día

Anexo F. Información relacionada con los modelos de Optimización. Parámetros utilizados en la MABV y MABE

Parámetros	Descripción	Unidades
ACS	Tasa de amortización del cultivo para cada soca cosechada	\$/ha
AE	Gastos administrativos de la operación agrícola	\$/ha
AMI	Inversión en maquinaria agrícola realizada cada 5 años	\$/ha
BDI_{ty}	Porcentaje de ejecución anual de la inversión de la biorefinería durante el periodo de inversión	%
BPI	Inversión total en la biorefinería	\$
CAD_{ty}	Porcentaje de ejecución anual de la inversión en el costo de auditoría de la construcción durante la fase de inversión	%
CAC	Costo de auditoría de la construcción de la biorefinería	\$
CE	Tasa de rendimiento esperado de los accionistas por invertir en la empresa	%
CFD_{ty}	Porcentaje de ejecución anual de las inversiones en las obras complementarias a la BR durante el periodo de inversión	%
CFI	Inversión en obras complementarias	\$
CIC	Costo de los insumos químicos	\$/gls
DLC	Costo mensual de mano de obra directa de las operaciones agrícolas	\$/ha
DR	Tasa de descuento anual	%
$EY_{t,c}^s$	Efecto de la incertidumbre sobre el rendimiento de la caña de azúcar durante el mes t y la soca c para el escenario s	t/ha
EP_t	Precio de venta del etanol para cada mes t	\$/l
EPR	Tasa de producción en litros por tonelada de caña procesada	L/t
IOE	Gasto mensual operacional en la biorefinería	\$/gls
$ISA_{a,r}$	Área inicial usada como semillero, por edad e y por soca c	ha
ITD_{ty}	Porcentaje de ejecución anual para la inversión en tecnología de la información (IT) durante el periodo de inversión	%
ITI	Inversión total en tecnologías de la información (IT)	\$
$LandI_t$	Land investment cost in month t	\$/ha
LRC_t	Costo de arrendamiento mensual durante el mes t	\$/ha-mes
$LTGP$	Periodo de gracia deuda largo plazo	%/Año
$LTIR$	Tasa de interés de deuda a largo plazo	%/Año
$LTMP$	Máximo periodo de deuda para las deudas a largo plazo	Año
MH_t	Capacidad máxima de cosecha usando el equipo disponible durante el mes t	ha/mes
MS_t	Capacidad máxima de siembra usando el equipo disponible durante el mes t	ha/mes
MCO	Costo mensual de mantenimiento del cultivo	\$/ha
MHS_t^s	Tiempo de operación máximo (en días) durante cada periodo durante la temporada de cosecha para el periodo s	días/mes
MLC	Ciclo de vida de la maquinaria agrícola	Año
MTX	Porcentaje mínimo del patrimonio para calcular la base de impuesto de renta	%
NLC	Costo de la gasolina usada para desnaturalizar el bioetanol producido	\$/gls
OHC	Costo de operación de la cosecha	\$/ha
PCP_t	Costo de penalización de la caña que excede el periodo de maduración	\$/t
$PCSh_t$	Costo de penalización de la demanda insatisfecha durante el periodo t	\$/l
PLC	Periodo máximo de depreciación de la propiedad, planta y equipo	Año

$PPEI$	Inversión ejecutada en propiedad, planta y equipo durante el periodo de inversión	\$
RRC_t	Tasa de adaptabilidad del cultivo durante el periodo t	%/mes
$SCH_{e,c}$	Cantidad de caña cosechada por edad e y soca c	t/ha
SD_t^s	Suministro requerido de caña de azúcar en la BR durante el periodo t para el escenario s	t/mes
SCC	Inversión realizada durante la operación de siembra en el periodo de inversión	\$/ha
SCO	Inversión realizada durante la operación de siembra en el periodo de operación	\$/ha
SCS	Cantidad de semilla requerida para sembrar una hectárea de caña de azúcar	t/ha
$STGP$	Periodo de gracia de la deuda a corto plazo	Año
$STIR$	Tasa de interés de la deuda a corto plazo	%/Año
$STMP$	Periodo máximo de la deuda a corto plazo	Año
TXR	Tasa de impuesto de renta	%/year
UPL	Cantidad máxima de tierra disponible para compra	ha
URL	Cantidad máxima de tierra disponible para arrendamiento	ha
WCC	Costo del agua consumida en el proceso de producción	\$/gal
WHC	Costo operativo de cosecha de caña descartada	\$/ha

Anexo G. Información relacionada con los modelos de Optimización. Variables de decisión utilizadas en los modelos MABV y MABE

Variable	Descripción	Unidades
$Cash_{ty,s}$	Flujo de caja al final del año ty para el escenario s	\$/year
$COGS_{ty,s}$	Costos de producción neto al final del periodo ty para el escenario s	\$/year
$Div_{ty,s}$	Dividendo pagado al final del periodo ty para el escenario s	\$
$DPR_{ty,s}$	Depreciación al final del periodo ty para el escenario s	\$
$EQ_{ty,s}$	Patrimonio total al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$EBIT_{ty,s}^{+/-}$	Utilidad antes de intereses e impuestos al final del periodo ty para el escenario s (variable libre)	\$/Año
$FA_{ty,s}$	Inversión acumulada en activos fijos al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$FAI_{ty,s}$	Nueva inversión en activos fijos al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$FABP_{ty,s}$	Inversión en la Biorefinería al final del periodo ty para el escenario s	\$
$FALand_{ty,s}$	Inversión en nuevos predios para el cultivo al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$FAMch_{ty,s}$	Inversión en maquinaria agrícola al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$FCE_{ty,s}$	Flujo de caja libre al final del periodo ty para el escenario s	\$
$IC_{ty,s}$	Activo total al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$IL_{ty,s}^{+/-}$	Utilidad antes de impuestos al final del periodo ty para el escenario s (variable libre)	\$/Año
$IP_{ty,s}$	Intereses de deudas al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$LTL_{ty,s}$	Total deudas largo plazo al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$NE_{ty,s}$	Utilidades acumuladas al final del periodo ty para el escenario s	\$
$NIS_{ty,s}$	Capitalización realizada por los accionistas al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$NLTL_{ty,s}$	Nueva deuda a largo plazo al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$NOPAT_{ty,s}^{+/-}$	Utilidad operativa neta de impuestos al final del periodo ty para el escenario s (variable libre)	\$/Año
$NSTL_{ty,s}$	Nueva deuda a corto plazo al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$NTS_{ty,s}$	Ventas netas al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$PCA_{ty,s}$	Costo de producción de la operación agrícola al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$PCI_{ty,s}$	Costo de producción de la biorefinería al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$PLTL_{ty,s}$	Pago de amortización de deuda a largo plazo al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$PSTL_{ty,s}$	pago de amortización de deuda a corto plazo al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$STL_{ty,s}$	Deuda total a corto plazo al final del periodo ty para el escenario s	\$/year
$TC_{ty,s}$	Costo total de transporte y otros costos agrícolas al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año
$TX_{ty,s}$	Impuesto de renta pagado al final del periodo ty para el escenario s	\$/Año