

Planeación de una cadena de suministros resiliente y sostenible: Un caso de estudio en la
industria de productos lácteos

Ilia Juliana Rivera Diaz

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Juan Felipe Reyes Rodríguez

PhD. Administración de Empresas

Codirectores

Andrés David González Huertas

Ph.D. Ingeniería con Énfasis en Investigación de Operaciones

Nicolás Clavijo Buriticá

Ph.D (c). Ingeniería y Gestión Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedico esta tesis, resultado de muchos esfuerzos, a mis padres. A Doris Diaz, mi mamá, por ser mi roca, por siempre estar para mí y llenarme de tanto amor aun cuando creí no merecerlo. A German Rivera, mi papá, por ser la brújula de nuestro hogar, siempre marcando nuestro norte y recordándonos de las prioridades y las cosas por las que vale la pena luchar. Gracias a ellos, por su ejemplo y su apoyo incondicional, por su amor y por los valores que han forjado en mí.

Dedico esta tesis a toda mi familia, a mi abuela Cenovia, quien cultivó desde pequeña mi curiosidad por muchos temas, a dejarme asombrar por las maravillas del mundo, a disfrutar cada pequeño placer como si fuera el último; a mi abuelo Alvaro, por demostrarme lo que es un amor profundamente incondicional, por acercarme a Dios y enseñarme a confiar en él; a mi hermana Priscila, por ser todo lo que no soy, por su paciencia y su ternura, por ser mi compañía; a mis tíos, en especial mi tío Julián y mi tía Mariela, por ser mis segundos padres, siempre creer en mis capacidades aun cuando yo dudo de mí misma, por enseñarme a quererme con todo y defectos, y por darme tantas herramientas para navegar las olas de esta vida.

“It takes a village to raise a child”, o “se necesita un pueblo para criar un niño”, y tengo la suerte de poder decir que tengo el mejor pueblo del mundo a mi lado, acompañándome en cada paso del camino, animándome a siempre dar lo mejor de mí, levantándome en mis caídas, celebrando mis victorias, y más importante que todo, estando ahí para mí.

Los amo infinitamente.

Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de personas y momentos que marcaron mi carrera universitaria. Es el resultado del día en que Nicolás me encontró llorando en las escaleras de biblioteca porque creí que no sería capaz con la carrera, y con decirme que estaría ahí para mí, lo arregló todo. Es el resultado del día en que conocí a Mafe, y me hizo entender que sacar buenas notas en la universidad no es el único logro elogiado. Es el resultado de hablar con Santi y con Pinto, escuchar sobre sus sueños y proyectos, para entender que no se tiene seguridad de lograr las cosas solo con intentarlo, pero no intentarlo es seguridad de que no se van a lograr las cosas. Es el resultado del día que Jackson me llamó solo para animarme a no darme por vencida con mis objetivos de intercambio. Es el resultado de Edgar, animándome a darlo todo hasta el último momento, y de inspirarme con su vocación por su trabajo. Es el resultado de Jime, ayudándome a salir de mis propias barreras mentales y valorar mi esfuerzo. Es el resultado de todas mis amistades, enseñándome a disfrutar del camino, a vivir sin prisa y con una sonrisa. Finalmente, es el resultado de la paciencia y acompañamiento de los profesores Nicolás, Andrés y Juan, a quienes agradezco infinitamente por creer en mí, por su direccionamiento y por animarme a apuntar alto.

Esta tesis es el resultado de muchas personas que he tenido la suerte de conocer, de compartir un suspiro de vida y que no se alcanzan a imaginar cómo impactaron en mí.

A todos, gracias.

Tabla De Contenido

Introducción	13
1. Contexto Del Problema	16
2. Objetivos.....	19
2.1. Objetivo General.....	19
2.2. Objetivos Específicos.....	19
3. Revisión De Literatura.....	20
3.1. Análisis Bibliométrico	20
3.2. Análisis Preliminar De La Literatura.....	30
4. Marco Teórico	41
4.1. Cadena De Suministro	41
4.2. Resiliencia En Cadenas De Suministro.....	41
4.3. Sostenibilidad En Cadenas De Suministro	42
4.4. Modelamiento Matemático Y Simulación De Disrupciones En Cadenas De Suministro.	43
5. Metodología.....	45
5.1. Revisión De Literatura.....	46
5.2. Descripción Y Análisis Del Caso De Estudio.....	46
5.3. Modelo Matemático Y Generación De Escenarios Disruptivos	46
5.4. Resultados Y Conclusiones.....	46

6.	Descripción Del Caso De Estudio: Laktoland S.A.S.....	48
6.1.	Proveedores.....	49
6.2.	Planta De Procesamiento	52
6.3.	Clientes	53
6.4.	Emisiones.....	55
6.5.	Limpieza Y Ordenamiento De Datos.....	56
7.	Modelo Matemático.....	58
7.1.	Descripción De La Situación Problema De Optimización	58
7.2.	Parámetros Y Variables Generales	59
7.3.	Caso A: Minimización De Costos.....	62
7.4.	Caso B: Minimización De Emisiones De Co2.....	63
7.5.	Restricciones Generales	65
7.6.	Indicadores Clave.....	66
8.	Escenarios Disruptivos	67
9.	Resultados Y Análisis.....	70
9.1.	Configuración Bajo Condiciones Normales	70
9.2.	Configuración Ante Escenarios Disruptivos.....	74
9.3.	Configuración Resiliente	77
9.4.	Observaciones Generales	84

9.5. Propuesta Final.....	86
10. Conclusiones	89
11. Recomendaciones	91
Referencias Bibliográficas	92

Lista de tablas

Tabla 1 Cumplimiento de objetivos del proyecto	15
Tabla 2 Sinónimos de palabras clave	20
Tabla 3 Ecuación de búsqueda y resultados obtenidos	22
Tabla 4 Indicadores de resiliencia y sus dimensiones	33
Tabla 5 Resumen de trabajos relacionados	37
Tabla 6 Oferta y costo de materia prima por proveedor	50
Tabla 7 Costo por kilometro recorrido según cada tipo de vehículo, a cada proveedor	50
Tabla 8 Capacidad en litros de cada vehículo en el arco de abastecimiento	51
Tabla 9 Costos asociados a mano de obra en la planta de procesamiento	53
Tabla 10 Demanda mensual en unidades de leche	54
Tabla 11 Disponibilidad, capacidad y máximo de viajes permitidos por tipo de vehículo	55
Tabla 12 Costos asociados al transporte de distribución	55
Tabla 13 Emisiones de CO2 emitidas por tipo de vehículo	56
Tabla 14 Conjuntos del modelo	60
Tabla 15 Parámetros de entrada y escalares	60
Tabla 16 Variables del modelo	62
Tabla 17 Escenarios generados con sus respectivas disrupciones en cada arco	68
Tabla 18 Resultados de variables en caso A y B	70
Tabla 19 Resultados de las funciones objetivo de modelos resilientes ante disrupciones en escenario 9 vs. Contexto normal	84
Tabla 20 Flujos de materia prima antes de disrupciones en el caso B	85
Tabla 21 Promedio de flujos de materia prima después de disrupciones en el caso B.....	85

Lista de figuras

Figura 1 Mapa de producción de leche en Colombia (2014)	16
Figura 2 Número de publicaciones por año, comparación entre Scopus y WOS	22
Figura 3 Mapa VOSviewer All Keywords	23
Figura 4 Tipos de documentos encontrados en Scopus (2022)	24
Figura 5 Áreas de interés predominantes, tomado de WOS (2022)	25
Figura 6 Número de publicaciones por país, tomado de Scopus (2022) y WOS (2022)	25
Figura 7 Entidades con mayor número de investigaciones financiadas, tomado de Web of Science (2022)	26
Figura 8 Autores con más publicaciones, tomado de Scopus (2022)	26
Figura 9 Autores con más publicaciones, tomado de WOS (2022)	27
Figura 10 Proceso de selección de documentos	28
Figura 11 Metodología Eco-Indicator 99	35
Figura 12 Triple bottom line y algunos de sus indicadores	43
Figura 13 Metodología propuesta	45
Figura 14 Representación gráfica de la cadena de valor del caso de estudio	48
Figura 15 Ubicación geográfica de los eslabones principales de la cadena de suministros	49
Figura 16 Ubicación geográfica de los proveedores y las rutas predeterminadas para llegar a cada uno	51
Figura 17 Diagrama de procesamiento de la leche en planta.....	52
Figura 18 Ubicación geográfica de clientes mayoristas	54
Figura 19 Enfoque metodológico para la obtención de resultados	59
Figura 20 Tipo de vehículos usados en el arco de abastecimiento	71

Figura 21 Tipo de vehículos usados en el arco de distribución	72
Figura 22 Comparación de proveedores y cantidades adquiridas en el arco de abastecimiento .	73
Figura 23 Perdida de ventas ante disrupciones	75
Figura 24 Costo total vs. Emisiones en el caso A	75
Figura 25 Costo total vs. Emisiones en el caso B	76
Figura 26 Costo total vs. Emisiones en el caso A (modelo resiliente)	78
Figura 27 Costo total vs. Emisiones en el caso B (modelo resiliente)	78
Figura 28 Costo y emisiones, caso A, escenarios 39 vs. 40	80
Figura 29 Costo total vs. Emisiones en el caso A, peores casos.....	81
Figura 30 Costo total vs. Emisiones en el caso B, peores casos.....	83

Lista de apéndices

(Ver apéndices adjuntos pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Revisión de Literatura

Apéndice B. Datos paramétricos del caso de estudio

Apéndice C. Programación de Caso A en GAMS: Condiciones normales

Apéndice D. Programación de caso B en GAMS: Condiciones normales

Apéndice E. Matriz de escenarios

Apéndice F. Resultados ante escenarios

Apéndice G. Artículo publicable

Resumen

Título: Planeación de una cadena de suministros resiliente y sostenible: un caso de estudio en la industria de productos lácteos*

Autor: Iliá Juliana Rivera Díaz.**

Palabras clave: Cadena de suministro, Disrupción, Modelo de Optimización, Resiliencia, Sostenibilidad.

Descripción:

Las cadenas de suministro son parte esencial de la planeación y estrategia corporativa, ya que envuelven y afectan a todos los diferentes grupos de decisión mientras aseguran la continuidad de las operaciones de la organización. Sin embargo, existe una brecha en el estudio cuantitativo de la resiliencia como el atributo más importante a la hora de enfrentar escenarios que interrumpen las actividades de las cadenas de suministro. A su vez, las estrategias proactivas que buscan incrementar el nivel de resiliencia permiten las redundancias en los recursos con el fin de aumentar la flexibilidad de respuesta de la cadena, que, consecuentemente, atenta contra los parámetros de sostenibilidad de la organización. Lo anterior, en el mercado competitivo actual y dadas las expectativas de los consumidores, puede afectar negativamente el posicionamiento en el mercado y ventaja competitiva de la empresa. El presente artículo tiene como objetivo abordar dicha brecha de estudio en el área de la resiliencia en cadenas de suministro. Además, se busca explorar la relación resiliencia-sostenibilidad en el proceso de planeación de una cadena de suministro por medio de la construcción de un modelo a partir de un caso real de la industria láctea y una Programación Lineal de Enteros Mixta. A partir de esta se realiza un análisis dinámico de los *tradeoffs*, antes y después de ser sometida a escenarios disruptivos, para finalmente proponer una configuración de cadena de suministros resiliente y sostenible. Finalmente, se concluye que existe una mejora en el desempeño ambiental y social de la cadena de suministro a partir de una inversión económica, la cual, a su vez, puede ser minimizada por medio de estrategias proactivas enfocadas en las redundancias.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Juan Felipe Reyes Rodríguez. Codirectores: Nicolás Clavijo Buriticá, Andrés González Huertas.

Abstract

Title: Planeación de una cadena de suministros resiliente y sostenible: un caso de estudio en la industria de productos lácteos.*

Autor: Ilia Juliana Rivera Diaz.**

Keywords: Disruption, Optimization Model, Resilience, Supply Chain, Sustainability.

Description:

Supply chains are an essential part of corporate planning and strategy since they involve and affect all the different decision-making groups, while ensuring the continuity of the organization's operations. However, there is a gap in the quantitative study of resilience as the most important attribute when facing scenarios that interrupt supply chain activities. In turn, proactive strategies that seek to increase the level of resilience allow redundancies in resources in order to increase the flexibility of the chain's response, which, consequently, threatens the sustainability parameters of the organization. The foregoing, in today's competitive market and given consumer expectations, may negatively affect its market position and competitive advantage. This article aims to address this study gap regarding resilience in supply chains. In addition, it aims to explore the resilience-sustainability relationship in the planning process of a supply chain, through the modelling of a study case from the dairy industry and a Mixed Integer Linear Programming. From this, a dynamic analysis of *tradeoffs* is carried out, before and after being subjected to disruptive scenarios, to finally propose a resilient and sustainable supply chain configuration. Finally, it is concluded that there is an improvement in the environmental and social performance of the supply chain with an acceptable economic investment, which, in turn, can be minimized through proactive strategies focused on the use of redundancies.

* Bachelor's Thesis

** Physical-mechanical Engineering Faculty, School of Industrial and Business Studies. Director: Juan Felipe Reyes Rodríguez. Codirectors: Nicolás Clavijo Buriticá, Andrés González Huertas.

Introducción

La dinámica actual de la industria y los procesos que le atañen, se encuentran en constante cambio tanto de innovación como de mejora, adaptándose así a las necesidades y demandas del cliente final. Dichos procesos se fundamentan en la continuidad, eficiencia y sustentabilidad de la cadena de suministros (CS), cuya importancia es transversal para todas las áreas de una organización. A su vez, el desempeño de la cadena de suministro es susceptible a las interacciones entre factores controlables e incontrolables del entorno en que se despliegan sus procesos. Consecuentemente, es indispensable contar con un diseño estratégico de la CS, de forma que se amortigüe el impacto que dichos factores puedan tener en el correcto flujo. El diseño de la CS debe ser, por lo tanto, flexible, resiliente y sustentable.

Adicional a la resiliencia, con miras a diseñar o planear una cadena de suministros con impacto positivo en la continuidad de las operaciones (fiabilidad), también es relevante considerar la sostenibilidad. Una cadena de suministros sostenible debe tener en cuenta la búsqueda de beneficios en un Triple Balance (TBL), el cual involucra el desempeño de la empresa en términos sociales (Responsabilidad Social Empresarial - RSE) y ambientales, mientras se cumplen con las condiciones económicas para su operación presente y futura.

Estos dos conceptos, resiliencia y sostenibilidad, son congruentes según la Guía: “Sustentabilidad de la Cadena de Suministro”, desarrollada por las Naciones Unidas en el marco del Pacto Global, donde es imperativo realizar una administración de los riesgos de las operaciones de la organización ya que se debe minimizar la interrupción del comercio o transporte, por impactos en el medio ambiente, sociales y económicos, (United Nations, 2010) si se propone que la Cadena de Suministro en cuestión sea considerada sostenible.

Con esto en mente, el presente trabajo de investigación tiene como objeto de estudio una empresa del sector lácteo, Laktoland S.A.S, que puede verse afectada por eventos disruptivos cuya atención, podría tener implicaciones en la sustentabilidad de la cadena. La información paramétrica de la organización, y la naturaleza de su sector industrial, el cual contempla múltiples retos y barreras debido a la alta dispersión geográfica de las partes involucradas en su actividad productiva, sumado a un sistema vial nacional ineficiente, y la condición perecedera de sus productos lácteos. En su conjunto, lo anterior hace difícil su control y sobre todo “impide la formalización de la cadena de valor del sector” (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). Así pues, es el escenario de estudio ideal para modelar, estudiar y plantear estrategias para la resiliencia y sostenibilidad de la cadena de suministro láctea. Consecuentemente, con este estudio, las organizaciones del sector podrán asociar los impactos en sostenibilidad a las operaciones de su cadena productiva, aportando al fortalecimiento de sus estrategias y responsabilidad.

Finalmente, se formuló el presente proyecto de investigación titulado: "Planeación de una cadena de suministros resiliente y sostenible: Un caso de estudio en la industria de productos lácteos."; liderado por el grupo de trabajo en Agri-food Supply Chain, de la escuela de Ingeniería Industrial y de Sistemas de la Universidad de Oklahoma (USA) ; el instituto INESC TEC asociado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Oporto (Portugal); y en alianza con el grupo de investigación OPALO de la Universidad Industrial de Santander. Su propósito es aportar al proceso de planeación de cadenas de suministro y así explotar esta oportunidad de ventaja competitiva para las cadenas agroalimentarias en Colombia, por medio del modelamiento y análisis de alternativas para hacer del sector lácteo, resiliente y sostenible. Y, como consecuencia,

contribuir al cumplimiento de los ODS 9, 11 y 12 específicamente, y al desarrollo económico del país.

Tabla 1

Cumplimiento de objetivos del proyecto

Objetivo	Cumplimiento
Realizar una revisión de literatura con el fin de establecer los criterios, métricas e índices relevantes en relación con la resiliencia y sostenibilidad en cadenas de suministro.	Capítulo 4
Describir la cadena de suministros del sector lácteo y puntos claves asociados a su desempeño en Colombia con el fin de identificar oportunidades de mejora.	Capítulo 1
Modelar una cadena de suministros de productos lácteos a partir de un caso de estudio en Colombia, bajo enfoques de simulación y optimización, involucrando medidas de resiliencia y sostenibilidad a fin de experimentar escenarios disruptivos en infraestructura vial.	Capítulo 6-8
Evaluar resultados experimentales mediante análisis mixto a fin de proponer alternativas para gestión y operación de una cadena de suministros para productos lácteos en Colombia.	Capítulo 9
Proponer estrategias para mejorar la resiliencia en la cadena de suministros de productos lácteos (caso de estudio), considerando sus impactos en sostenibilidad.	Capítulo 9
Elaborar un artículo de carácter publicable con los resultados obtenidos de la investigación realizada.	Ver apéndice G

1. Contexto del problema

En el año 2021 se llegaron a registrar 1.003 bloqueos viales por manifestaciones sociales en el país (Portafolio, 2021). Entre los años 2018-2022 no hubo más de seis meses sin estallidos sociales. Adicional a esto, de acuerdo con el diario Portafolio (2022), el 45% de las carreteras en Colombia están en mal estado, y alrededor del 19% no tienen asfalto. Además, el 0.65% de las vías están categorizadas como “muy mal estado”, lo que implica que existe un alto riesgo para los conductores que las transitan.

Figura 1

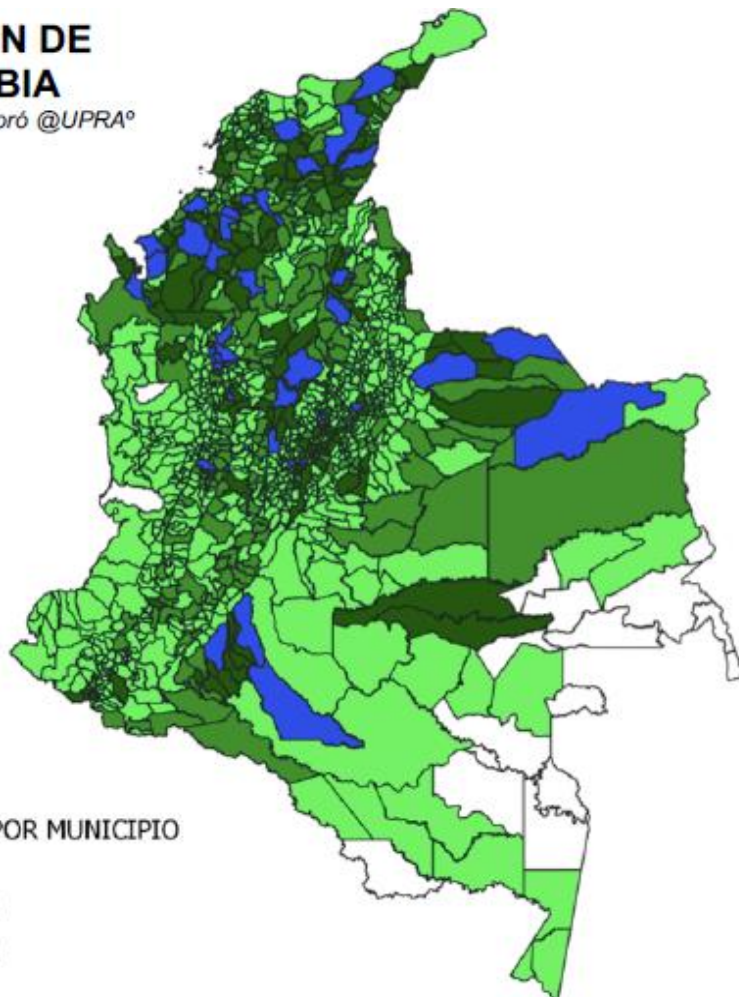
Mapa de producción de leche en Colombia (2014).

MAPA PRODUCCION DE LECHE EN COLOMBIA

FUENTE: DANE-CNA 2014, Elaboró @UPRA^o

PRODUCCIÓN DE LECHE POR MUNICIPIO

- 0 - 15000 lts/día
- 15000 - 35000 lts/día
- 35000 - 70000 lts/día
- > 70000 lts/día



Para terminar de recrudescer la realidad colombiana, la emergencia climática por las lluvias que han durado todo el año 2022, no parece dar tregua, y los principales afectados son los productores de alimentos y materias primas. De hecho, el delegado del gobierno para enfrentar esta emergencia, Javier Pava, advierte de una inminente crisis alimentaria (El País, 2022). Esto no solo explica el aumento en derrumbes y desastres naturales, sino que alerta sobre la crisis climática global y la inmediatez con que se deben tomar medidas que minimicen nuestra huella ecológica.

Dentro de las principales víctimas está el gremio de productores de leche. Su cadena de suministro es caracterizada por su informalidad y heterogeneidad como se puede observar en la figura 1. Dada su condición rural y el mal estado de las vías, el acceso a este alimento es complejo, además de tener que trabajar contra reloj por su naturaleza perecedera. Sin embargo, es una actividad de gran impacto social, ya que el 48% de la producción proviene de pequeños productores y 63% de los productores se consideran pobres (Ministerio de Agricultura, 2020).

Finalmente, los costos y viabilidad económica de la cadena se ven en constante presión a pesar de que el consumo de leche aumenta sustancialmente en el país y en el mundo. Y en materia de sostenibilidad, la actividad ganadera en sí misma genera una huella de ecológica significativa, a pesar de los esfuerzos por implementar sistemas de pastoreo silvopastoril, los cuales podrían reducir dicha huella entre un 12% y 22% (Ministerio de Agricultura, 2020).

Ante este panorama es esencial concentrar esfuerzos en la operación de las cadenas de suministro de lácteos, buscando incrementar su resiliencia y sostenibilidad. Con esto en mente, se identifica una brecha significativa entre la teoría y el modelado matemático, lo que permitiría aproximaciones y análisis cuantitativos, así como la exploración de nuevas técnicas e indicadores que permitan explorar las estrategias a nivel operacional y táctico.

Con base en lo anterior se buscó realizar el presente proyecto de investigación con el fin de aportar a la planeación de cadenas de suministro resilientes y sostenibles (CSRS), al análisis de objetivos incompatibles y la posterior toma de decisiones a nivel operacional, táctico y estratégico. Este proyecto se desarrolló en asociación con una empresa mediana del sector lácteo; el problema es de naturaleza táctica-operacional, por lo que se estudió una cadena de suministro con configuración fija, cuyos proveedores son altamente dispersos y sujetos a una infraestructura vial pobre y propensa a bloqueos. Se modeló y realizaron simulaciones de escenarios con interrupciones para evaluar su resiliencia; y así, obtener resultados que permitieron proponer una planeación acorde al caso de estudio, al igual que una propuesta de decisiones y estrategias en el largo plazo según sea pertinente.

La presente investigación contribuyó y estableció un antecedente en el campo del modelamiento cuantitativo de cadenas de suministro resilientes y sostenibles en alimentos perecederos. Para el sector empresarial, es un referente con respecto a las estrategias de planeación de cadenas de suministro para fortalecer su sostenibilidad y resiliencia.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Proponer un plan de abastecimiento y distribución para una cadena de suministro de productos lácteos, mediante técnicas analíticas, para mejorar la resiliencia y evaluar su impacto en sostenibilidad.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar una revisión de literatura con el fin de establecer los criterios, métricas e índices relevantes en relación con la resiliencia y sostenibilidad en cadenas de suministro.
- Describir la cadena de suministros del sector lácteo y puntos claves asociados a su desempeño en Colombia con el fin de identificar oportunidades de mejora.
- Modelar una cadena de suministros de productos lácteos a partir de un caso de estudio en Colombia, bajo enfoques de simulación y optimización, involucrando medidas de resiliencia y sostenibilidad a fin de experimentar escenarios disruptivos en infraestructura vial.
- Evaluar resultados experimentales mediante análisis mixto a fin de proponer alternativas para gestión y operación de una cadena de suministros para productos lácteos en Colombia.
- Proponer estrategias para mejorar la resiliencia en la cadena de suministros de productos lácteos (caso de estudio), considerando sus impactos en sostenibilidad.
- Elaborar un artículo de carácter publicable con los resultados obtenidos de la investigación realizada.

3. Revisión de literatura

3.1. Análisis bibliométrico

El presente proyecto de investigación buscó aplicar los criterios más relevantes de resiliencia y sostenibilidad en el diseño de cadenas de suministro, usando la información paramétrica y modelando un caso de estudio del sector lácteo en Colombia. Con esto en mente, el tema de interés en el que se enfoca este análisis bibliométrico, son todos aquellos documentos de estudio en investigación, realizados en el campo de sostenibilidad y resiliencia en las cadenas de suministro, y su relevancia e interés para las diferentes áreas del conocimiento.

De esta forma, y con el fin de construir la ecuación de búsqueda, se priorizaron las palabras claves derivadas del tema de interés mencionado anteriormente. Adicional a esto, y con el fin de contextualizar la investigación, se tiene en cuenta la mención de la industria de lácteos y se incorporan palabras claves relacionadas con la metodología a usar en la optimización del modelo de la cadena de suministro del caso de estudio. Las palabras claves a implementar son en el idioma inglés, dada su preferencia en publicaciones de estudios a nivel global. Por lo tanto, se hizo uso de la aplicación *Thesaurus* para encontrar sinónimos que ayudasen a ampliar los resultados obtenidos.

Tabla 2

Sinónimos de palabras clave.

	PALABRAS CLAVE	SINÓNIMOS
<i>DETERMINACIÓN DE CRITERIOS</i>	Supply chain	N/A
	Resilience	Flexibility
	Design	Model
	Sustainability/Sustainable	Green

Continuación tabla 2*Sinónimos de palabras clave.*

	Developing country	N/A
CONTEXTUALIZACIÓN DEL CASO	Industry	Business
	Dairy	Pasteurizing Plant
	Raw milk	N/A
METODOLOGÍA	Modelling	Design
	Multigoal	N/A
	Multicriteria	N/A

Nota: Obtenido de (Thesaurus.com, 2022).

Como restricción de fecha de publicación, se tuvo en cuenta el año en que empieza a tener relevancia la investigación en el área de sostenibilidad. En el año 2000, se establecen los Objetivos de Desarrollo del Milenio (Organización Mundial del Comercio, 2022). Esta iniciativa liderada por las Naciones Unidas es el primer evento histórico que evidencia la cooperación internacional debido a la preocupación por la pobreza extrema y su consecuente impacto en la sostenibilidad. Posteriormente, en el año 2015 se hace una retroalimentación de lo logrado hasta el momento, y con base en eso se establecen nuevos objetivos, también conocidos como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Comisión ODS República Dominicana, 2017). Como su nombre lo dice, es en esta fase en que se prioriza no solo el bienestar humano, sino también, la conciliación de los objetivos ambientales y económicos. Así pues, la búsqueda de artículos y estudios en este campo se limitará a publicaciones realizadas a partir del año 2015. Finalmente, las bases de datos a utilizar fueron seleccionadas con base en su reconocimiento e impacto en el área de investigación y ciencia como los son las bases de búsqueda: Web of Science, y Scopus.

A través del proceso de búsqueda y prueba de las palabras claves, se concluyó que la inclusión de los términos que hacen referencia a la industria láctea no acota la búsqueda, sino por el contrario, muchos resultados obtenidos no se relacionan en absoluto con las cadenas de

suministro y el tema principal de investigación. Finalmente, se obtuvo la ecuación de búsqueda en la tabla 3 para cada base de datos.

Tabla 3

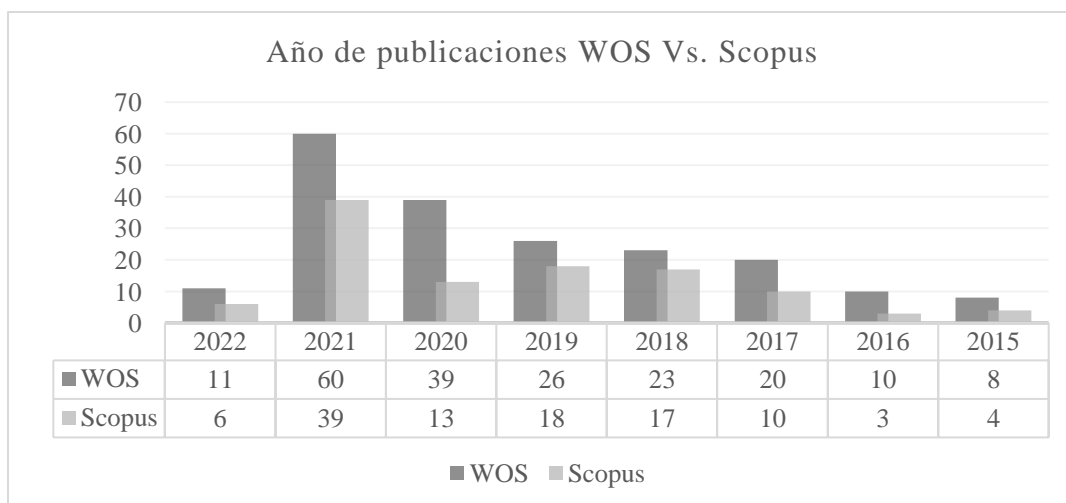
Ecuación de búsqueda y resultados obtenidos.

Base de datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
<i>Web of Science</i>	<p>((TS=(supply chain AND design AND (*resilience* OR *flexibility*)) AND (*sustainability* OR *sustainable*))) AND TS=(developing country OR modelling OR multicriteria))</p> <p>Periodo de tiempo: 2015-2022</p>	197 documentos
<i>Scopus</i>	<p>((TITLE-ABS-KEY (supply AND chain) AND TITLE-ABS-KEY (resilience OR flexibility) AND TITLE-ABS-KEY (sustainability OR sustainable) OR TITLE-ABS-KEY (emerging AND country) AND TITLE-ABS-KEY (modelling OR multicriteria)) AND PUBYEAR > 2014</p>	110 documentos

Nota: Tomado de Web of Science (2022) y Scopus (2022).

Figura 2

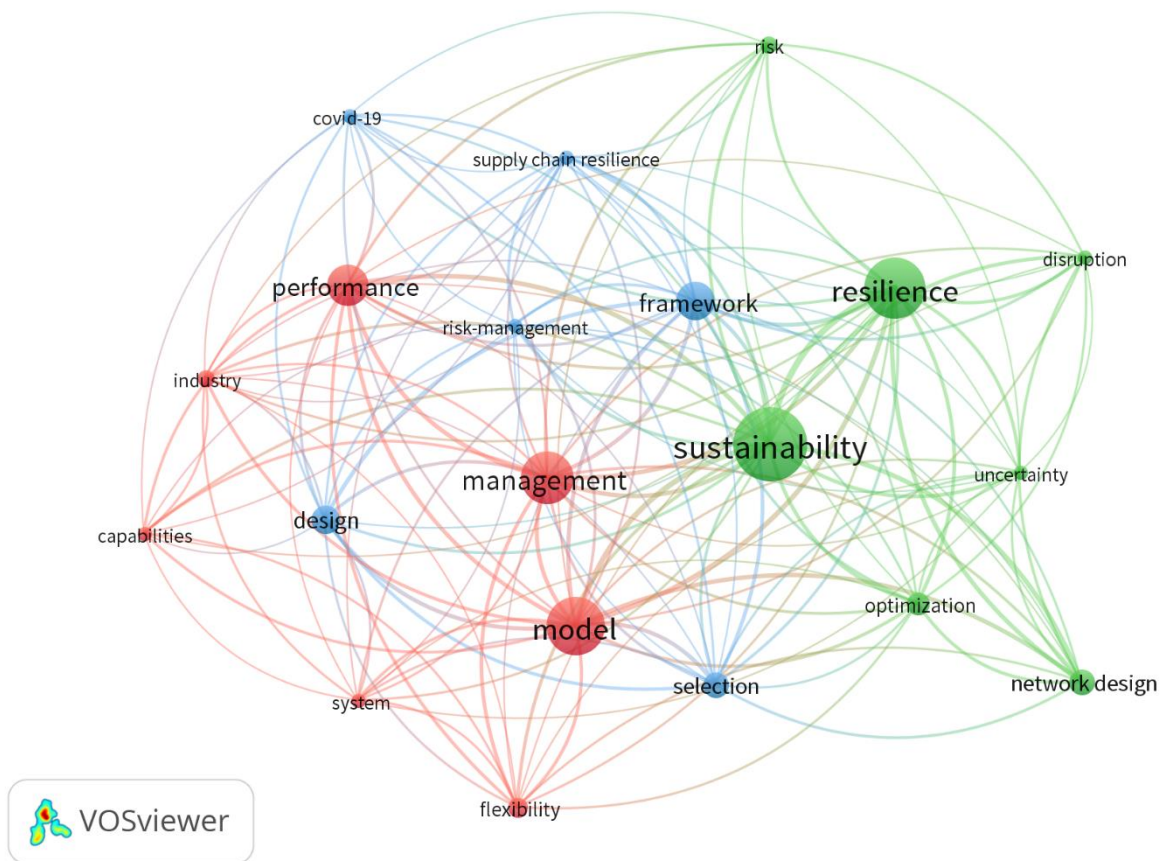
Número de publicaciones por año, comparación entre Scopus (2022) y WOS (2022).



La tabla 3, expone las ecuaciones de búsqueda usadas en cada base de datos y el número de documentos encontrados (ver apéndice A, hoja “WOS” y “Scopus”). Una vez obtenidos los resultados, se procede a analizar las estadísticas que ofrece cada base de datos, las cuales abarcan variedad de campos y gráficos a preferencia del usuario. A continuación, se presentan la frecuencia de publicaciones en el área por año, autor, país, áreas de estudio interesadas, tipo de publicaciones y número de agencias que han financiado las investigaciones de este tema.

Figura 3

Mapa VOSviewer All keywords (Web of Science).

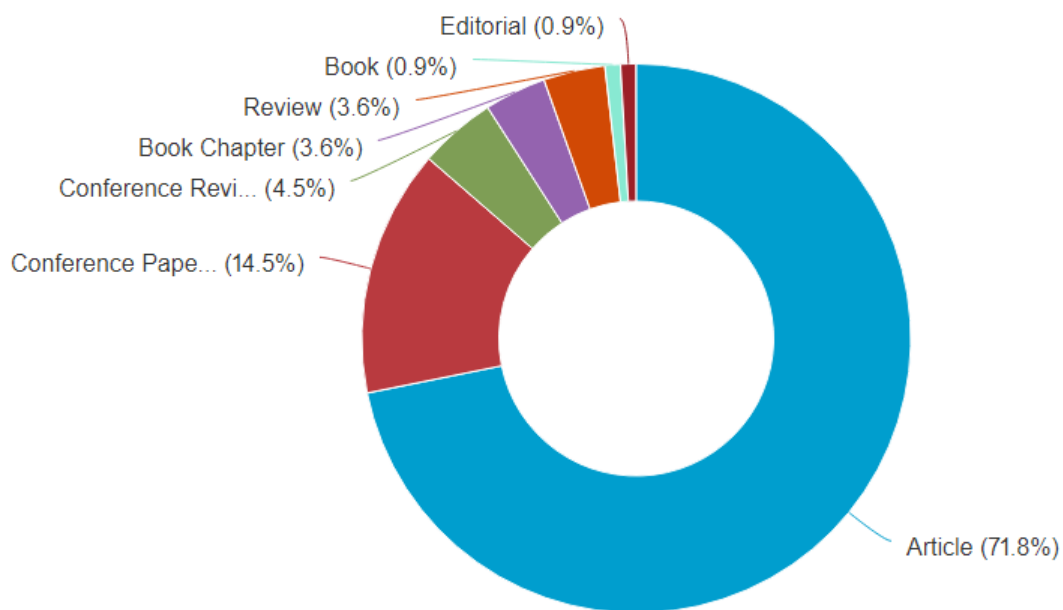


Los documentos presentados por año, de acuerdo con cada base de datos, se observan en la figura 2, para mayor facilidad de comparación entre los resultados obtenidos. Como se puede observar, en los años 2021 hubo un auge en las publicaciones realizadas en el tema de

sostenibilidad y resiliencia aplicadas a las cadenas de suministro. Una teoría sobre su causa es la pandemia a raíz del COVID-19. Esta situación coyuntural, permitió evaluar el nivel de resiliencia de las cadenas de suministros a nivel global según su respuesta a los retos que trajo consigo la pandemia. De hecho, dentro de las palabras clave de los documentos encontrados, al analizarlos con ayuda del software VOSviewer, podemos observar (ver figura 4) que la palabra “COVID-19” es de relevancia para los estudios realizados en el tema, en los documentos encontrados en la base de datos Web of Science.

Figura 4

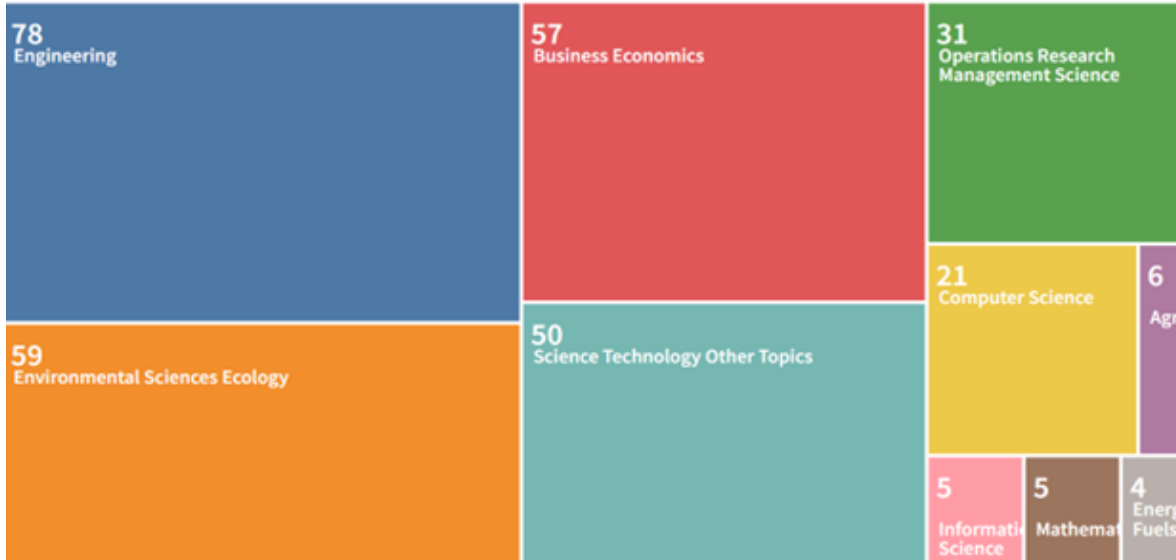
Tipos de documentos encontrados en Scopus (2022).



Ahora bien, los tipos de documentos publicados son de gran importancia para identificar el alcance y rigurosidad de cada aporte. Con base en la figura 4 y 5 se puede concluir que la mayoría de las publicaciones son artículos, es decir, medios de divulgación científica, cuyos argumentos parten de la ciencia y cumplen una metodología.

Figura 5

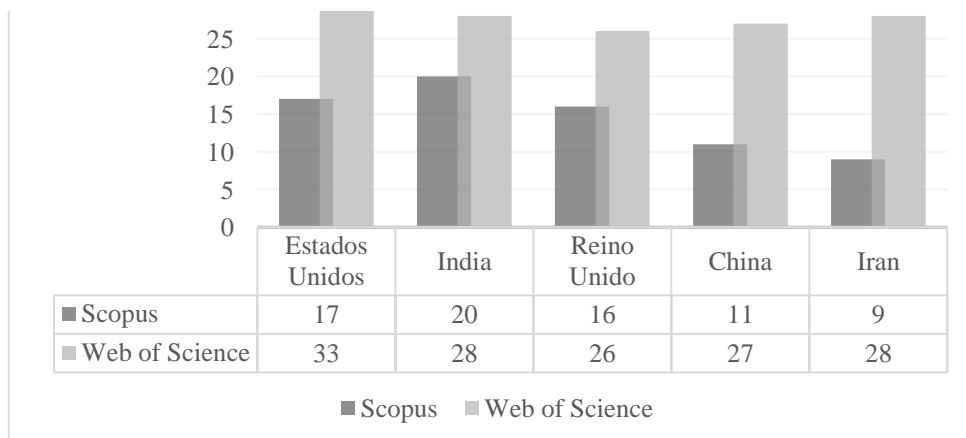
Áreas de interés predominantes, tomado de WOS (2022).



Los resultados tuvieron un comportamiento similar en las dos bases de datos al observar el número de documentos según su país de procedencia. Los cinco países con mayor número de publicaciones fueron los mismos, aunque en diferente orden como se muestra en la figura 6. La iniciativa proveniente de países potencias mundiales en industria o tecnología, deja clara la

Figura 6

Número de publicaciones por país, tomado de Scopus (2022) y Web of Science (2022).



importancia de este tema en el establecimiento de estrategias y procesos que den respuesta a las demandas de la industria y sociedad en todas sus dimensiones, y de igual forma, que se alineen con los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por las Naciones Unidas, del cual hacen parte todos los países en la figura 6.

Figura 8

Entidades con mayor número de investigaciones financiadas, tomado de Web of Science (2022).



Figura 7

Autores con más publicaciones, tomado de Scopus (2022).

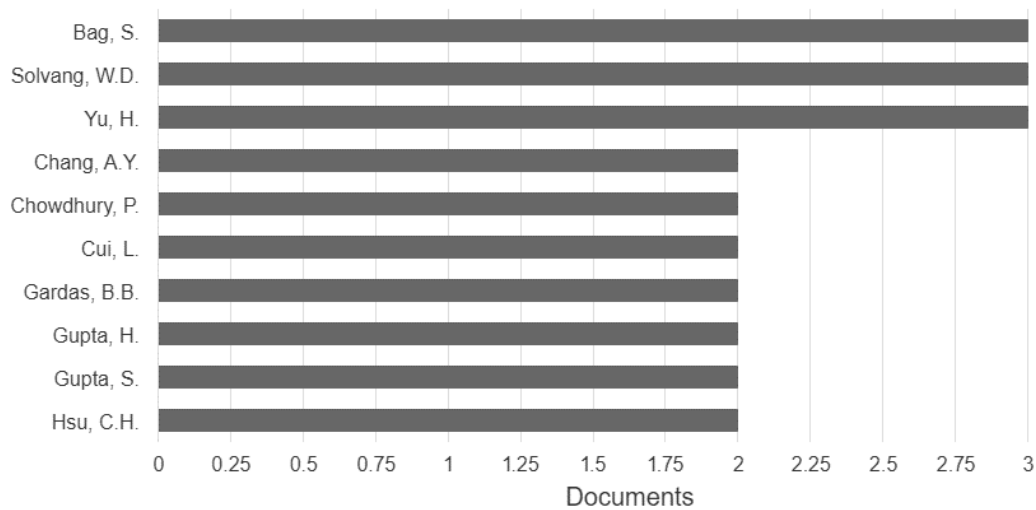
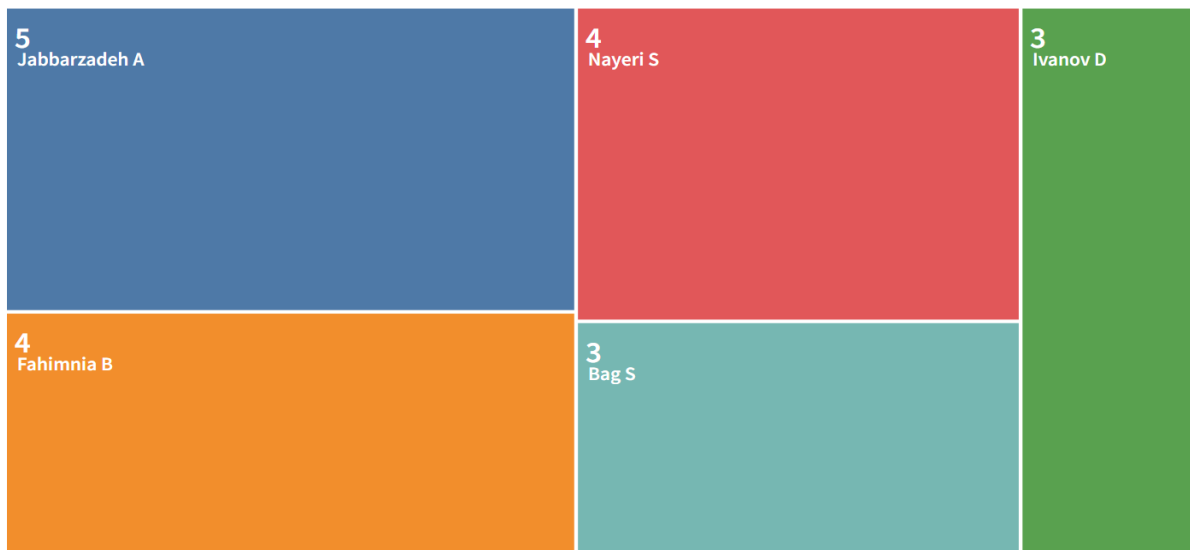


Figura 9

Autores con más publicaciones, tomado de WOS (2022).



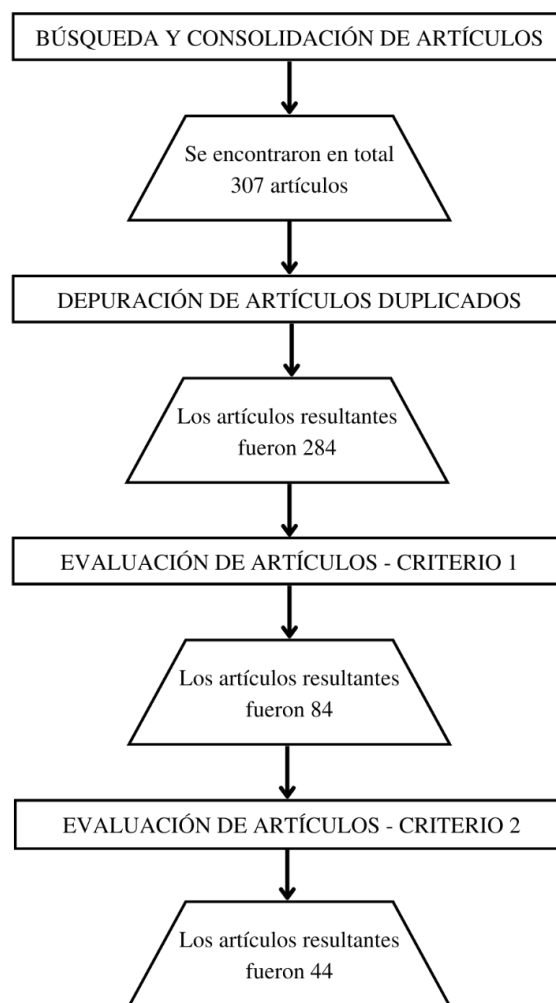
Con respecto al área de investigación, las dos bases de datos coinciden en que Ingeniería, Negocios y Economía, y Ciencias Ambientales, son las áreas de interés predominantes. Por esta razón, la figura 8, tomada de WOS, es la más pertinente y de fácil visualización de esta información. Los autores con más publicaciones en esta área de estudio no tienen una mayoría contundente de publicaciones, en promedio tienen hasta 3 publicaciones. De igual forma, como se evidencia en las figuras 8 y 9, las bases de datos Web of Science y Scopus, respectivamente, solo tienen en común un autor, Bag. S.

De la base de datos Web of Science es importante destacar el trabajo colaborativo de los autores con mayor número de publicaciones en esta área, Jabbarzadeh, A y Fahimnia, B. Participan en conjunto en los artículos “Marrying supply chain Sustainability and resilience: A match made in heaven”, que ha sido citado 126 veces. De igual forma su trabajo “Resilient and sustainable supply chain design: Sustainability analysis under disruption risk”, cuenta con 102 citaciones.

Sin embargo, al analizar los documentos con más citaciones, Hot Papers, en la base de datos WOS, el documento con mayor relevancia, citado 239 veces, es el del autor Ivanov, D, titulado “Viable supply chain model: Integrating Agility, resilience and Sustainability perspective-lessons from and thinking beyond the COVID-19 pandemic”. Su trabajo “A blessing in disguise or as if it wasn’t hard already: reciprocal and aggravate vulnerabilities in the supply chain”, es el segundo con mayor número de citaciones en la base de datos, llegando a 156 citaciones. Para los dos documentos, el año 2021 es el año en fueron más citados, lo cual es coherente con la figura 2.

Figura 10

Proceso de selección de documentos.



Finalmente, se observaron las entidades financiadoras de dichos estudios y publicaciones. Las dos bases de datos comparten entidades de alta relevancia a nivel global como el National Natural Science Foundation of China, que encabeza la lista de entidades que han financiado la mayoría de los documentos en las bases de datos sobre el área de investigación. De igual forma comparten entidades como la Comisión Europea y el Engineering and Physical Sciences Research Council, como se evidencia en la figura 10, tomada de WOS.

Una vez finalizado el análisis general de los documentos obtenidos, se procede a la selección de artículos a tomar en cuenta para el presente proyecto. En una primera estancia, se cotejan los documentos de las dos bases de datos con el fin de eliminar documentos repetidos (Ver Apéndice A, hoja “Consolidado”), dando como resultado 284 documentos. Una vez se tiene una lista de documentos no duplicados, se filtran por medio de los siguientes criterios de selección:

1. Palabras claves en el título: Ver apéndice A, hoja “Evaluación – Palabras claves”.

De acuerdo con este criterio se eliminaron los documentos que no tienen relación en absoluto con el área de investigación, y se descartaron aquellos de poca relevancia o que solo contienen una o dos palabras clave. Para esto se evaluó que el título de cada documento tuviese mínimo tres de las cinco palabras clave: Supply chain, Resilience, Sustainability, Modeling, Agri-food o Multi-criteria.

2. Contenido de acuerdo con el resumen de cada documento: Ver apéndice A, hoja “Evaluación Abstract”. De acuerdo con este criterio se seleccionaron los artículos con mayor relevancia en el área de investigación a criterio del autor. Los documentos resultantes de dicha evaluación fueron 44 y se encuentran en el Apéndice A, hoja “Total Final”. El proceso de selección de documentos se ilustra en la figura 10.

3.2. Análisis preliminar de la literatura

En una economía globalizada, las cadenas de suministro representan la piedra angular en que se basan las actividades de comercio y negocios como hoy los conocemos; y, por ende, su estrategia es de suma importancia por su impacto en los diferentes grupos de decisión dentro de una organización.

Una cadena de suministro es definida en términos generales como “un grupo de agentes interconectados que interactúan por medio de su comunicación e intercambio de flujos que les permite alcanzar un objetivo o grupo de objetivos en común” (Reyes Levalle & Nof, 2017). Por su naturaleza, las cadenas de suministro están expuestas o dependen de los factores de su entorno, los cuales pueden causar interrupciones predecibles o impredecibles. Puntualmente, las cadenas de suministro agroalimentarias, las cuales contienen un factor adicional debido a la naturaleza perecedera de los alimentos, están sujetas y mayormente susceptibles a “desastres naturales, enfermedades infecciosas, terrorismo e incidentes de seguridad alimentaria, entre otros.” (Manning & Soon, 2016)

Con esto en mente, la propiedad del sistema que responde y se manifiesta durante eventos disruptivos, siendo la capacidad de volver al estado inicial en un tiempo aceptable, evaluando el rendimiento de las operaciones durante dichos eventos, es la resiliencia. (Reyes Levalle & Nof, 2017). La necesidad de fortalecer dicha propiedad, sumada a la constante presión de las organizaciones por parte de gobiernos y accionistas para incorporar medidas de sostenibilidad a las cadenas de suministro (Fahimnia, Jabbarzadeh, & Sarkis, 2018), hace de su diseño, planeación e implementación todo un reto.

La interdependencia entre la resiliencia y sostenibilidad en cadenas de suministro revela un conflicto de intereses ya que el uso de recursos e incurrir en costos adicionales para

ejecutar estrategias que garantizan la resiliencia de la cadena, atenta contra los parámetros de sostenibilidad del mismo: es decir, genera sobrecostos, horas extra del personal, aumento en emisiones de gases de efecto invernadero, entre otras consecuencias. Y a su vez, la sostenibilidad, que busca la máxima eficiencia en los procesos, impulsa la eliminación de redundancias de protección, debilitando la resiliencia en el sistema, responsable de mantener las operaciones dentro de dichos parámetros aceptables de sostenibilidad en la red, a pesar de las interrupciones. (Reyes Levalle & Nof, 2017)

Es por esto que se hace imposible hablar de una CS sostenible sin analizar su impacto en la resiliencia del sistema (Fahimnia & Jabbarzadeh, 2016). Lo anterior es una gran brecha en esta área de estudio por lo que se requiere de aportes desde análisis cuantitativos y cualitativos, al igual que análisis dinámicos que se adapten al contexto particular de cada caso.

3.2.1. Resiliencia en cadenas de suministro

El área de estudio de la resiliencia en cadenas de suministro es relativamente nueva. La definición de resiliencia, de hecho, algunos autores la abarcan dependiendo del tipo de CS, tipo de industria, o nivel de decisión en la estrategia, entre otras aproximaciones.

Dentro de los más recientes aportes en el área, (Ribeiro & Barbosa-Povoa, 2018) ofrecen una perspectiva en términos de componentes, definición y métricas aceptables de una Cadena de Suministro Resiliente (CSR). Siendo así, establecen que la resiliencia tiene cuatro componentes inherentes, como lo son:

- **Adaptabilidad:** Hace referencia a una CSR que se prepara, adapta y responde a cualquier escenario que se presente.
- **Velocidad de restauración:** Comprende la urgencia o el tiempo en que se vuelve al estado original para que las operaciones continúen generando valor.

- Nivel de rendimiento: El nivel al que se mantiene el control de las operaciones durante la disrupción; el nivel de actividad que se mantiene una vez ocurre la disrupción, y claramente, la calidad con que se ejecutan las operaciones.
- Eventos disruptivos: “Los eventos disruptivos (...) son aquellos que detienen abruptamente las operaciones, bloqueando completamente la creación de valor.”

A partir de esto, los mismos autores proponen una definición que considera estas dimensiones: “Una cadena de suministros debe poder prepararse, responder y recuperarse de eventos disruptivos para posteriormente mantener una operación estable y aceptable en términos de costos y tiempo” (Ribeiro & Barbosa-Povoa, 2018).

3.2.2. Resiliencia en cadenas de suministro: Indicadores y métricas

Nuevamente, no hay un consenso existente entre los indicadores de resiliencia en las cadenas de suministro (Ribeiro & Barbosa-Póvoa, 2022). Los autores (Manning & Soon, 2016), exponen un resumen de indicadores (ver tabla 4) que a su consideración se deben tener en cuenta en la estrategia de una CSR. También, exponen cómo estos a su vez tienen sus propias características económicas, sociales y ambientales, probando así la interconectividad existente entre la resiliencia y la sostenibilidad en las cadenas de suministro.

En el modelo planteado por (Ribeiro & Barbosa-Póvoa, 2022), la métrica de resiliencia fue denominada “Expected Customer Service Level”, que a su vez deriva de la relación entre la demanda total y la demanda no satisfecha. En (Fahimnia & Jabbarzadeh, 2016) el análisis y métrica de resiliencia se basa en el costo que conlleva aplicar dicha estrategia, es decir, ¿cuánto me cuesta tener una cadena de suministros resiliente?

De los mismos autores, en 2018, su propuesta de modelo multi-objetivo mide la resiliencia a partir de un costo minimax, es decir, minimizando el máximo costo dentro de todas las

simulaciones de escenarios con interrupciones (Fahimnia, Jabbarzadeh, & Sarkis, 2018). Entre otros componentes a tener en cuenta al momento de medir la resiliencia, (López-Castro & Solano-Charris, 2021) establecen que se debe considerar también el arco en que se presentan las interrupciones, es decir, si se presenta a nivel de los clientes, proveedores, manufactura o en todos los niveles de la CS.

Tabla 4

Indicadores de resiliencia y sus dimensiones.

Indicadores	Dimensiones		
	Económico	Ambiental	Social
Eficiencia	Costos, márgenes y ganancias, retorno del capital	Eficiencia de los recursos, reducción de desperdicios, huella de carbono	Bienestar de los trabajadores, frecuencia de cambio de personal, productividad por persona
Flexibilidad	Reducción de costos de inventario, estrategias Stock Keeping Unit (SKU), cumplimiento de tiempos	Ejemplos como: Irrigación de cultivos en caso de falta de lluvia, cambio de alimento para animales en caso de que los precios sean insostenibles	Variedad de habilidades y experiencia en los trabajadores para que puedan ayudar en diferentes tareas, número de trabajadores permanentes
Velocidad de respuesta	Servicio al cliente, tiempos de distribución	Cultivos o cría de variedades que se adaptan mejor al entorno	Bienestar animal, niveles de mortandad, enfermedades en los animales
Calidad del producto	Cumplimiento de los estándares de calidad	Estrategias de empaques sostenibles o menos recursos en embalaje	Consideración de las condiciones laborales, comercio justo

Nota: Adaptado de (Manning & Soon, 2016)

Finalmente, con respecto a modelos y heurísticas, (López-Castro & Solano-Charris, 2021) en su revisión de literatura, demuestran que alrededor del 60% de los casos de estudio que buscan evaluar la resiliencia de una CS, lo hacen a través de la evaluación de escenarios, analizando sus resultados a partir de las interrupciones en los parámetros iniciales, ya sea que dichos escenarios se generen de forma probabilística o discreta determinística. Y en términos de modelos de programación más usados, el modelo MILP, Mixed Integer Linear Programming, es el método más popular entre los autores.

3.2.3. Sostenibilidad en cadenas de suministro

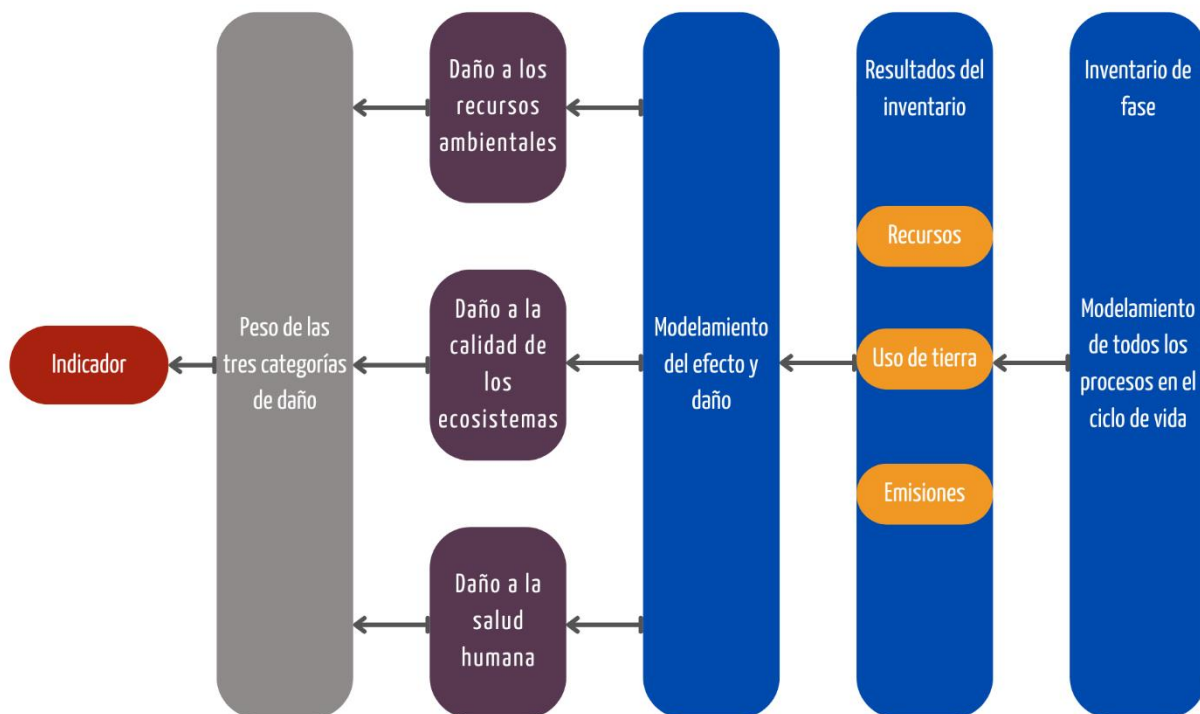
Las cadenas de suministro son omnipresentes en las actividades de cualquier organización, por ende, su impacto en todas las áreas y actores de la misma. El análisis de sostenibilidad de una cadena de suministro se basa puntualmente en el análisis de tres parámetros: Económico, social y ambiental; de forma que se satisfagan los objetivos organizacionales para cada uno de estos pilares, sin comprometer la estabilidad a largo plazo de la compañía. En (Matos, Scheleper, Gold, & Hall, 2020), el análisis de sostenibilidad también se puede dar desde tres perspectivas adicionales, como lo son: “(1) Análisis de proyección en corto vs. largo plazo, (2) compromiso de intereses intra-intergeneracionales, y (3) meso y macro agendas”.

Ahora bien, el estudio de la sostenibilidad en cadenas de suministro ha tenido un lento progreso dada la inherente incompatibilidad entre los parámetros de desarrollo sostenible anteriormente nombrados (Matos, Scheleper, Gold, & Hall, 2020). Según esto, los trade-offs o canjeo y compensaciones son comunes en la administración de Cadenas de Suministro Sostenibles (CSS). Los tradeoff son definidos como situaciones en las que unos elementos son priorizados sobre otros, y dicha decisión impacta negativamente los resultados de los elementos no priorizados (Matos, Scheleper, Gold, & Hall, 2020). Un ejemplo claro son los objetivos económicos vs.

objetivos ambientales; el margen de ganancias se puede ver afectado por políticas de contratación de proveedores con un bajo índice de emisiones de carbono, que, sin embargo, cuestan más que los proveedores convencionales. En este ejemplo se está priorizando los objetivos ambientales sobre los objetivos económicos y, por ende, estos últimos se ven impactados negativamente, aunque se logren los objetivos ambientales.

Figura 11

Metodología Eco-Indicator 99. Adaptado de Kantardgi, Igor (2003). Kantardgi, Igor. (2003). Dynamic Modelling of Environment-Industry Systems.



En este orden de ideas, encontrar una única solución óptima no es el objetivo del diseño y planeación de una CSS. La naturaleza de los tradeoffs hace que la mejor configuración permanezca debajo de la solución óptima y que se tenga que analizar a conveniencia de lo que se quiere lograr desde un punto de vista global; dicha metodología de análisis es conocida como la Optimalidad de Pareto (Fahimnia & Jabbarzadeh, 2016).

3.2.4. *Sostenibilidad en cadenas de suministro: Indicadores y métricas*

Dentro de la literatura estudiada se menciona repetidamente el uso de “Environmental Score Cards” (Fahimnia, Jabbarzadeh, & Sarkis, 2018). Estos scores provienen de fórmulas construidas a partir de índices extraídos de diferentes protocolos de evaluación de impacto ambiental y social reconocidas mundialmente como: Eco-Indicator 99 (ver figura 11), IMPACT 2002+ y CML2001.

Estos indicadores, al igual que los indicadores de resiliencia deben ser escogidos de acuerdo con su idoneidad para el caso a estudiar. Un ejemplo claro de esto es la minimización de emisiones de dióxido de carbono, particularmente debido impuestos al carbono emitido, la cual depende de la dimensión política en que se desarrollan las actividades de la cadena de suministro en estudio.

3.2.5. *Modelamiento de cadenas de suministro resilientes y sostenibles: Contribuciones*

En el exhaustivo trabajo de (López-Castro & Solano-Charris, 2021), a partir de la revisión de más de cincuenta trabajos en Cadenas de Suministro Resilientes y Sostenibles (CSRS), se determinó que los indicadores más populares para cada uno de los parámetros de economía, medio ambiente, social y resiliencia, son respectivamente: Costos de la operación, emisiones de GEI, número de empleos y costo de mantener las operaciones a pesar de las interrupciones. Sin embargo, una característica común en los artículos estudiados es la falta de consenso en una metodología o modelo de optimización específico para abordar este tipo de problemas, como se puede evidenciar en la tabla 5.

Tabla 5*Resumen de trabajos relacionados*

Autor	Software	Modelo de optimización	Industria	Criterios			
				Económico	Ambiental	Social	Resiliencia
(Nayeri, Torabi, Tavakoli, & Sazvar, 2021)	LINGO	Meta-objetivo multiobjetivo robusto estocástico difuso	Calentadores de agua	Min. costo total de la operación	Min. emisiones de carbono	Max. creación de empleos	N/A
(Jabbarzadeh, Fahimnia, & Rastegar, 2017)	PNS Studio	Multiobjetivo robusto	Energía Eléctrica	Max. ganancias netas	Min. emisiones de gases de efecto invernadero	N/A	Min. Probabilidad de interrupciones
(Fahimnia & Jabbarzadeh, 2016)	GAMS 24.1	Programación Difusa Estocástica	Ropa deportiva	Max. Performance Score holístico: Basado en evaluaciones reconocidas a nivel mundial, promedio de puntajes			Min. costo de aplicación de estrategias para fortalecerla resiliencia de la CS
(Ribeiro & Barbosa-Póvoa, 2022)	GAMS 24.1	Modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP)	Genérica multiproducto	Max. ganancias netas	N/A	N/A	Max. Nivel de servicio: Cubrir toda la demanda posible a pesar de las interrupciones

Continuación tabla 5

Resumen de trabajos relacionados.

(Fahimnia, Jabbarzadeh, & Sarkis, 2018)	GAMS 24.1	Multiobjetivo robusta	Ropa deportiva	Min. el máximo costo de todos los escenarios con disrupciones	Max. Performance Score holístico	N/A	Min. el máximo costo de todos los escenarios con disrupciones
(Kabadurmus & Erdogan, 2020)	IBM CPLEX Optimization Studio	Modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP)	Genérica multiproducto	Min. de costos	Límite en emisiones de carbono	N/A	Umbral de riesgo

En Ribeiro & Barbosa-Póvoa (2022), se realizó una aproximación mediante simulaciones y modelamiento mixto para llegar a la localización óptima. Mientras que en el trabajo de Kabadurmus & Erdogan (2020), se trabaja un modelo lineal que integra los criterios de sostenibilidad y resiliencia desde las restricciones del modelo.

Nuevamente en el trabajo de Fahimnia, Jabbarzadeh, & Sarkis (2018), es interesante la aproximación a la resiliencia desde la minimización general de costos de implementación de estrategias, ya que integra dos criterios desde una misma fórmula. Sin embargo, desde la perspectiva medio ambiental, el uso de diferentes protocolos de evaluación hace de esta metodología muy extensa y sujeta a la validez global de los mismos.

Ahora bien, con respecto al análisis de resultados, autores como Fahimnia & Jabbarzadeh (2016), y López-Castro & Solano-Charris (2021), proponen la metodología de optimalidad de

Pareto, sumado a un análisis de sensibilidad que se debe aplicar a los tradeoffs y posibles escenarios de disrupción con el fin de evaluar el impacto de las decisiones estratégicas tomadas.

3.2.6. Implicaciones y estrategias

La estrategia de resiliencia no se trata de responder a un escenario en concreto, sino de anticipar y reaccionar a tendencias que puedan afectar las operaciones (Manning & Soon, 2016). Con esto en mente, los autores (Ribeiro & Barbosa-Póvoa, 2022), recalcan la necesidad de establecer una estrategia acorde y no tomar decisiones universales.

Es así como las estrategias proactivas son la mejor opción al trabajar en CSR. Dichas estrategias admiten la creación de redundancias, que a su vez se traducen en flexibilidad táctica y operativa, con base en el estudio de necesidades anticipadas a partir de un trabajo de detección de riesgos continuo.

Ahora bien, propuestas concretas que integran resiliencia y sostenibilidad se pueden observar en el caso de estudio de (Yu & Solvang, 2020), donde se mencionan las implicaciones administrativas, como lo son:

- La mejora de la flexibilidad operacional de la red a partir de la contratación de trabajadores por temporada y la renta de equipos adicionales.
- La minimización de las emisiones de carbono al aumentar los costos por concepto de actualización tecnológica.
- La implementación de estrategias de inversión enfocadas a la reducción de emisiones de carbono.

Por otra parte, en (Nayeri, Torabi, Tavakoli, & Sazvar, 2021), el contexto de análisis es el de una empresa con demanda en continuo crecimiento, y, por ende, trata de cómo hacer frente a las implicaciones en aumentos de costos y emisiones. Por lo tanto, los autores recalcan nuevamente

la importancia de invertir en actualizaciones tecnológicas y en la subcontratación de producción para cubrir los faltantes temporales. El autor Rajesh, (2021), también menciona ciertas implicaciones a nivel administrativo como el análisis y seguimiento constante al enfoque de la firma en materia de sostenibilidad y resiliencia. Recomienda la consideración de todas las opciones estratégicas al alcance en el caso de objetivos contradictorios, al igual que enfatiza la importancia de una CSRS con upstream enfocado en la agilidad y un downstream enfocado en la eliminación de residuos.

En (Manning & Soon, 2016), se hacen referencia a las 3R's: Ready, Respond, Recover, con el fin de establecer las fases en que se proyecta una estrategia de resiliencia. También se mencionan los factores estratégicos inherentes a cada una de las fases, como lo son: La toma de decisiones, liderazgo de la estrategia, dinámicas asociadas con la cadena de suministro y el uso de indicadores de rendimiento.

Los autores (López-Castro & Solano-Charris, 2021) resaltan la falta de aportes con respecto a decisiones operacionales, por lo que recomiendan considerar aspectos como productos perecederos, rutas de los vehículos, integración vertical, posibilidad de ventas directas y precios. A nivel táctico mencionan las políticas de niveles de inventarios, tipos de transporte, y procesos de espera. Y a nivel estratégico proponen nuevamente la inversión en nuevas tecnologías, como vehículos eléctricos y nueva maquinaria.

Finalmente, la presente revisión de literatura demuestra los vacíos en materia de estandarización de conceptos e indicadores, aproximaciones cuantitativas y la falta de exploración de estrategias holísticas que no solo contemplen el largo plazo y una alta capacidad de inversión, sino también las propuestas de corto plazo y operacionales.

4. Marco Teórico

Los conceptos a partir de los cuales se sustenta el proyecto de investigación se detallan a continuación.

4.1. Cadena de suministro

En el libro (Govil & Proth , 2002), definen la cadena de suministro como “una red global que coopera para mejorar los flujos de materiales e información entre proveedores y clientes al más bajo costo y velocidad posibles. Su objetivo es la satisfacción del cliente.”

Dicha definición conlleva a limitaciones en términos de integralidad de la eficiencia, es decir, limita la evaluación de su operación en términos de costos y tiempos. Con esto en mente, el trabajo de (Reyes Levalle & Nof, 2017), aporta una definición de las cadenas de suministro contemporánea, donde se definen como “un grupo de agentes interconectados por medio del intercambio de flujos para lograr los objetivos individuales o grupales”. De igual forma, aclara que dichos agentes pueden ser físicos o intangibles, y que a su vez tienen tres características: Los agentes son 1) autónomos, 2) orientados a los objetivos, y 3) con capacidad de comunicarse y reaccionar a cambios. Con base en esta definición se denotan ciertas habilidades o propiedades como la resiliencia, y dimensiones como la sostenibilidad.

4.2. Resiliencia en cadenas de suministro

De acuerdo con Reyes Levalle & Nof (2017), la resiliencia es una habilidad inherente a los agentes de las cadenas de suministro. Dicha habilidad es la que coordina la respuesta a eventos indeseados o disruptivos en la cadena de suministro. En el trabajo de Manning & Soon (2016), la resiliencia es la flexibilidad y adaptabilidad de la cadena ante situaciones de choque para así mantener las operaciones funcionales.

Los autores Ribeiro & Barbosa-Povoa (2018), consolidaron todos los aportes sobre la definición de resiliencia y concretaron que: *“Una cadena de suministro resiliente es aquella que se prepara, responde y recupera de los eventos disruptivos para luego mantener un nivel de servicio estable y aceptable en términos de costo y tiempo”*.

Con respecto a las métricas a usar, se busca que aporten información sobre el costo que representa para la empresa la activación de protocolos de resiliencia, como también su relación con los sobrecostos que representa la sostenibilidad de la cadena. Para esto, la presente investigación usa como referencia los indicadores propuestos en el trabajo de Maning & Soon (2016), ya que relacionan indicadores de resiliencia con sus correspondientes dimensiones en los tres pilares de la sostenibilidad. En otras palabras, son indicadores que priorizan la resiliencia de la cadena integrando el concepto de Triple Bottom Line, o Triple Objetivo, como parámetros de sostenibilidad inherentes a dichos indicadores (ver tabla 4).

4.3. Sostenibilidad en cadenas de suministro

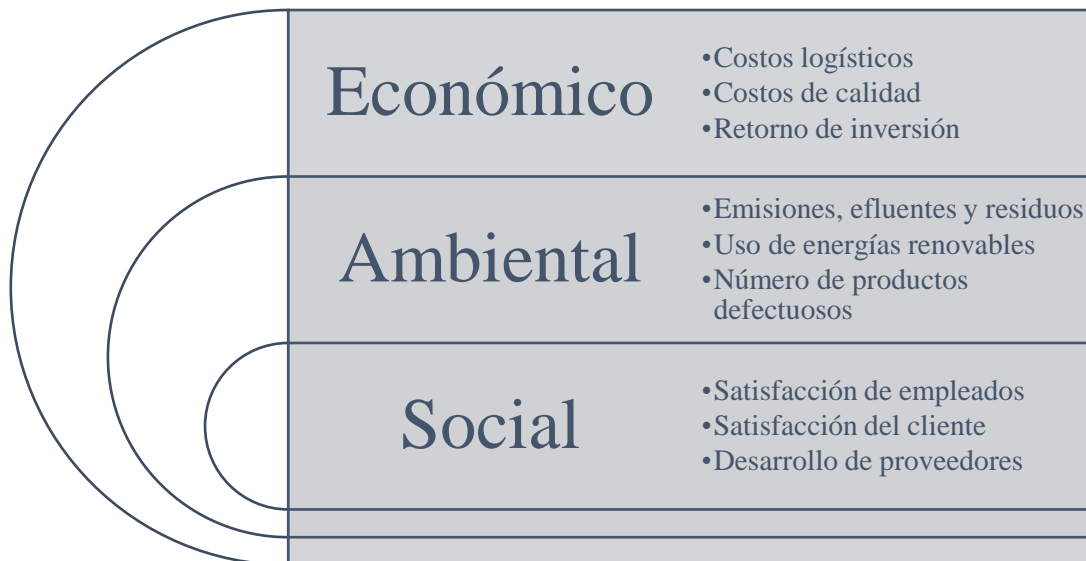
La sostenibilidad en cadenas de suministro es definida por SAP, reconocida compañía en softwares para la administración de información y recursos empresariales, como: *“Aquella que integra prácticas éticas y ambientalmente responsables en un modelo competitivo y exitoso”* (SAP, 2020).

Ahora bien, una definición enfocada a su aplicación en cadenas de suministro se define como aquella que además de *“satisfacer las necesidades de las generaciones presentes y futuras, comprende también la satisfacción de las necesidades entre las partes existentes como los son empleados, clientes, entre otros”* (Boyd, Spekman, Kamauff, & Werhane, 2007). Dicha sostenibilidad en el contexto empresarial se aborda desde el concepto de Triple Balance o Triple

Bottom Line, la cual evalúa el desempeño de las empresas en materia de sostenibilidad, agrupando los diferentes aspectos que afectan cada dimensión. (Ver figura 12)

Figura 12

Triple Bottom Line y algunos de sus indicadores.



Nota: Adaptado de (Cogollo Flórez & Ruiz Vásquez, 2019).

Finalmente, una cadena de suministros sostenible “*tiene como objetivo fundamental la optimización de recursos, la mejora continua de las condiciones laborales y el bien común*” (Cogollo Flórez & Ruiz Vásquez, 2019).

4.4. Modelamiento matemático y simulación de interrupciones en cadenas de suministro

De acuerdo con IBM, un modelo de optimización es una traducción o representación de las características principales de un problema de negocios que se intenta resolver (IBM, s.f.). Un modelo matemático se realiza a partir de la interpretación de la realidad, y su posterior representación por medio de fórmulas matemáticas. Dicho modelo busca el mejor valor o escenario, según el objetivo con que se plantea, y, por ende, es una herramienta para la toma de decisiones.

A partir de un modelo se pueden implementar simulaciones, realizando cambios hipotéticos en los parámetros del mismo. Las simulaciones son una herramienta que apoya la toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo. En (Villanueva, Ramos, & Jiménez, 2012), la simulación “proporciona una aproximación de lo que sucedería bajo ciertas condiciones que afectan al sistema, reduciendo así riesgos y costos (en los que se incurriría) al no tomar la decisión adecuada”.

Sin embargo, su implementación y eficacia depende del alcance, enfoque y métricas (Ribeiro & Barbosa-Póvoa, 2022) a usar, por lo que un solo tipo de programación del modelo no garantiza la mejor solución al problema planteado. En este orden de ideas, los métodos más usados en el campo del modelamiento matemático son la optimización, la simulación de escenarios o el análisis de decisiones.

En el presente proyecto de investigación, se pretende hacer uso de las tres metodologías, haciendo énfasis en la simulación de disrupciones en el modelo. De acuerdo con el diccionario de Oxford, las disrupciones hacen referencia a la interrupción súbita de algo. En el trabajo de Ribeiro & Barbosa-Póvoa (2022), se mencionan tres tipos de interrupciones:

- Disrupciones en la producción: Involucra todas las fallas que causarían que una fábrica o planta de producción deba detener sus actividades. Por ejemplo, la pandemia causada por el COVID-19 o protestas de trabajadores.
- Disrupciones en el abastecimiento: Trata de la escasez de materia prima.
- Disrupciones por transporte: Todo aquello que involucre transporte de materiales, distribución de productos, etc. Hace referencia a interrupciones viales o daños en medio de la fase de transporte.

Este último tipo de disrupción es en el que se enfocará el presente trabajo de investigación.

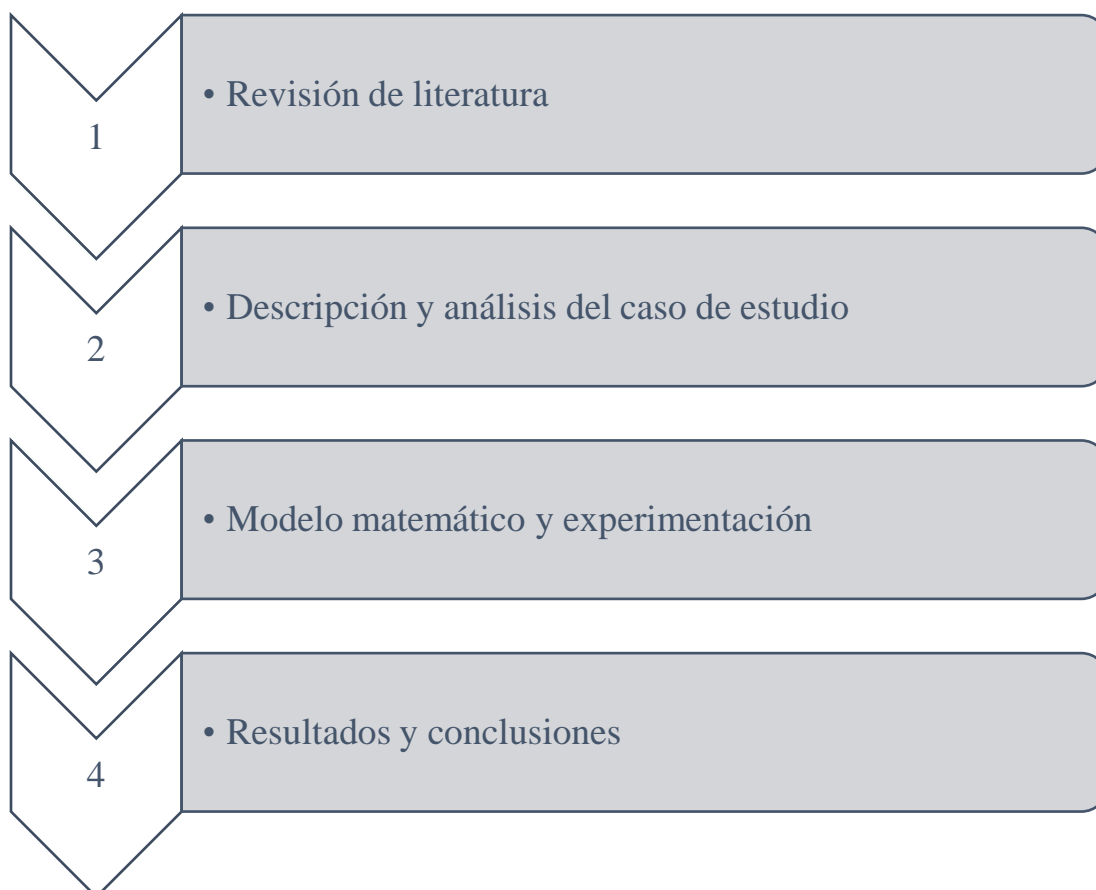
5. Metodología

Con base en la anterior revisión de literatura, la presente investigación se enfocó en la planeación de la CS en términos de cantidades y recursos a usar, más no en la configuración de la CS en términos de localización de sus entidades. Particularmente, se enfocó en las cantidades a transportar, en qué tipo de vehículo y la elección de los mejores proveedores, con el fin de lograr un balance entre los parámetros de sostenibilidad y la resiliencia del sistema.

Con base en trabajos de autores como Clavijo-Buriticá, Escobar, & Triana-Sánchez (2017) y Ribeiro & Barbosa-Povoa (2022), la metodología propuesta consiste en cuatro etapas como se muestra a continuación en la figura 2:

Figura 13

Metodología propuesta.



5.1. Revisión de literatura

En esta etapa se realizó la recopilación de estudios relevantes en el tema de investigación con el fin de definir conceptos y criterios. También se analizaron las diferentes metodologías usadas con el fin de encontrar similitudes entre los casos de estudio y los enfoques aplicados. Lo anterior se realizó mediante el uso de bases de datos como Scopus y Web of Science, al igual que Google Scholars y literatura recomendada por los directores del proyecto.

5.2. Descripción y análisis del caso de estudio

En esta etapa se recopiló toda la información que la empresa Laktoland S.A.S, aceptó compartir para este propósito, se describieron características generales de la empresa, y se expusieron todos los parámetros y agentes relevantes en la cadena de suministros del caso de estudio. También, se detalló en el tratamiento de los datos suministrados, la información adicional y los supuestos necesarios para la factibilidad y robustez del modelo matemático que se realizó a partir de esta información.

5.3. Modelo matemático y generación de escenarios disruptivos

El enfoque metodológico para la obtención de resultados comprendió el planteamiento de dos funciones objetivo en un modelo probabilístico multiobjetivo, seguido de su correspondiente optimización mediante Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP). Seguidamente, se sometió el modelo a simulaciones de escenarios con interrupciones, generados a partir del análisis de la distribución de un grupo de datos históricos sobre el cierre de las vías en Colombia.

5.4. Resultados y conclusiones

Finalmente, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se aplicaron herramientas de análisis dinámico y sensibilidad, con el fin de entender las relaciones entre los parámetros y variables, al igual de los potenciales *tradeoffs*. En esta fase se contestaron las preguntas de

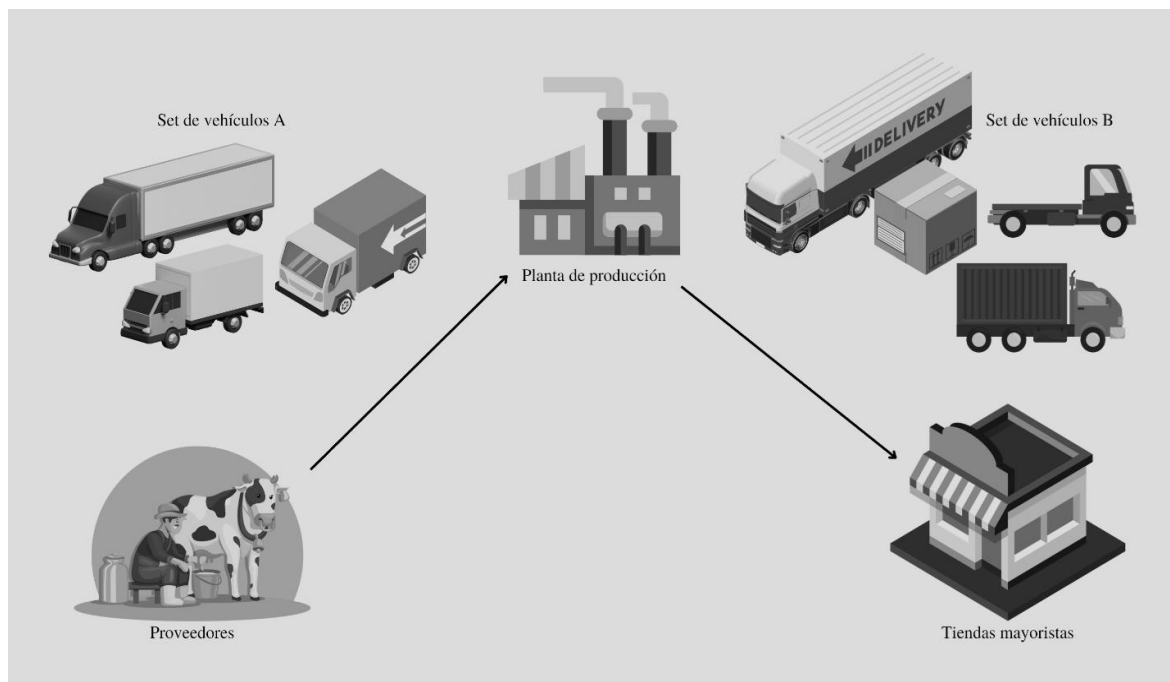
investigación y se realizó una propuesta de planes de acción a nivel operativo e implicaciones administrativas a nivel táctico.

6. Descripción del caso de estudio: Laktoland S.A.S

El caso de estudio se adapta a partir de la información suministrada por la empresa del sector lácteo, Laktoland S.A.S. Dicha empresa se encuentra ubicada en Cogua, Cundinamarca, específicamente en la vía Ubaté, Km 16. Identificada con el número de NIT 8600595392, Laktoland cuenta con un patrimonio neto de \$3.186.991.000 COP y en el año 2021 generó ventas por \$64.834.000.000 COP, para finalmente presentar unas ganancias de \$3.597.000.000 COP (Halcones y Palomas, 2022). Con respecto a la información paramétrica de su cadena de suministros (2019), esta consiste en dos arcos compuestos por dos arcos de abastecimiento y y distribución como se ilustra en la figura 14. (Ver apéndice B)

Figura 14

Representación gráfica de la cadena de valor del caso de estudio.

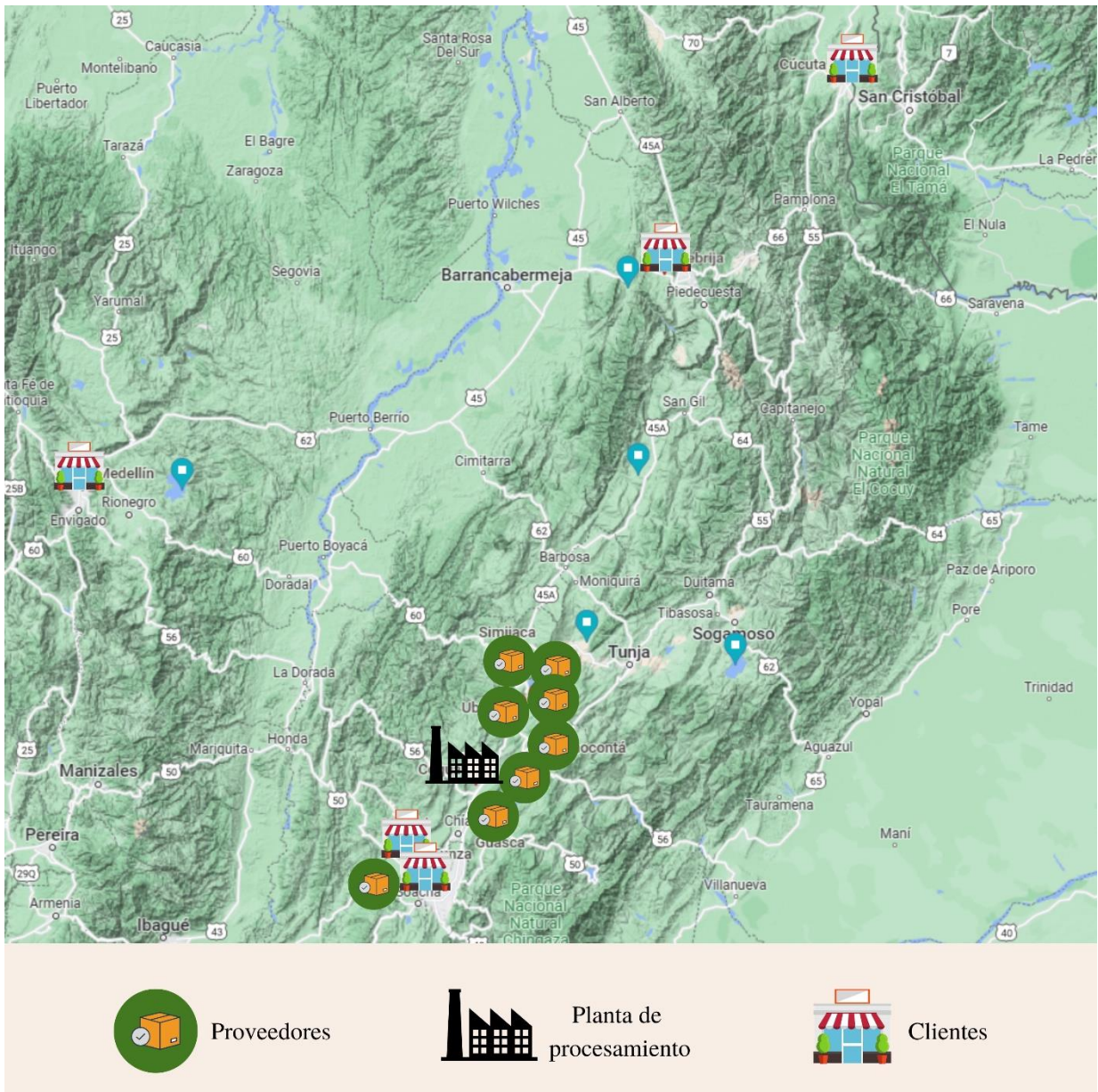


El conjunto global de las operaciones de la cadena de suministro se lleva a cabo a lo largo y ancho de la más grande falla geográfica en el país de Colombia como lo es la cordillera de los Andes. Cada arco cuenta con un set diferente de vehículos, al igual que diferentes costos asociados

dato que en un arco se terceriza el transporte y en el otro corre por cuenta de la empresa. Lo anterior está representado gráficamente en las figuras 14 y 15.

Figura 15

Ubicación geográfica de los eslabones principales de la cadena de suministros.



6.1. Proveedores

Laktoland cuenta con ocho proveedores ubicados en el departamento de Cundinamarca (ver figura 16). El proveedor con mayor distancia está ubicado en Simijaca, a 78.7 Km de distancia,

por lo que se garantiza el tiempo de llegada de la materia prima en buen estado, ya que esta no puede superar las 72 horas sin haber empezado a ser procesada.

Cada proveedor tiene una capacidad de producción definida y un precio asociado como se muestra en la tabla 6. De igual forma, para el transporte de la leche cruda se dispone de tres tipos de transporte de carga: Turbo, sencillo y doble troque (ver tabla 8). Su disponibilidad está sujeta a la ubicación de cada proveedor, es decir, la ruta para llegar al proveedor ubicado en Guasca no es transitable para el vehículo doble troque, por lo que no hay disponibilidad de este para recoger la materia prima de dicho proveedor.

Tabla 6

Oferta y costo de materia prima por proveedor.

	OFERTA (Lt/MES)	PRECIO LECHE CRUDA (COP)
<i>CHOCONTA</i>	118,440	\$ 1,350
<i>MADRID</i>	282,060	\$ 1,600
<i>GUASCA</i>	164,940	\$ 1,235
<i>LENGUAZAQUE</i>	200,070	\$ 1,166
<i>RABANAL</i>	237,510	\$ 1,500
<i>SESQUILE</i>	255,120	\$ 1,320
<i>SIMIJACA</i>	150,570	\$ 1,600
<i>UBATE</i>	237,660	\$ 1,320

Tabla 7

Costo por kilómetro recorrido según cada tipo de vehículo, a cada proveedor.

ORIGEN	DOBLE TROQUE (COP)	SENCILLO (COP)	TURBO (COP)
<i>CHOCONTA</i>	\$ 36.00	\$ 47.00	\$ 65.00
<i>GUASCA</i>	\$ 31.00	\$ 42.00	\$ 56.00
<i>LENGUAZAQUE</i>	\$ 36.00	\$ 47.00	\$ 65.00
<i>MADRID</i>	\$ 36.00	\$ 47.00	\$ 65.00
<i>RABANAL</i>	\$ 43.00	\$ 63.00	\$ 86.00
<i>SESQUILE</i>	\$ 31.00	\$ 42.00	\$ 56.00
<i>SIMIJACA</i>	\$ 41.00	\$ 56.00	\$ 74.00
<i>UBATE</i>	\$ 31.00	\$ 42.00	\$ 56.00

Tabla 8

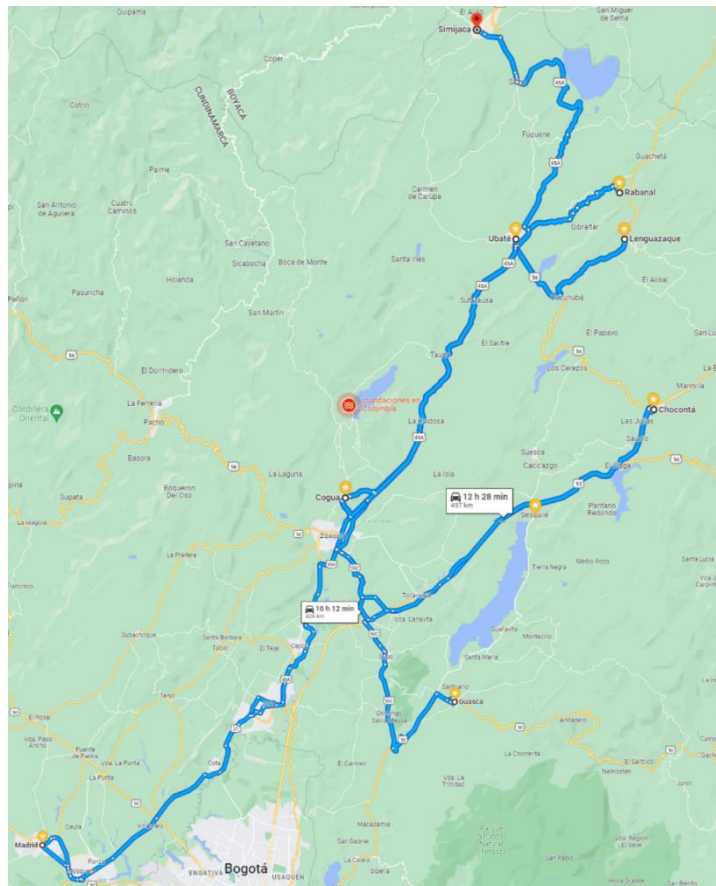
Capacidad en litros de cada vehículo en el arco de abastecimiento.

CAPACIDAD CAMIONES (Lt)	
TURBO	6,000
SENCILLO	10,000
DOBLE TROQUE	12,000

Con respecto a los costos por concepto de transporte, la empresa y los proveedores subcontratan el servicio y, por ende, este depende únicamente de los kilómetros recorridos y el tipo de vehículo a utilizar, lo cual a su vez depende de su capacidad de transporte en litros (Ver tabla 7).

Figura 16

Ubicación geográfica de los proveedores y las rutas predeterminadas para llegar a cada uno.



6.2. Planta de procesamiento

El procesamiento en la planta se trabaja como productos agregados, es decir que no se distingue entre referencias. La planta cuenta con dos líneas de procesamiento y una capacidad total para procesar 11'800.000 litros de leche por mes, independiente de la referencia. De igual forma los costos asociados a producción se discriminan como costos fijos (\$130.000.000), mano de obra y costo de insumos para envasado y empaque (\$333/und). El tratamiento de la leche en la planta es el representado en la figura 17, y los costos asociados a mano de obra se encuentran discriminados en la tabla 9.

Figura 17

Diagrama de procesamiento de la leche en planta.



Tabla 9

Costos asociados a mano de obra en la planta de procesamiento.

COSTO MANO DE OBRA (COP)	NÚMERO DE EMPLEADOS	
<i>RECIBO</i>	\$ 1,860,000	2
<i>TERMIZACION</i>	\$ 3,208,500	3
<i>UHT</i>	\$ 3,906,000	3
<i>ENVASADO</i>	\$ 3,906,000	3
<i>RECAP</i>	\$ 2,790,000	3
<i>ENCARTONADO</i>	\$ 5,580,000	6

Finalmente, cada unidad producida contiene 900ml de leche, o 0.9 litros. Las estibas usadas para su distribución tienen una capacidad de 480 unidades c/u. (Ver apéndice B, hoja “Planta”)

6.3. Clientes

La demanda mensual en el arco de distribución se concentra en cinco clientes mayoristas como se evidencia en la tabla 10; la demanda agregada sería de 496.000 unidades por mes, es decir, 446.400 litros. Los clientes mayoristas son más dispersos a nivel geográfico (ver figura 18) y están ubicados en diferentes departamentos como Antioquia, Norte de Santander, Santander y Cundinamarca. (Ver apéndice B, hoja “Clientes”)

El transporte desde la planta hasta los clientes no es subcontratado, lo realiza la empresa y para ello cuenta con tres tipos de vehículos con una determinada capacidad por estibas. Los costos asociados al transporte son por concepto de costo de combustible, el cual depende a su vez de los kilómetros recorridos; peajes, y mano de obra (ver tabla 12). De igual forma, hay un número limitado de vehículos disponibles de cada tipo y, por políticas de la empresa, cada uno tiene un número máximo de viajes que puede realizar por semana (ver tabla 11).

Figura 18

Ubicación geográfica de clientes mayoristas.

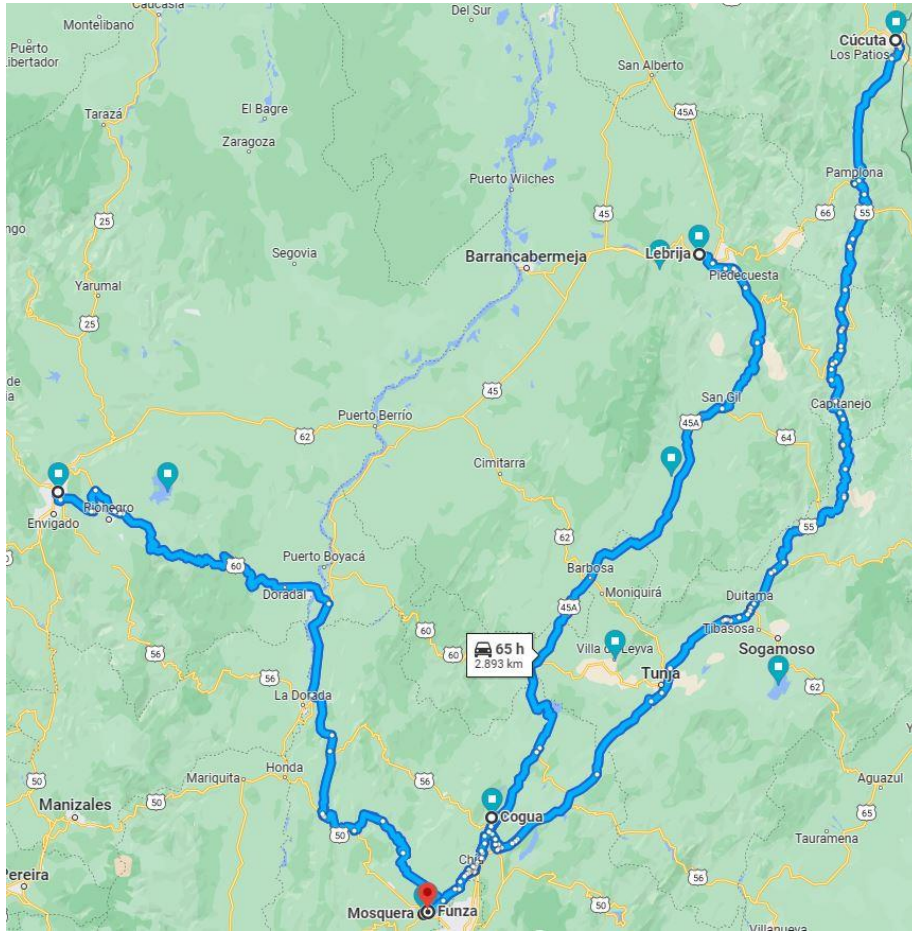


Tabla 10

Demanda mensual en unidades de leche.

DEMANDA MENSUAL (unidades)				
FUNZA	MOSQUERA	MEDELLIN	LEBRIJA	CUCUTA
90.000	322.000	42.000	28.000	14.000

Tabla 11

Disponibilidad, capacidad y máximo de viajes permitidos por tipo de vehículo.

	DISPONIBILIDAD DE CAMIONES (unidades)	CAPACIDAD DE LOS CAMIONES (#estibas)	NUMERO MÁX DE VIAJES
<i>SENCILLO</i>	5	16	20
<i>MINIMULA</i>	13	34	12
<i>TRACTOMULA</i>	9	42	15

Tabla 12

Costos asociados al transporte de distribución.

<i>DESTINOS</i>	COSTO PEAJES (COP)			COSTO DE COMBUSTIBLE (COP)		
	<i>TIPO DE VEHICULO</i>			<i>TIPO DE VEHICULO</i>		
	<u><i>SENCILLO</i></u>	<u><i>MINIMULA</i></u>	<u><i>TRACTOMULA</i></u>	<u><i>SENCILLO</i></u>	<u><i>MINIMULA</i></u>	<u><i>TRACTOMULA</i></u>
<i>FUNZA</i>	\$15,400	\$17,600	\$39,100	\$ 16,937.67	\$ 40,650.40	\$ 59,281.84
<i>MOSQUERA</i>	\$29,200	\$33,400	\$74,200	\$ 17,590.31	\$ 42,216.75	\$ 61,566.09
<i>MEDELLIN</i>	\$124,100	\$173,300	\$249,500	\$ 139,230.74	\$ 334,153.78	\$ 487,307.60
<i>LEBRJA</i>	\$140,000	\$176,000	\$205,000	\$ 114,678.89	\$ 275,229.34	\$ 401,376.13
<i>CUCUTA</i>	\$90,500	\$112,600	\$131,000	\$ 167,511.99	\$ 402,028.77	\$ 586,291.96

Los costos asociados a la mano de obra, o conductores contratados, se encuentran expuestos en la sección 6.5, esto dado que son datos obtenidos por cuenta propia para hacer del caso de estudio lo más cercano a la realidad.

6.4. Emisiones

Dentro de la información paramétrica suministrada se cuenta con datos sobre las emisiones de carbono de cada uno de los vehículos usados en la cadena de suministro. Dicha información se encuentra en kilogramos de CO₂ emitido por cada kilómetro recorrido y también (ver tabla 13).

Tabla 13*Emisiones de CO2 emitidas por tipo de vehículo.*

Emisiones de CO2 (Kg/km)			
<i>Arco de abastecimiento</i>		<i>Arco de distribución</i>	
<i>Turbo</i>	0.18	<i>Sencillo</i>	0.37
<i>Sencillo</i>	0.37	<i>Minimula</i>	0.88
<i>Doble troque</i>	0.62	<i>Tractomula</i>	1.28

6.5. Limpieza y ordenamiento de datos

Para lograr una mayor aproximación a la realidad del problema y hacer del modelo factible dentro de su enfoque, se ordenaron los datos y se tomaron consideraciones como se detalla a continuación. Los datos aportados por la empresa representan los resultados en un mes, y con el fin de observar un comportamiento de los datos bajo diferentes escenarios, estos se distribuyeron de forma uniforme en términos de semanas.

Los costos del arco de abastecimiento fueron totalizados para alimentar el modelo, es decir, se tuvo en cuenta la distancia total recorrida y su costo, para finalmente alimentar el modelo con una matriz de costo total por kilómetro recorrido en ese arco. Por otra parte, los costos por concepto de peajes en el arco de distribución se ajustaron para representar un solo trayecto, es decir solo ida, y así homogeneizar las unidades de los costos en dicho arco.

Este problema contiene unos supuestos necesarios para la factibilidad de su estudio:

- Se asume una eficiencia técnica de producción del 90% debido a errores en el almacenamiento o transporte, incidentes en la producción, extracción de sólidos después del tratamiento a altas temperaturas, no conformes, etc.

- La producción no se estudia por referencias de productos, sino que se toma una producción agregada.
- No se considera un inventario inicial, las primeras unidades en ser producidas son las primeras en ser despachadas en el momento que se tenga el pedido completo.
- La demanda es estática y homogénea para todos los periodos de tiempo.
- No se tomaron en cuenta los costos asociados a planta porque se quiere evaluar el impacto económico de parámetros de sostenibilidad y resiliencia en el transporte.
- Los tiempos de transporte en el arco de distribución fueron obtenidos por medio de la herramienta Google Maps, en horas en que se espera alto tráfico.
- El tiempo máximo legal de conducción para transporte de carga, es de 45 horas semanales. No se toma en cuenta el horario en que se organizaría el personal para cumplir con esta restricción.
- El costo por concepto de contratación de conductores se obtuvo a partir de un promedio nacional de pago por hora de conducción.
- No existen datos suficientes para abordar el problema desde las ganancias, solo se aborda desde los costos por concepto de abastecimiento y distribución.

Toda la información expuesta en esta sección se encuentra en el apéndice B.

7. Modelo matemático

A partir del caso de estudio expuesto en la sección 6, se realizó un modelo y se solucionó por medio de una Programación Lineal de Enteros Mixta (MILP), siguiendo las etapas del enfoque metodológico expuesto en la figura 19.

7.1. Descripción de la situación problema de optimización

El enfoque del problema a partir del caso de estudio consiste en la planeación de cantidades a transportar, el tipo de vehículo a usar, y la ruta a tomar de modo que se asegure el desarrollo de las actividades dentro de los parámetros de sostenibilidad establecidos, y al mismo tiempo fortalecer la resiliencia de la cadena al garantizar rutas alternativas de apoyo a las actividades de la cadena de suministro en caso de interrupciones viales.

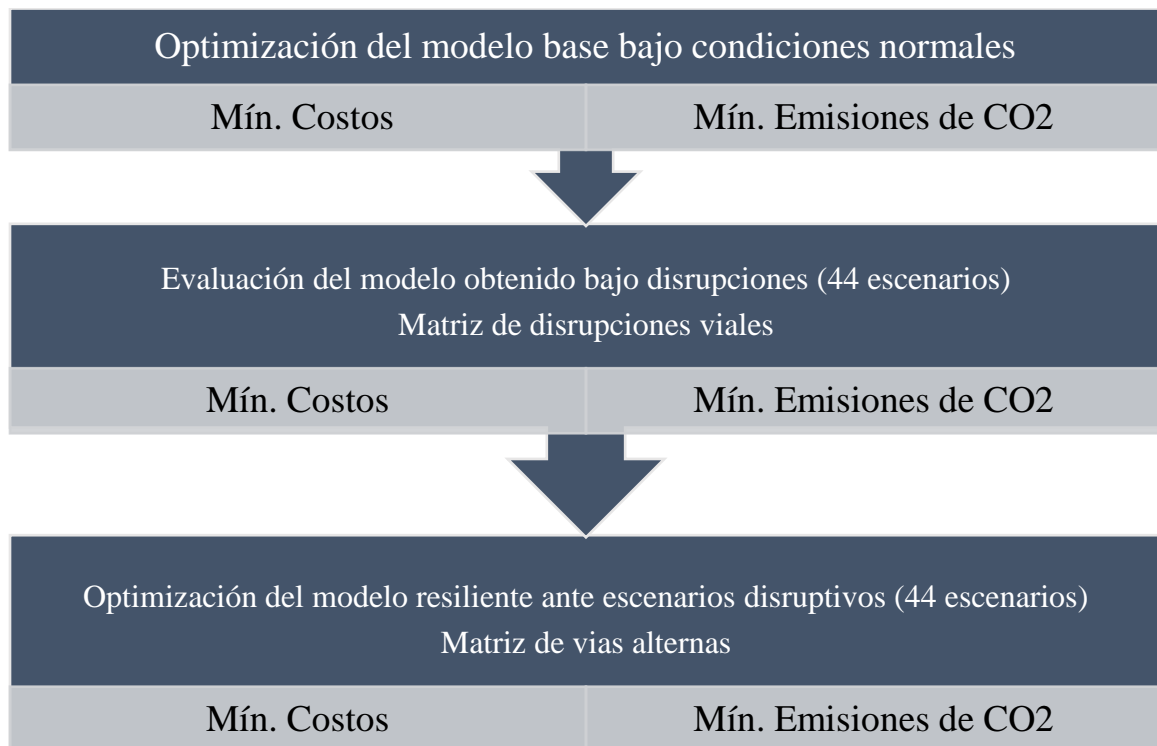
Se estudió una CS compuesta de proveedores y clientes dispersos geográficamente, que cuenta con transporte de capacidad y disponibilidad limitada, el cual a su vez funciona bajo dos modalidades: intermediarios y directo. Los objetivos principales en términos de sostenibilidad serán la reducción de costos por concepto de transporte y materia prima; la reducción de emisiones de carbono y la limitación de las horas a trabajar por conductor, es decir, priorizando el bienestar de los trabajadores, mientras se busca incrementar la oferta laboral. La resiliencia, por su parte, se abarca desde la disponibilidad de rutas alternas a tomar en caso de disrupciones viales y cómo éstas y su contexto geográfico afecta la planeación normal de la cadena de suministro. Lo anterior se plantea de acuerdo con los indicadores y sus dimensiones en Maning & Soon (2016).

Para este estudio, apoyado en el análisis dinámico implementado en Fahimnia & Jabbarzadeh (2016), en un primer momento se optimizará la CS teniendo como función objetivo la reducción del costo de la actividad y seguidamente se optimizará teniendo como función objetivo la reducción de emisiones de carbono de la cadena. Esto con el fin de observar y analizar

la brecha entre las dos configuraciones y los posibles *tradeoffs* o concesiones a realizar para el alcance del objetivo general. Seguido de esto se someten ambos modelos a simulación de escenarios disruptivos donde una o más rutas son interrumpidas, para finalmente evaluar estos escenarios disruptivos al habilitar las rutas alternas y analizar su impacto en el modelo y sus implicaciones a nivel estratégico, táctico y operacional (ver figura 19).

Figura 19

Enfoque metodológico para la obtención de resultados.



7.2. Parámetros y variables generales

El modelo del problema cuenta con los conjuntos expuestos en la tabla 14.

Tabla 14*Conjuntos del modelo.*

Conjunto	Índices
S	Set de proveedores, indexados por s
K	Set de plantas de procesamiento, indexadas por k
C	Set de clientes, indexados por c
I	Set de tipo de vehículos para proveedores, indexados por i
J	Set de tipo de vehículos para clientes, indexados por j
T	Set de semanas, indexadas por t

De igual forma, los parámetros del problema son los presentes en la tabla 15.

Tabla 15*Parámetros del modelo.*

Parámetros de entrada y escalares	
$O_{(s,t)}$	Oferta de leche cruda en litros del proveedor s por semana t (lt)
$CT_{(s,k,i)}$	Costo por viaje ida-vuelta en vehículo i a la planta k (COP)
$D1_{(s,k)}$	Distancia ida-vuelta desde el proveedor s a la planta k (km)
$D2_{(c,k)}$	Distancia ida-vuelta desde la planta k al cliente c (km)
$CS_{(i)}$	Capacidad del vehículo tipo i (lt)
$CC_{(j)}$	Capacidad del vehículo tipo j (und)
$D_{(t,c)}$	Demanda del cliente c en la semana t
$FU_{(k,c,j)}$	Costo de combustible por viaje (solo ida) usando vehículo tipo j de la planta k al cliente c (COP)

Continuación tabla 15*Parámetros del modelo.*

$P_{(k,c,j)}$	Costo por peajes (solo ida) usando vehículo tipo j de la planta k al cliente c (COP)
$M_{(j,t)}$	Máximo número de viajes usando el vehículo j
$AI_{(s,k,i)}$	Disponibilidad del vehículo tipo i en del proveedor s a la planta k
$AJ_{(j)}$	Disponibilidad del vehículo tipo j
$CI_{(i)}$	Emisiones de CO2 del vehículo tipo i (kg/km)
$CJ_{(j)}$	Emisiones de CO2 del vehículo tipo j (kg/km)
$SAL_{(j)}$	Salario de conductores del vehículo tipo j por hora (COP/hr)
$TT_{(k,c,j)}$	Tiempo de viaje (solo ida) de la planta k al cliente c usando vehículo tipo j (hr)
$MP_{(s)}$	Precio de la leche cruda del proveedor s (COP)
α	Litros de leche empacados por unidad = 0.9(lt)
ε	Eficiencia técnica de la planta = 90%
γ	Horas de conducción consecutivas permitidas por semana = 45 hr/sem

Las constantes como la eficiencia técnica y las horas de conducción permitidas fueron datos obtenidos a partir de informes del sector y documentos legales. Adicionalmente, las variables de decisión establecidas son las presentes en la tabla 16.

Tabla 16*Variables del modelo.*

Variables de decisión	
$X_{(s,i,k,t)}$	Litros a transportar desde el proveedor s usando el vehículo tipo i en la semana t (lt/sem)
$Y_{(k,c,j,t)}$	Unidades de leche a transportar desde la planta k al cliente c usando el vehículo tipo j en la semana t (und/sem)
$NS_{(s,k,i,t)}$	Viajes desde el proveedor s a la planta k usando el vehículo i en la semana t (viajes/sem)
$NC_{(k,c,j,t)}$	Viajes desde la planta k al cliente c usando el vehículo j en la semana t (viajes/sem)

7.3. Caso A: Minimización de costos

7.3.1. Variables auxiliares

Como soporte al análisis de resultados y al proceso de toma de decisiones se formularon las siguientes variables auxiliares:

- Total de emisiones de CO2 en la CS:

$$CO2T_{(t)} = \sum_{\forall i \in I} NS_{(skit)} * D1_{(sk)} * CI_{(i)} + \sum_{\forall j \in J} NC_{(kcjt)} * D2_{(ck)} * CJ_{(j)} \quad (1)$$

- Emisiones de CO2 en el arco de abastecimiento:

$$CO2S_{(skt)} = \sum_{\forall i \in I} NS_{(skit)} * D1_{(sk)} * CI_{(i)} \quad (2)$$

- Emisiones de CO2 en el arco de distribución:

$$CO2D_{(kct)} = \sum_{\forall j \in J} NC_{(kcjt)} * DZ_{(ck)} * CJ_{(j)} \quad (3)$$

- Costo total por viaje al usar el vehículo tipo j para ir al cliente c :

$$TJ_{(k,c,j)} = 2 * [FU_{(k,c,j)} + P_{(k,c,j)} + \{SAL_{(j)} * TT_{(k,c,j)}\}] \quad (4)$$

- Carga laboral en horas por semana de los transportadores en el arco de distribución:

$$WL_{(kcjt)} = NC_{(kcjt)} * 2 * TT_{(kcj)} \quad (5)$$

La ecuación 5 apoya el análisis de los parámetros de bienestar social y de los empleados.

7.3.2. Función Objetivo

El costo total de las operaciones es la suma de costo de transporte de abastecimiento, costo de materia prima y costo del transporte de distribución. Con esto en mente la ecuación (6) es la función objetivo del caso A.

$$\begin{aligned} \text{Min. CT} = & \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [NS_{(sikt)} * CT_{(ski)}] + \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [X_{(sikt)} * MP_{(s)}] \\ & + \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall c \in C} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [NC_{(kcjt)} * TJ_{(ikc)}] \end{aligned} \quad (6)$$

7.4. Caso B: Minimización de emisiones de CO2

7.4.1. Variables auxiliares

- Costo total de la operación: Esta ecuación es igual al número de viajes en cada arco (NS, NC) por el costo asociado respectivamente (CT, TJ), más el costo de materia prima (MP) por la cantidad adquirida de cada proveedor (X).

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [NS_{(sikt)} * CT_{(ski)}] + \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [X_{(sikt)} * MP_{(s)}] \\ & + \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall c \in C} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [NC_{(kcjt)} * TJ_{(ikc)}] \end{aligned} \quad (7)$$

- Emisiones de CO2 en el arco de abastecimiento:

$$CO2S_{(skt)} = \sum_{\forall i \in I} NS_{(skit)} * D1_{(sk)} * CI_{(i)} \quad (8)$$

- Emisiones de CO2 en el arco de distribución:

$$CO2D_{(kct)} = \sum_{\forall j \in J} NC_{(kcjt)} * D2_{(ck)} * CJ_{(j)} \quad (9)$$

- Costo total por viaje al usar el vehículo tipo j para ir al cliente c:

$$TJ_{(k,c,j)} = 2 * [FU_{(k,c,j)} + P_{(k,c,j)} + \{SAL_{(j)} * TT_{(k,c,j)}\}] \quad (10)$$

- Carga laboral en horas por semana de los transportadores en el arco de distribución:

$$WL_{(kcjt)} = NC_{(kcjt)} * 2 * TT_{(kcj)} \quad (11)$$

7.4.2. Función Objetivo

La función objetivo en este caso es la suma de las emisiones de carbono en ambos arcos, por lo que las variables priorizaran el uso más eficiente en términos de emisiones, de los vehículos disponibles. La ecuación (12) ilustra dicha relación.

Min. Emisiones CO2 =

$$\sum_{\forall i \in I} NS_{(skit)} * D1_{(sk)} * CI_{(i)} + \sum_{\forall j \in J} NC_{(kcjt)} * D2_{(ck)} * CJ_{(j)} \quad (12)$$

7.5. Restricciones generales

Las restricciones a continuación son usadas para mantener el modelo dentro de los parámetros de producción reales y asegurar el cumplimiento de la demanda.

$$\sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall i \in I} X_{(sikt)} \leq O_{(st)} \quad (13)$$

$$\sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall k \in K} Y_{(ckjt)} = D_{(ct)} \quad (14)$$

$$\sum_{\forall c \in C} \sum_{\forall k \in K} NC_{(kcjt)} \leq M_{(jt)} * AJ_{(j)} \quad (15)$$

$$Y_{(kcjt)} \leq NC_{(kcjt)} * CC_{(j)} \quad (16)$$

$$X_{(sikt)} \leq NS_{(skit)} * CS_{(i)} * AI_{(ski)} \quad (17)$$

$$\sum_{\forall c \in C} \sum_{\forall j \in J} Y_{(kcjt)} * \alpha \leq \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall i \in I} X_{(skit)} * \varepsilon \quad (18)$$

$$X_{(sit)}, Y_{(cjt)}, Z_{(cjt)}, NS_{(sit)}, NC_{(cjt)}, XI_{(sit)}, XJ_{(cjt)} \geq 0 \quad \forall \quad (19)$$

La ecuación (13) asegura que lo recogido del proveedor i no sea más de lo que oferta. Mientras que la ecuación (14) asegura que se cubra la demanda. La ecuación (15), limita el número de viajes en el arco de distribución, teniendo en cuenta el número de vehículos disponibles. Las ecuaciones (16) y (17) aseguran que no se sobrepase la capacidad de cada tipo de vehículo, y finalmente, la ecuación (18) asegura el balance en la producción.

7.6. Indicadores clave

7.6.1. Indicador de costos

- El indicador de económico está determinado por la ecuación (20). Esta ecuación es igual al número de viajes en cada arco (NS , NC) por el costo asociado respectivamente (CT , TJ), más el costo de materia prima (MP) por la cantidad adquirida de cada proveedor (X).

$$\begin{aligned} & \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [NS_{(sikt)} * CT_{(ski)}] + \sum_{\forall i \in I} \sum_{\forall s \in S} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [X_{(sikt)} * MP_{(s)}] \\ & + \sum_{\forall j \in J} \sum_{\forall c \in C} \sum_{\forall k \in K} \sum_{\forall t \in T} [NC_{(kcjt)} * TT_{(ikc)}] \end{aligned} \quad (20)$$

7.6.2. Indicador de impacto medio ambiental

El indicador de impacto ambiental está determinado por la ecuación (11) que considera los kg emitidos de CO2 de acuerdo con el número de viajes realizados, la distancia recorrida y el consumo de combustible.

$$\sum_{\forall i \in I} NS_{(skit)} * D1_{(sk)} * CI_{(i)} + \sum_{\forall j \in J} NC_{(kcjt)} * D2_{(ck)} * CJ_{(j)} \quad (21)$$

7.6.3. Indicador de impacto social

El indicador de impacto ambiental se determina mediante la ecuación (22), donde se calculan las horas de conducción del arco de distribución multiplicando el tiempo total de cada viaje (TT) por el número de viajes totales (NC); y, al dividirlo por γ , se calcula el número de empleados a contratar de forma que se garantice el bienestar de los conductores al no permitir horas de conducción por encima del límite de 45 horas semanales.

$$WL_{(kcjt)} = \frac{NC_{(kcjt)} * 2 * TT_{(kcj)}}{\gamma} \quad (22)$$

8. Escenarios disruptivos

Existen diferentes tipos de posibles interrupciones a lo largo de una cadena de suministro. Los escenarios disruptivos en el presente caso de estudio se basan en el cierre de vías o la interrupción entre nodos. Dichas interrupciones de transporte son representadas por los cierres viales en las carreteras colombianas, los cuales han sido extensamente analizadas por el Prof. Nicolas Clavijo-Buritica, quien ha contribuido y orientado el desarrollo de la presente investigación. En su investigación conjunta con el Ministerio de Transporte – Instituto Nacional de Vías (INVIAS), el autor ha consolidado y analizado el comportamiento de estas interrupciones para el periodo comprendido entre 2018 y 2020 (Clavijo-Buritica, Abushaega, González, Amorim, & Polo, 2021). A partir de los conjuntos de datos estructurados, se han identificado las probabilidades de cierres viales y consecuentemente el diseño de la experimentación, la cual consistió en:

- Simular cierres aleatorios en los arcos, siguiendo una distribución de probabilidad discreta Poisson con $\lambda = 0.009$. Cada corrida constituye un escenario.
- Luego, se corre el modelo de optimización para una pequeña muestra de 15 escenarios. De acuerdo con los resultados de las variables de salida, se mide su tendencia media, valor esperado X y desviación estándar σ .
- Con base en esto, se calcula el número de veces que se debe correr la simulación del presente caso de estudio (ver tabla 17) a partir de una ecuación de muestreo (23), considerando Z como el valor de la distribución normal estándar, y e representa un error del 0.05.

$$N = \left[\frac{\sigma * Z}{e * X} \right] \quad (23)$$

Tabla 17*Escenarios generados con sus respectivas interrupciones en cada arco.*

Disrupciones en el arco de abastecimiento								Disrupciones en el arco de distribución				
SUP1	SUP2	SUP3	SUP4	SUP5	SUP6	SUP7	SUP8	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
E1								E1				
E2								E2				
E3								E3	X			X
E4								E4				
E5						X		E5				
E6								E6				
E7								E7				
E8								E8	X			
E9	X							E9				
E10								E10				
E11	X			X				E11		X		
E12								E12				
E13								E13			X	
E14					X			E14				
E15								E15				
E16								E16	X	X		X
E17								E17				
E18								E18				
E19		X						E19				
E20	X							E20				
E21		X						E21	X			
E22	X							E22				
E23								E23				
E24								E24				X
E25					X			E25				
E26								E26				
E27	X		X					E27	X			
E28								E28	X		X	X
E29								E29				
E30				X				E30				
E31	X							E31				
E32								E32	X		X	

Continuación tabla 17*Escenarios generados con sus respectivas interrupciones en cada arco.*

E33			E33
E34	X	X	E34
E35			E35
E36			E36
E37		X	E37
E38			E38
E39			E39
E40	X		E40
E41			E41
E42	X		E42
E43			E43
E44			E44
			X

9. Resultados y análisis

En los problemas multiobjetivo donde dichos objetivos son conflictivos entre sí, no existe una solución única universal que pueda optimizar el sistema. Es aquí cuando se habla de los *tradeoffs* o concesiones que se hacen en uno de los parámetros con el fin de beneficiar a otro, y donde dicha solución o soluciones son conocidas como óptimos de Pareto. Para el problema estudiado en el presente trabajo de investigación, de acuerdo con la metodología expuesta en la figura 19 se realizará un análisis dinámico entre los escenarios en a) contexto normal, b) bajo disrupciones, y c) resilientes, los cuales se implementan por medio del software GAMS y se resuelven por medio del *solver* CPLEX, para así identificar los agentes claves en la CS y la sensibilidad del sistema ante cambios en sus parámetros.

9.1. Configuración bajo condiciones normales

Inicialmente, se plantea una configuración de la cadena general para así establecer cuáles son los mejores parámetros o mejores condiciones normales de la empresa. Esto se evalúa para los dos casos: a) minimización de costos y b) minimización de emisiones de CO₂. Los resultados concretos se encuentran en la tabla 18. Consecutivamente, se analizan los posibles *tradeoffs* entre los objetivos económicos y no económicos en una configuración bajo condiciones normales.

Tabla 18

Resultados de variables en caso A y B.

Caso A		Caso B	
<i>X</i>	496000 (lt)	<i>X</i>	497766 (lt)
<i>Y</i>	496000 (und)	<i>Y</i>	496000 (und)
<i>NS</i>	49 (viajes)	<i>NS</i>	77 (viajes)
<i>NC</i>	40 (viajes)	<i>NC</i>	72 (viajes)
<i>OF</i>	\$ 629,129,123.78 (COP)	<i>OF</i>	8945.87 (Kg CO ₂)
<i>WL</i>	773.44 (hrs)	<i>WL</i>	1037.76 (hrs)
<i>CO₂T</i>	10877.136 (Kg CO ₂)	<i>CT</i>	\$ 672,802,800.00 (COP)

En teoría, conciliar los objetivos ambientales y económicos de una organización es un reto debido a su relación inversamente proporcional. Lo anterior se ve claramente reflejado en los resultados obtenidos al optimizar el modelo para ambos casos (Ver tabla 18).

Al optimizar el costo de las operaciones, caso A, se incrementan las emisiones de CO₂ en un 22%, es decir, se generan 1931.27 Kg de CO₂ adicionales al óptimo del caso B. Y, de la misma forma, al priorizar la reducción de las emisiones de CO₂, se incurre en unos sobrecostos del 7%, es decir que, el establecer una configuración de su CS sostenible, le cuesta a la empresa \$43'679.676,22 COP. En términos de costos por unidad, el incremento por aplicar una configuración sostenible sería de aproximadamente \$88 COP.

Curiosamente, y a diferencia de las implicaciones que se pueden asumir al momento de hablar de minimizar el impacto ambiental, en el caso B se realizan más viajes que en el caso A. Lo anterior se debe a que los vehículos de menor capacidad también generan la menor cantidad de emisiones, tanto así que pueden realizar en promedio 1.6 viajes adicionales para igualar la capacidad de los vehículos más grandes y aun así las emisiones que generan son un 22% menor a las emitidas por los vehículos de mayor capacidad. (Ver figura 20 y 21)

Adicional a esto, el incremento en los viajes también incide directamente en las horas de conducción por semana (WL). El escalar γ , nos permite determinar la mano de obra necesaria a contratar para mantener el bienestar de los transportistas al igual que genera empleo y recursos adicionales, lo cual es una buena estrategia para fortalecer la resiliencia. En este caso, al implementar parámetros de sostenibilidad, las horas de conducción se incrementaron lo cual conlleva a la contratación de seis conductores adicionales.

Figura 20

Tipo de vehículos usados en el arco de abastecimiento.

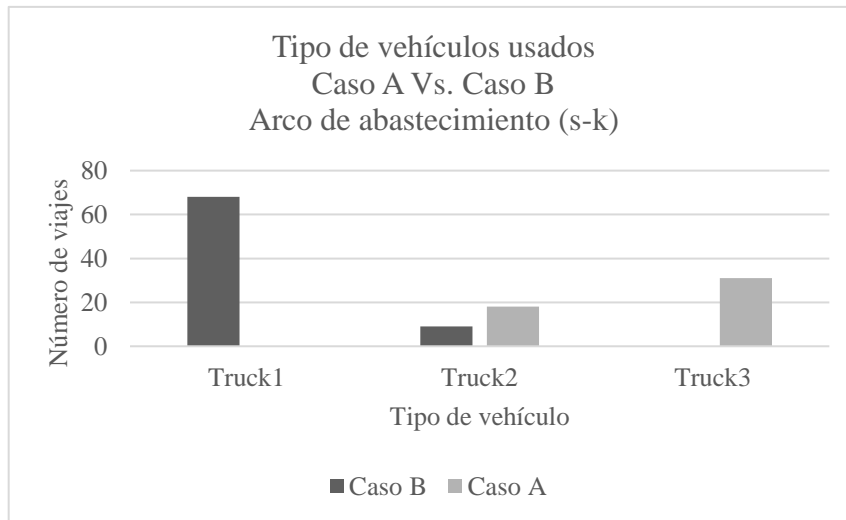


Figura 21

Tipo de vehículos usados en el arco de distribución.

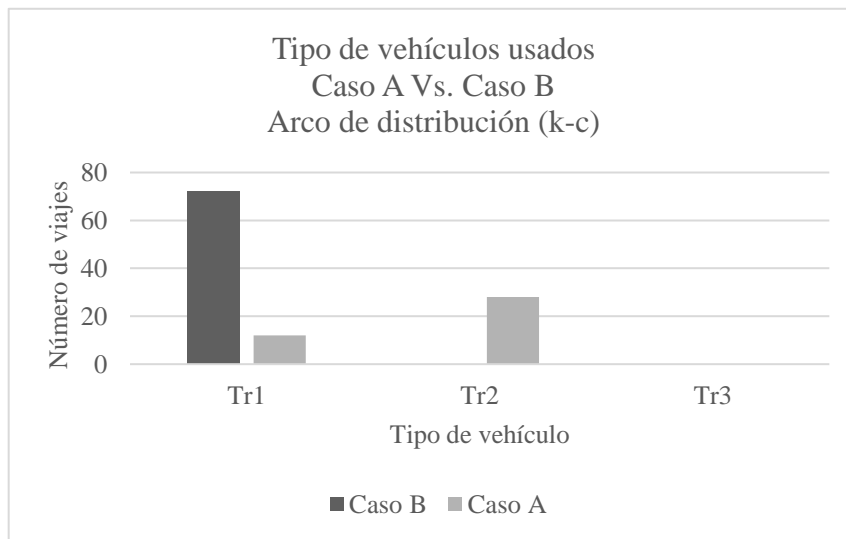
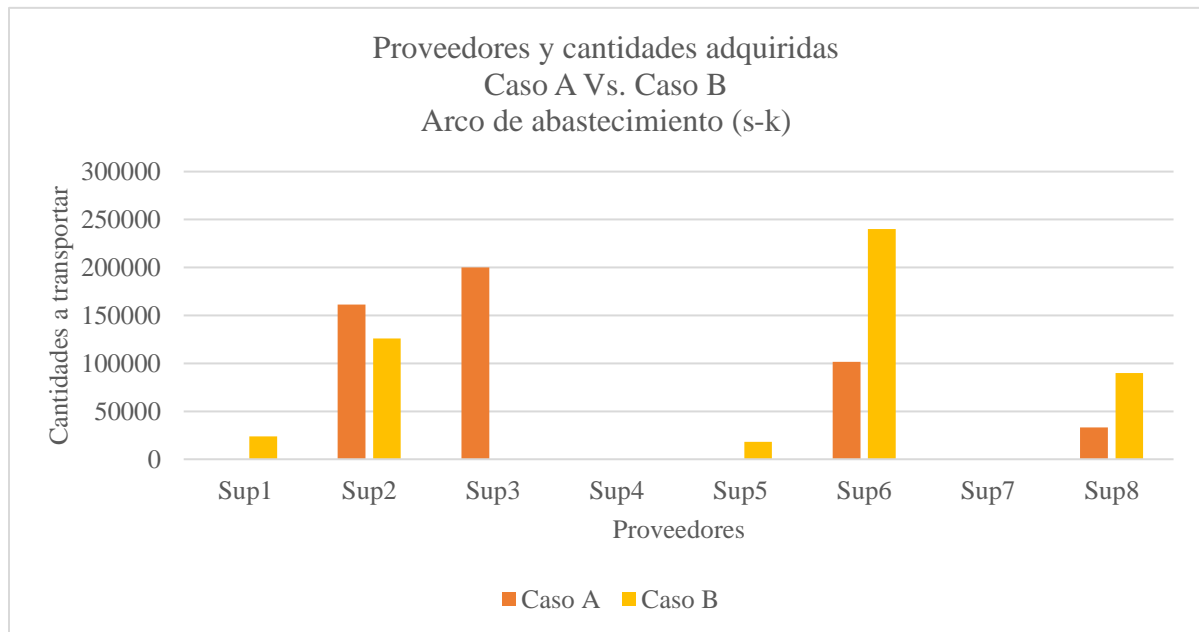


Figura 22

Comparación de proveedores y cantidades adquiridas en el arco de abastecimiento.



El proveedor de mayor importancia al priorizar los costos es el proveedor 3, lo cual se explica en el hecho de que tiene el menor costo de materia prima (\$1.235 COP/lit) y al mismo tiempo es el tercer proveedor con menor distancia hasta la planta (95.4 Km). Y, al optimizar las emisiones de CO₂, el proveedor 6 es el más relevante. En este caso la gran mayoría de la leche cruda se obtiene de dicho proveedor, lo cual tiene sentido ya que es el más cercano a la planta (72.4 Km), y, para beneficio de la empresa, el costo de dicho proveedor (\$1.320 COP/lit), se mantiene por debajo del costo promedio (\$1.386 COP/lit).

En los dos casos el proveedor 4 y 7 son obsoletos dada su larga distancia, y se observa que el proveedor 3, favorece los objetivos económicos y afectaría negativamente los no económicos. En el caso contrario, los proveedores 1, 5 y 6 son los más favorecidos en los objetivos no económicos. En ambos arcos el vehículo 1 favorece los objetivos no-económicos, mientras que los vehículos de mayor capacidad como el 2 y 3 favorecen los objetivos económicos. (Ver figura 22)

En resumen, se concluye que los objetivos no económicos afectan críticamente las decisiones de abastecimiento, y por resultado, afecta a toda la cadena de suministro. Y, al comparar estas dos configuraciones se determina que aplicar una configuración sostenible en su CS le implica a la empresa un costo de \$22.614,01 COP por kilogramo de CO₂ no emitido, al mismo tiempo que genera un incremento en la oportunidad laboral del 34%.

9.2. Configuración ante escenarios disruptivos

Como se expuso en el capítulo 8 y continuando con el enfoque metodológico ilustrado en la figura 19, a continuación, se someten los dos casos a 44 posibles escenarios disruptivos, con variaciones concentradas en las rutas disponibles para cumplir con la actividad principal de la CS. Aquellas rutas en el arco de distribución que fueron afectadas reflejan su impacto en la pérdida de ventas en todos los casos como ve en la figura 23. Mientras que en el peor de los casos se pierde el 18% de las ventas (escenario 28), en promedio, entre el 3% y 4% de las ventas fueron insatisfechas.

En la figura 24, se exponen los escenarios con interrupciones y sus impactos en la CS al optimizar los costos en medio de una situación anormal. La magnitud del impacto depende de la relevancia inicial del agente en que enfrenta la situación. Por ejemplo, en el escenario 3 se tiene cifras muy buenas, inclusive mejores que los resultados en un contexto normal, con emisiones totales de 9582.65 Kg CO₂ y costos totales de \$520'396.927,90 COP. Sin embargo, las interrupciones fueron solamente en el arco de distribución, por lo que la verdadera pérdida se ve reflejada en la relación con el cliente al incumplir con los pedidos, y costo de oportunidad por no cubrir dicha demanda.

Figura 23

Perdida de ventas ante disrupciones.

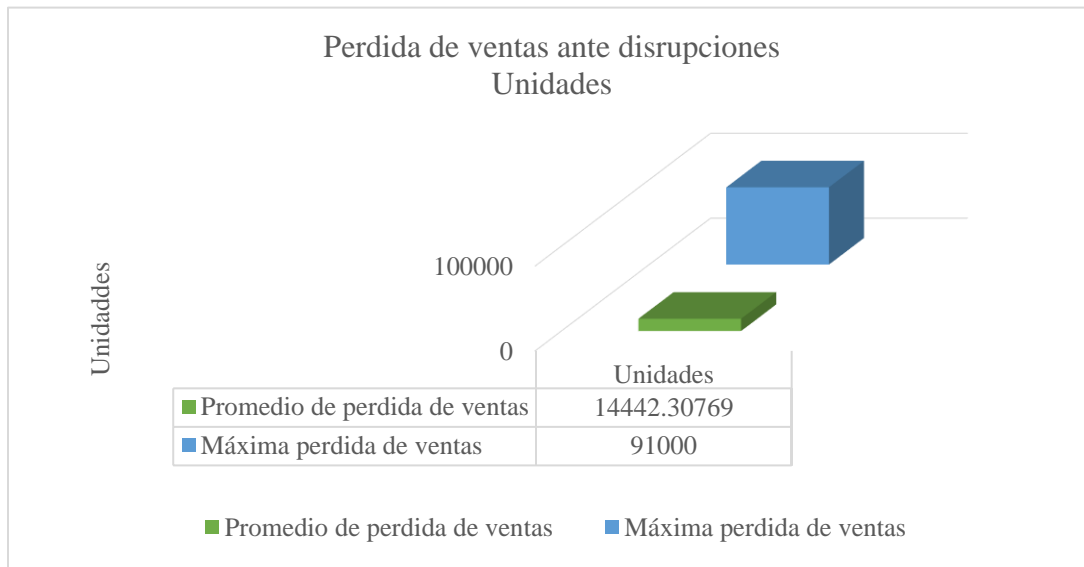
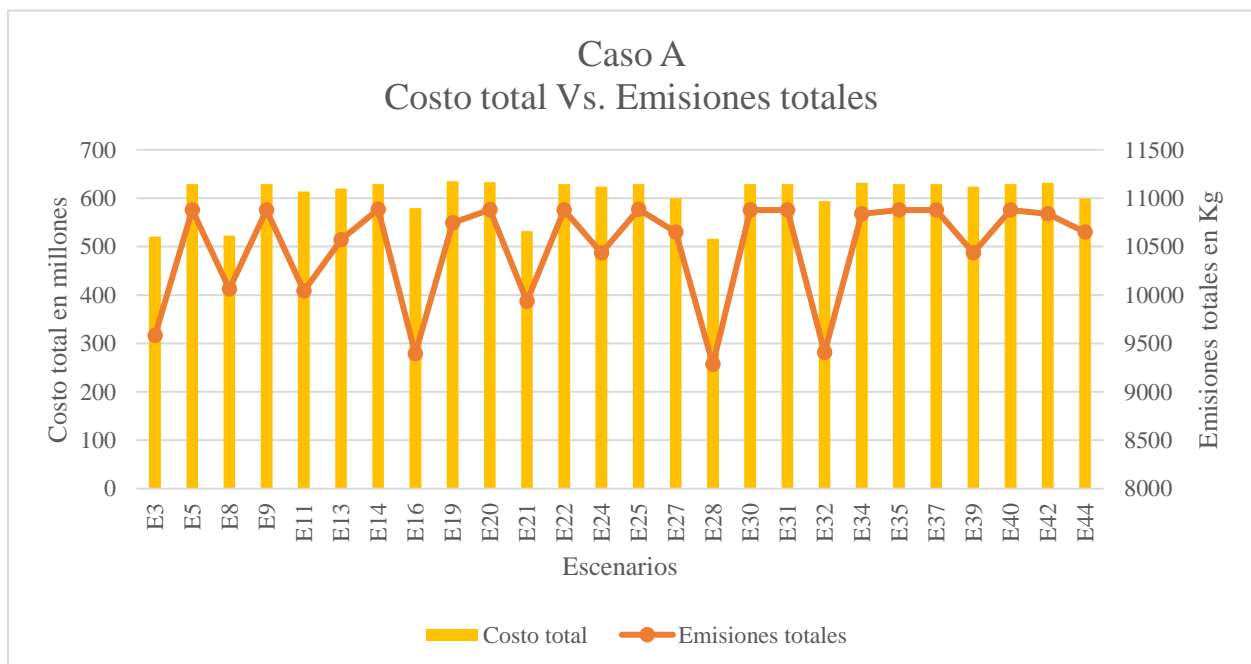


Figura 24

Costo total Vs. Emisiones en el caso A.



El escenario 5, por otra parte, mantiene la misma configuración y resultados que un día normal. Esto explica en que las disrupciones viales solo se dieron en el arco de abastecimiento, y,

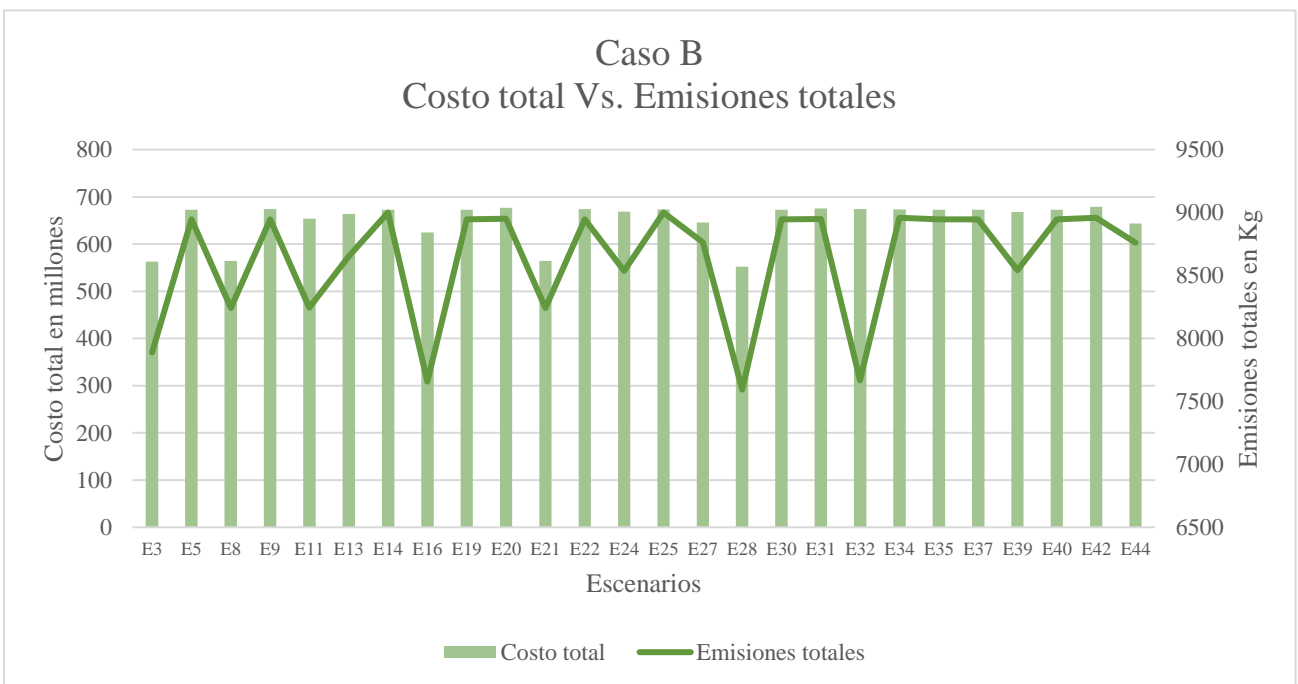
además, la ruta afectada fue la del proveedor 7 el cual como se evidencia en la figura 24, no es relevante para esta CS.

Ahora bien, los escenarios 19 y 20 presentan los costos y emisiones más altas dado que, aunque no presentan interrupciones en el arco de distribución, las interrupciones en el arco de abastecimiento son precisamente con los proveedores más relevantes para la minimización de costos, como lo son los proveedores 2 y 3. Por la restricción de cumplimiento de demanda, se debe recurrir a la materia prima de proveedores mucho más costosos y lejos de la planta, disparando todos los indicadores de sostenibilidad. Así mismo, los escenarios 14 y 25 presentan las cifras más altas en general dado que la interrupción se dio en el arco de abastecimiento y, además, con el proveedor 6 de gran impacto en la CS.

Con respecto al caso B se observó el comportamiento descrito en la figura 25.

Figura 25

Costo total Vs. Emisiones en el caso B



El escenario 28 es bastante optimista en ambos casos, sin embargo, esto se debe a que solo presenta interrupciones en el arco de distribución, por lo que no puede cumplir a los clientes y no incurre en costos ni emisiones. Los escenarios 16 y 32 presentan la misma situación para ambos casos.

Claramente los escenarios con impactos negativos son aquellos con interrupciones en el arco de abastecimiento ya que esta parte del ejercicio se enfoca precisamente en la observación de impactos, más no en el estudio de las alternativas. A partir de esta fase entonces se identifican los actores principales.

Se realizó un análisis de sensibilidad a los proveedores 2, 3 y 6 a partir de los escenarios 14, 19, 20 y 25 ya que cuentan con interrupciones únicamente en el arco de abastecimiento, por lo que se somete el modelo a tener que satisfacer una demanda en condiciones normales sin poder contar con uno de sus proveedores principales.

Se concluyó que los proveedores 2 y 3 tienen mayor impacto en los costos de la CS, mientras que no aportan un cambio significativo en las emisiones de carbono. De igual forma el proveedor 6 impacta significativamente las emisiones de carbono, más no es relevante en los costos de las operaciones. Es de mencionar sin embargo que la sensibilidad no superó el 1% en ninguno de los casos, lo cual es positivo para el contexto empresarial en el cual la sostenibilidad financiera de la CS es relativamente independiente.

9.3. Configuración resiliente

En esta última fase se introducen en el modelo rutas alternas para, en caso de una interrupción vial, calcular las implicaciones de tomar dicha vía alterna. En esta parte del ejercicio se observó el comportamiento ilustrado en la figura 26 y 27. (Ver apéndice F)

Figura 26

Costo total Vs. Emisiones en el caso A (modelo resiliente).

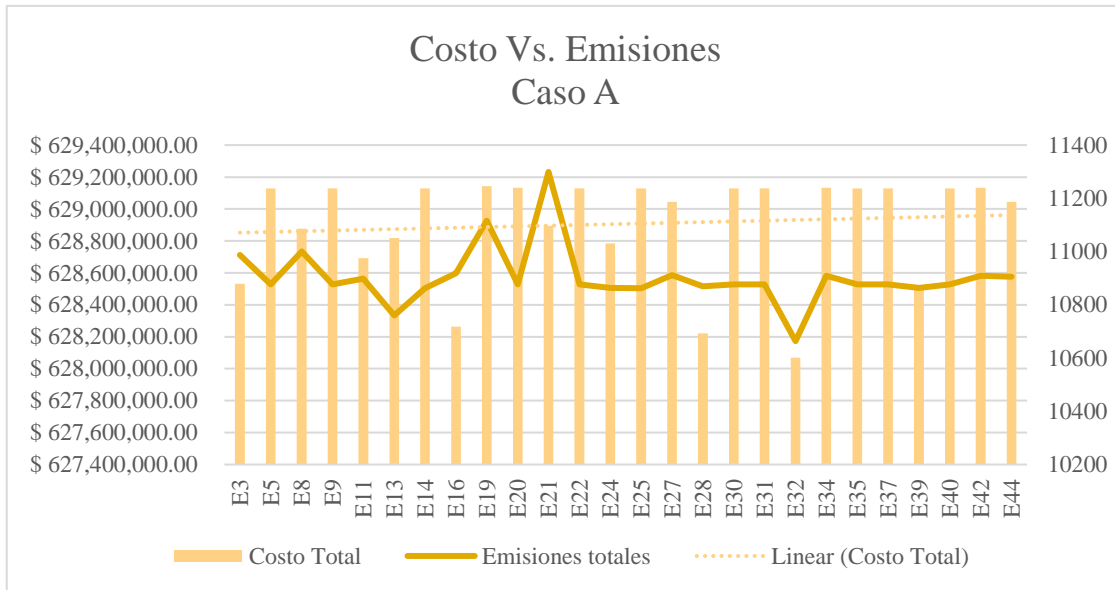
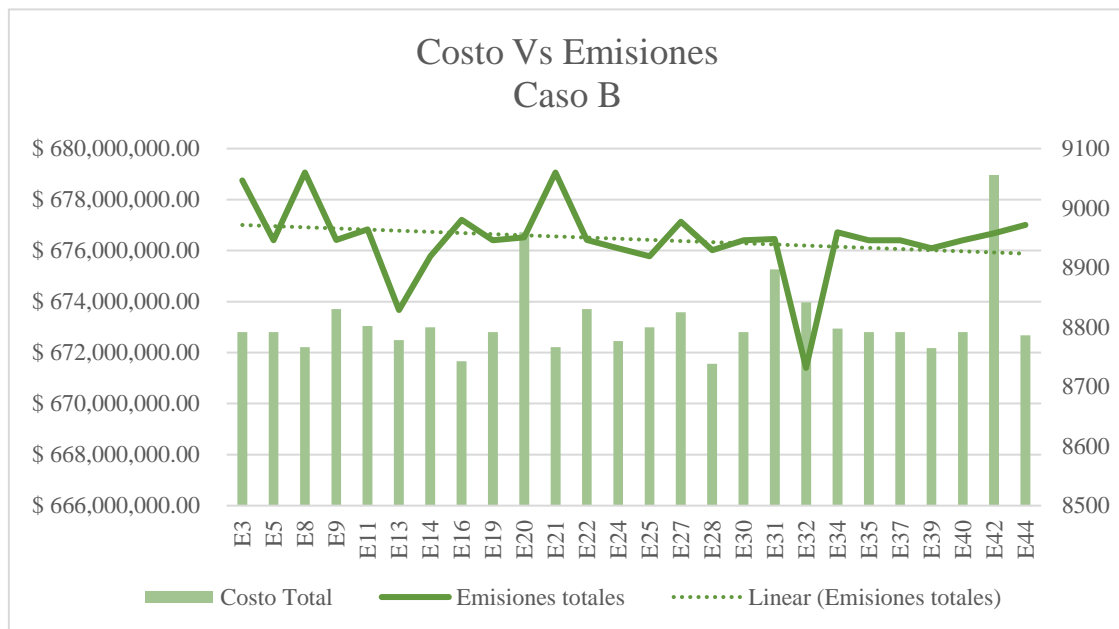


Figura 27

Costo total Vs. Emisiones en el caso B (modelo resiliente).



En el caso A, el comportamiento de los costos en general no superó un aumento de más del 1% en todos los casos, sin embargo, curiosamente se notan reducciones en los costos. Esto se debe a que las rutas alternas evaluadas, al no ser troncales principales no cuentan con peajes, igual que el flujo de tránsito es menor que en las vías principales por lo que representa en sumatoria una reducción de costos. Este comportamiento es similar en el caso B, donde los costos solo aumentan en un 1% en el peor de los casos.

Este impacto relativamente positivo no debe ser percibido como el descubrimiento de una mejor configuración para el día a día de la cadena de suministro, ya que detrás de los bajos costos y la ausencia de peajes, está el mal estado de las vías, lo cual afecta el mantenimiento de los vehículos de transporte, el buen estado de los productos transportados y la posibilidad de transitar dichas vías alternas con vehículos de mayor capacidad dado que son vías secundarias estrechas. Por ende, se deben entender como opciones en casos extremos.

Con respecto a las emisiones, en el caso A se reflejó un aumento no superior al 4%, mientras que en el caso B se mantuvieron iguales en promedio. Esto, dado que las distancias son similares y en los peores casos se realizó cambios en el vehículo a usar.

El escenario 13, no presentó interrupciones en el arco de abastecimiento. Sin embargo, en el arco de distribución, la vía al cliente 4 en la semana 3, se vio comprometida. La vía alterna para este caso es de mayor distancia y menor tráfico, lo que influyó en los costos por concepto de mano de obra o personal transportista. Dicha vía tampoco cuenta con peajes, y el vehículo seleccionado para ambos casos es el tipo 1 de bajas emisiones, por lo que en el escenario 13 se obtienen en general resultados favorecedores para ambos parámetros.

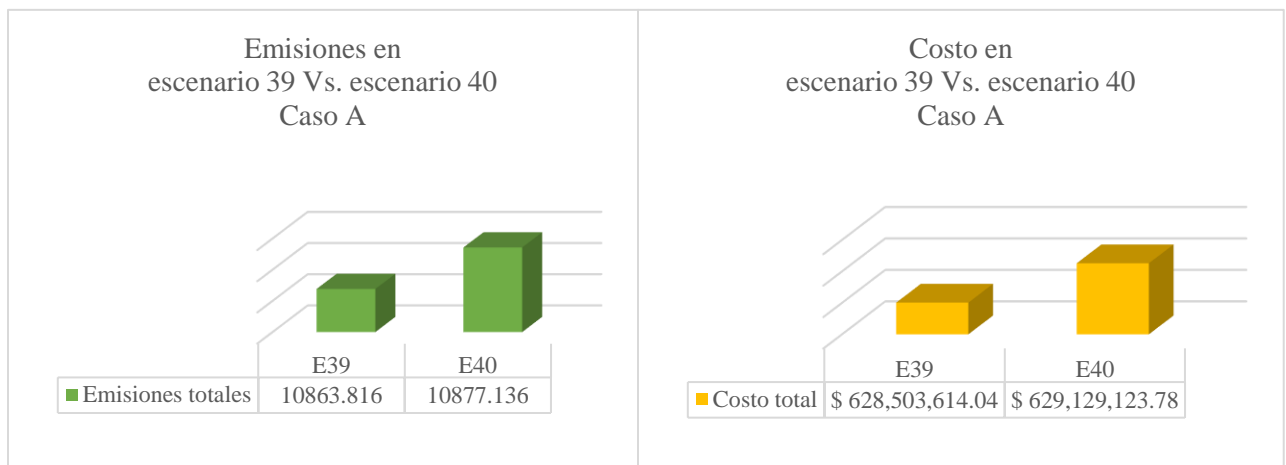
El escenario 16 también tuvo resultados interesantes y opuestos al escenario 13, ya que mantiene altas emisiones de carbono y relativamente bajos costos. Este escenario no cuenta con

disrupciones en el arco de abastecimiento, pero afronta tres disrupciones en el arco de distribución: Clientes 1, 3 y 5. Las rutas alternas son de mayor distancia y menor tiempo de conducción, lo cual explica la relación reflejada en la figura 28. Además, la ruta del cliente 1 no tiene peajes en ningún sentido, y las rutas que sí tienen peajes, son por un costo menor al de las troncales principales. Finalmente, dentro de las observaciones está el hecho de que esta configuración reduce considerablemente las horas de conducción, lo cual afecta la generación de mano de obra que se busca incentivar en la CS.

Finalmente, en el caso A, los escenarios 39 y 40 resultan interesantes ya que el escenario 39 presenta disrupciones en el arco de distribución (cliente 5), y el escenario 40 en el arco de abastecimiento (proveedor 1), siendo ambos agentes relevantes en la CS.

Figura 28

Costo y emisiones, caso A, escenarios 39 Vs. 40.



Con base en la figura 28, se puede observar que el arco de abastecimiento tiene mayor incidencia en los costos de la CS (escenario 40), mientras que sin importar en qué arco se den las disrupciones, las emisiones de CO2 se mantienen similares, con una tendencia al aumento cuando se afecta el arco de abastecimiento (escenario 39).

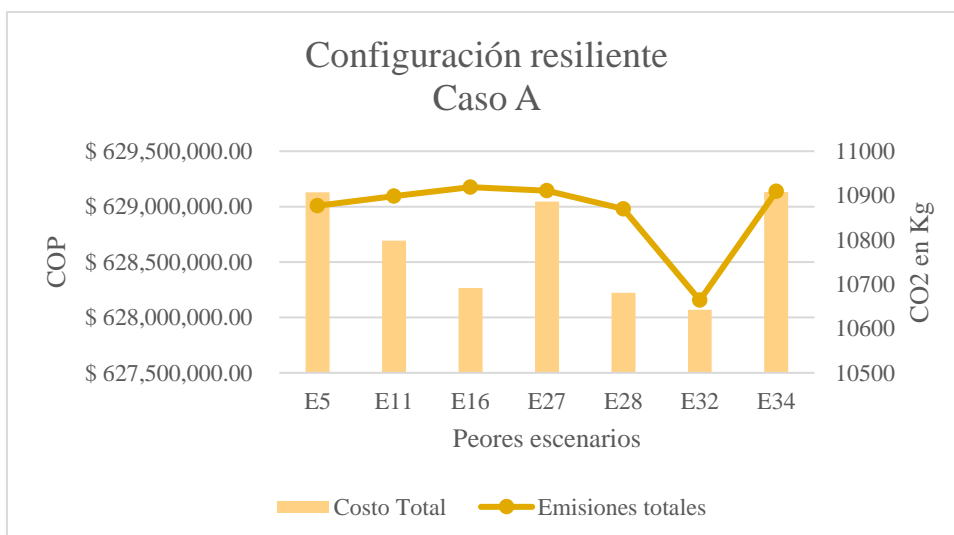
Finalmente, en el escenario 34 se observa que presenta interrupciones en un proveedor principal como lo es el proveedor 2 y ninguna en el arco de distribución. En el caso A, la solución óptima es tomar la vía alterna e incurrir en los costos extra y aumento de emisiones. Sin embargo, en el caso B, la solución óptima es recurrir a los proveedores 1 y 3 para cubrir la falta de materia prima, en vez de tomar la ruta alterna y de esta forma no aumentar las emisiones.

Como observación general, en las configuraciones resilientes, el arco más sensible o de mayor cambio en sus parámetros fue el de distribución. Esto se debe a que la demanda se debe cubrir, por lo que el sistema está obligado a tomar las vías alternas sin importar su impacto en los objetivos. En el arco de abastecimiento se tienen opciones en caso de que una vía falle, por lo que se puede tomar la decisión de tomar una vía o un proveedor alternos para cubrir esa demanda. Sin embargo, cambios en este arco han demostrado ser de mayor impacto en los resultados de los objetivos propuestos para la CS.

9.3.1. El peor escenario posible

Figura 29

Costo total Vs. Emisiones en el caso A, peores casos.



De acuerdo con el trabajo de Fahimnia & Jabbarzadeh (2016), la resiliencia se puede abordar desde el análisis del peor caso posible ya sea con el fin de crear redundancias que apoyen un posible peor caso o para abordarlo desde los protocolos de respuesta. Con base en esto se realiza el presente análisis del peor caso posible, es decir con dos o más interrupciones, y del caso con mayor probabilidad de ocurrir.

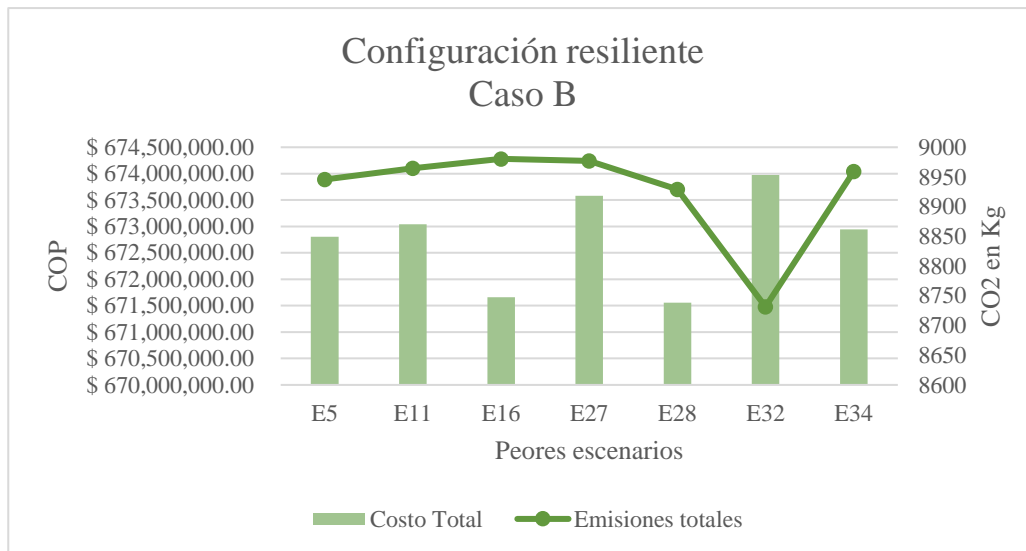
Los escenarios 11, 16, 27, 28 y 34 siguen relativamente el mismo comportamiento, cambiando en magnitud dependiendo de la función objetivo del modelo. El escenario 5 permanece inalterado dado que el proveedor 7 no tiene efecto en la configuración de la CS, solamente cambia de acuerdo con el caso.

Por otra parte, el escenario 32 presenta en ambos casos las menores emisiones de CO₂, y en el caso A, una reducción muy significativa en los costos. Nuevamente nos enfrentamos a un escenario sin interrupciones en el arco de abastecimiento, y tres interrupciones en el arco de distribución, esta vez solo en las vías a dos clientes: 3 y 4. Esto se explica para el caso A en que las rutas alternas son de mayor distancia en comparación con las originales, mientras que los tiempos de conducción son más bajos. Y, respecto al caso B, no se hace uso del proveedor 1 sino que se adquiere la materia prima del proveedor 5, lo cual aumenta las emisiones y disminuye preocupantemente las horas de conducción, dado que las rutas alternas a los clientes se recorren más rápido.

En la sección 9.1.1. se resaltó que el escenario 28, es aquel con el mayor número de pérdida en las ventas debido a las interrupciones. En este escenario, una vez activadas las rutas alternas, se cumple con la demanda total, disminuyendo costos y emisiones, aunque aumenten los riesgos dado el estado de las carreteras.

Figura 30

Costo total Vs. Emisiones en el caso B, peores casos.



A partir de lo anterior se evidencia que las interrupciones en el arco de abastecimiento impactan en mayor grado el costo de las operaciones, mientras que las interrupciones en el arco de distribución impactan en mayor grado las emisiones de CO₂, las cuales en promedio tienden a la baja, pero se exponen a riesgos dado el mal estado de la vía alterna.

9.3.2. El escenario con más probabilidad de suceder

Los escenarios 9 y 22 son los más probables ya que tienen una probabilidad de 1 en 22 de suceder. Dicho escenario solo cuenta con interrupciones en el arco de abastecimiento, donde los agentes más relevantes en la configuración resiliente que hace frente en estos escenarios son los vehículos 1 y 2 para el arco de abastecimiento, y el vehículo 1 para el arco de distribución. Y, con respecto a los proveedores, en el modelo de objetivos no económicos, el proveedor 5 sustituyó la materia prima que se recogía del proveedor 1, aumentando así los costos y manteniendo los parámetros de sostenibilidad. En este caso se concluye que el agente de soporte más valioso es el proveedor 5 ante interrupciones en el proveedor 1.

Tabla 19

Resultados de las funciones objetivo de modelos resilientes ante interrupciones en escenario

9 vs. Contexto normal.

	CASO A	Variación Vs. Cont. Normal	CASO B	Variación Vs. Cont. Normal
Costo total (COP)	\$ 629,129,123.78	0%	\$ 673,706,400.00	+0.13%
Emisiones totales (CO2 Kg)	10877.136	0%	8946.694	+0.009%

9.4. Observaciones generales

A partir de un análisis dinámico de *tradeoffs*, comparando una configuración que optimiza los costos versus una que configuración que optimiza los objetivos no económicos en un contexto normal, se pudo establecer que la transición a una cadena de suministros sostenible implica (1) un aumento en los costos de \$43'679.676,22 COP, u \$88 COP por unidad; (2) la participación de más actores en la cadena de suministro, como lo son los proveedores 1 y 5, que a su vez permiten suplir la cadena en casos de escasez o interrupciones; (3) la terminación de relación con actores que son inviables para la cadena de suministros sin importar los objetivos o el contexto, como lo son los proveedores 4 y 7; y (4) un aumento en la generación de empleos de la empresa en un 34%.

Ahora bien, ante escenarios disruptivos y comparando las tablas 20 y 21, se identificó que (1) los proveedores 5 y 6, son agentes críticos para la CS ya que ante la falta de cualquier otro proveedor, el modelo se apoya en ellos para cubrir faltantes; (2) los vehículos de mejor relación emisiones-beneficio siguen siendo los de menor capacidad; (3) el proveedor 3 es agente de alto impacto en los costos de la CS si se quiere minimizar costos, por lo que su redundancia en el modelo sostenible garantiza la resiliencia y factibilidad de la misma ante interrupciones; y (4) las interrupciones en el arco de abastecimiento causan efectos adversos en la CS de forma inmediata y medible, caso contrario a las interrupciones en el arco de distribución.

Tabla 20*Flujos de materia prima antes de disrupciones en el caso B.*

Antes de disrupciones (Caso B)													
Flujos de materia prima y productos (mes)													
	<i>Litros transportados</i>								<i>Unidades transportadas</i>				
	SUP1	SUP2	SUP3	SUP4	SUP5	SUP6	SUP7	SUP8	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Truck1	23766	126000			18000	240000							
Truck2								90000					
Truck3													
Tr1									90000	322000	42000	28000	14000
Tr2													
Tr3													

Tabla 21*Promedio de flujos de materia prima después de disrupciones en el caso B.*

Después de disrupciones (Caso B)													
Promedio de flujos de materia prima y productos (mes)													
	<i>Litros transportados</i>								<i>Unidades transportadas</i>				
	SUP1	SUP2	SUP3	SUP4	SUP5	SUP6	SUP7	SUP8	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5
Truck1	22860	122000			20971	240348							
Truck2								89230					
Truck3													
Tr1									90000	322000	42000	28000	14000
Tr2													
Tr3													

Sin embargo, aunque los impactos económicos de no tener una cadena de suministros resiliente y sostenible no se evidencien a priori, en el análisis a mediano y largo plazo, las

relaciones con los clientes y la insatisfacción de las expectativas de los consumidores finales son en sí mismas, peores consecuencias que la pérdida económica inmediata.

Finalmente, establecer una planeación de la cadena de suministros resiliente y sostenible es viable. Lo anterior, dado que el costo de satisfacer la demanda en el caso de interrupciones viales, optimizando los parámetros de sostenibilidad de la cadena de suministros, es de \$44'138.887,76 COP. Es decir que por cada kg de CO₂ que no se emite, existe un costo de \$22.564,81 COP. En costo por unidad sería \$89 COP, lo cual representa un incremento inferior al 8% en los costos por concepto de cadena de suministro, y sí un aumento del 34.7% en la oferta laboral y disminución de las emisiones de CO₂ de aproximadamente 18%.

9.5. Propuesta final

El éxito en encontrar un balance entre los resultados de un modelo optimizado y los retos de situaciones reales con escenarios de decisión conflictivos no solo depende de cifras y criterios universales que lleven a la mejor respuesta. Un fracaso en este proceso puede causar que las compañías decidan no optar por este tipo de configuraciones dado los bajos resultados económicos o el bajo nivel de servicio. (Ribeiro & Barbosa-Póvoa, 2022)

En el trabajo de investigación de Rajesh R. (2021), se estudió los *tradeoffs* que los gerentes de tres compañías tecnológicas estarían dispuestos a tomar dependiendo de la importancia que se le da a la sostenibilidad en comparación con la resiliencia. A partir de esto se concluyó que la preferencia a nivel gerencial es dar la misma importancia tanto a la sostenibilidad como a la resiliencia. Ahora bien, de acuerdo con los gerentes, los objetivos contradictorios de mayor complejidad e importancia a la hora de tomar una decisión son: (1) enfocar las estrategias en la agilización de procesos (*process streamlining*) o procesos de reconfiguración flexible; y (2) visión

de los recursos o proveedores como una ventaja competitiva y por ende no sustituible, o tener redundancias en la configuración (Rajesh, 2021).

Esta misma lógica se puede entonces extrapolar al presente caso de estudio dado que se dio igual relevancia a los objetivos económicos como no económicos. En este caso, las redundancias en el arco de abastecimiento aportan flexibilidad a la cadena, y a su vez, la elección de los mejores proveedores resulta en una estrategia proactiva para mitigar el costo en caso de interrupciones. Así mismo la inclusión de protocolos de respuesta ante interrupciones como lo son la toma de vías alternas, mantiene las operaciones de la cadena en marcha y asegura la satisfacción del cliente.

En este orden de ideas, el presente caso de estudio demuestra que sí se puede realizar la planeación de una cadena de suministros resiliente y sostenible a partir de una inversión, o concesión económica, aceptable. Que el aumento en el nivel de respuesta de la CS va de la mano con la disminución de la variabilidad ante escenarios disruptivos, fortaleciendo los eslabones de la cadena de valor. Y, que dicha CS resiliente y sostenible, asegura a su vez una mejor imagen empresarial y, consecuentemente, mayor éxito en el mercado. Esta configuración y sus implicaciones a nivel operativo, está resumida en la sección 9.4.

El aporte a través de herramientas cuantitativas como el modelo desarrollado y la aplicación de un análisis dinámico, permite integrar multitud de eventos y escenarios retadores para apoyar el proceso de planeación de una CSRS; sin embargo, en el presente estudio se sugirieron también iniciativas a nivel gerencial con el fin de realizar una propuesta holística dentro del enfoque del problema.

- Se sugirió la exploración de negocios en tercerización de servicios, esto dada la excedente capacidad instalada de la planta, como también las tractomulas con que

cuenta la empresa y no tiene un rol activo en la nueva planeación de la CS. Concretamente se propone prestar servicios de maquila y de transporte de carga, lo cual, a su vez, hace frente a los incrementos en los costos de la nueva CSRS.

- Promover la certificación de proveedores en materias de sostenibilidad, genera beneficios a largo plazo directamente relacionados con la cadena de valor de la organización, además de incrementar la eficiencia de la CS en general.
- A partir de la planeación de CS propuesta, e integrando las iniciativas anteriores, es posible proyectarse a obtener la certificación de sistema integrado de gestión que integra las normas ISO 9001, ISO 45001, e ISO 14001. Esto apoyaría la visibilidad de los esfuerzos de la empresa por aplicar prácticas sostenibles y, por ende, reforzaría su ventaja competitiva y posición en el mercado.

10. Conclusiones

La presente investigación es un esfuerzo por integrar un análisis de sostenibilidad y resiliencia con el nivel operacional-táctico del diseño de una cadena de suministro. Lo anterior se cumplió a partir de la propuesta de un modelo de programación lineal entera mixta (MILP), por medio del cual se abordó la brecha de investigación existente en las herramientas cuantitativas de apoyo al proceso de toma de decisiones. De igual forma, se aportó al uso de métodos de investigación de operaciones en el campo de las cadenas de suministro resilientes y sostenibles.

Inicialmente, se caracterizó y validó un modelo a partir de un caso de estudio del sector lácteo, cuyas métricas fueron establecidas apoyándose en una exhaustiva revisión de literatura y examinando la pertinencia de cada indicador en dicho contexto. Paralelamente, a partir de datos históricos y una distribución de Poisson, se generaron 44 escenarios con interrupciones en las vías de transporte. El modelo inicial fue evaluado ante estos escenarios, y mediante un análisis dinámico de los *tradeoffs* se obtuvo una mejor comprensión de la dinámica en los parámetros del sistema, para obtener como resultado la mejor planeación de la cadena de suministros asegurando su resiliencia y sostenibilidad.

Aun cuando se observaron comportamientos generales esperados dada la teoría que soporta el proyecto de investigación, también se obtuvieron conclusiones particulares del caso de estudio dada la naturaleza de la dinámica entre las diferentes combinaciones entre la CS, el caso de estudio y las interrupciones.

En general, se demostró que un pequeño aumento en el costo en comparación con la configuración en contexto normal y priorizando objetivos no económicos, incrementa el desempeño de los indicadores de la cadena de suministro en términos de sostenibilidad, mientras se refuerza la resiliencia de la cadena, de forma que, ante escenarios disruptivos, la variación es

mínima. Lo anterior, por medio del ajuste de variables como la cantidad a transportar, el tipo de vehículo a usar y la ruta a tomar.

Finalmente, se observó que los objetivos no-económicos permanecieron relativamente similares ante las interrupciones, y que existen redundancias en los agentes ya que algunos no tuvieron un rol activo en ninguno de los contextos, por lo que se realizó una optimización de estos al mismo tiempo. Y, se concluye que las estrategias con enfoque proactivo tienen un impacto positivo en el desempeño de las CS, al incrementar el nivel de respuesta, flexibilidad y calidad del servicio.

11. Recomendaciones

A partir del trabajo desarrollado se recomienda como oportunidades de mejora en futuros trabajos de investigación la integración de más parámetros como costos de producción y residuos de planta, y, la simulación de más tipos de escenarios disruptivos, como lo serían las interrupciones en la producción, al igual que la toma de decisiones a nivel estratégico en el diseño de CS.

Referencias bibliográficas

- AGRONEGOCIOS. (27 de Febrero de 2021). Durante 2020, se recibieron más de 73.600 toneladas de productos lácteos importados.
- Anaya Mena, V., & Gallego Bautista, A. (2021). *Resiliencia en la cadena de suministro en el sector manufactura*. Obtenido de https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/91814/1/TG03339.pdf
- Angarita-Monroy, A. G. (2021). *Biblioteca UIS*. Obtenido de Repositorio de trabajos de grado: <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/060abff8-6cee-4dd3-95f3-c6af47fa7de9/content>
- Birkie, S. E. (2016). Operational resilience and lean: in search of synergies and trade-offs. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Boyd, D. E., Spekman, R. E., Kamauff, J. W., & Werhane, P. (2007). Corporate social responsibility in global supply chains: a procedural justice perspective. *Long range planning*, 341-356.
- Bustamante-Gaviria, D. (2020). *ESTRATEGIAS DE LOGÍSTICA VERDE EN MICROEMPRESAS*. Medellín.
- Chadegani, A., Salehi, H., Yunus, M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M., & Ale , E. (2013). A comparison between two main academic literature collections: Web of Science and Scopus databases. *Asian social science*, 18-26.
- Clavijo-Buritica, N., Abushaega , M. M., González, A. D., Amorim, P., & Polo, A. (2021). Resilience-based Analysis of Road Closures in Colombia: An Unsupervised Learning Approach. *Engineering Analytics*, 21-41.
- Clavijo-Buritica, N., Escobar, W., & Triana-Sánchez , V. (2017). Designing a sustainable supply network by using mathematical programming: a case of fish industry. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, Vol. 27.
- Cogollo Flórez, J., & Ruiz Vásquez, C. (2019). Prácticas de responsabilidad sostenible de cadenas de suministro: Revisión y propuesta. *Revista Venezolana de Gerencia*.
- Comisión ODS República Dominicana. (2017). Obtenido de <http://ods.gob.do/Seccion/Index/19>
- compromiso RSE. (17 de 02 de 2020). *El 61% de los millennials, dispuestos a pagar más por productos sostenibles y ecológicos*. Obtenido de <https://www.compromisorse.com/rse/2020/02/17/el-61-de-los-millennials-dispuestos-a-pagar-mas-por-productos-sostenibles-y-ecologicos/>
- El País. (06 de Noviembre de 2022). *El País Web*. Obtenido de <https://elpais.com/america-colombia/2022-11-06/javier-pava-el-encargado-de-enfrentar-la-emergencia-climatica-los-damnificados-ano-tras-ano-siempre-son-los-mismos.html>

- Elleuch, H., Dafaoui, E., Elmhamedi, A., & Chabcho. (2016). Resilience and vulnerability in supply chain: literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 1448-1453.
- Fahimnia, B., & Jabbarzadeh, A. (2016). Marrying supply chain sustainability and resilience - A match made in heaven. *Logistics and Transportation Review*, 306-324.
- Fahimnia, B., Jabbarzadeh, A., & Sarkis, J. (2018). Greening versus resilience: A supply chain design perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 129-148.
- Fiksel, J. (2006). Sustainability and resilience: Toward a systems approach. *Sustainability: Science, Practice, & Policy*, 14-21.
- Govil, M., & Proth, J. (2002). *Supply Chain Design and Management: Strategic and Tactical Perspectives*.
- Guillermo Westreicher . (6 de Agosto de 2020). *Economipedia*. Obtenido de Estrategia: <https://economipedia.com/definiciones/estrategia.html>
- Halcones y Palomas. (16 de Junio de 2022). *Halcones y Palomas*. Obtenido de Låktoland (de Milk, Yogurt & Cheese Inc.), allegada a Justo&Bueno, quiere protección de acreedores por \$29.200 millones: <https://www.halconesy palomas.com/2022/06/16/laktoland-de-milk-yogurt-cheese-inc-allegada-a-justobueno-quiere-proteccion-de-acreedores-por-10-221-millones/>
- Hamui-Sutton, A. (2013). Un acercamiento a los métodos mixtos de investigación en educación médica An approach to mixed methods research in medical education. *Investigación en Educación Médica*, 211-216. Obtenido de [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2007505713727145#:~:text=Los%20m%C3%A9todos%20mixtos%20\(MM\)%20combinan,preguntas%20de%20investigaci%C3%B3n%20son%20complejas.](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2007505713727145#:~:text=Los%20m%C3%A9todos%20mixtos%20(MM)%20combinan,preguntas%20de%20investigaci%C3%B3n%20son%20complejas.)
- IBM. (s.f.). *IBM Decision Optimization*. Obtenido de <https://www.ibm.com/co-es/optimization-modeling#:~:text=Un%20modelo%20de%20optimizaci%C3%B3n%20es,y%20las%20restricciones%20de%20negocios.>
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B., & Rastegar, S. (2017). Green and resilient design of electricity supply chain networks: a multiobjective robust optimization approach. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 52-72.
- Kabadurmus, O., & Erdogan, M. (2020). Sustainable, multimodal and reliable supply chain design. *Annals of Operations Research*, 47-70.
- López-Castro, L. F., & Solano-Charris, E. (2021). Integrating Resilience and Sustainability Criteria in the Supply Chain Network Design. A Systematic Literature Review. *MDPI*, 13.
- Manning, L., & Soon, J. (2016). Building strategic resilience in the food supply chain. *British Food Journal*.

- Matos, S., Scheleper, M., Gold, S., & Hall, J. (2020). The hidden side of sustainable operations and supply chain management: Unanticipated outcomes, trade-offs and tensions. *International Journal of Operations & Production Management*.
- Ministerio de Agricultura. (2020). *Cadena Láctea Colombiana - Análisis Situacional*. Colombia: UPRA Colombia.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Sector Lácteo*.
- Nayeri, S., Torabi, S., Tavakoli, M., & Sazvar, Z. (2021). A multi-objective fuzzy robust stochastic model for designing a sustainable-resilient-responsive supply chain network. *Journal of Cleaner Production*.
- Organización Mundial del Comercio. (2022). *Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas*. Obtenido de https://www.wto.org/spanish/thewto_s/coher_s/mdg_s/mdgs_s.htm
- Oxford Languages. (s.f.). *Oxford Languages*. Obtenido de <https://languages.oup.com/google-dictionary-es/>
- Portafolio. (01 de Junio de 2021). <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/paro-en-colombia-vias-que-han-sido-desbloqueadas-hasta-el-1-de-junio-del-2021-552553>. Obtenido de Portafolio Web: <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/paro-en-colombia-vias-que-han-sido-desbloqueadas-hasta-el-1-de-junio-del-2021-552553>
- Portafolio. (27 de Julio de 2022). *El 19,1% de las vías de Colombia están sin pavimentar*. Obtenido de Portafolio Web: <https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/el-19-1-de-las-vias-de-colombia-estan-sin-pavimentar-568772>
- Rajesh, R. (2021). Optimal trade-offs in decision-making for sustainability and resilience in manufacturing supply chains. *Journal of Cleaner Production*.
- Reyes Levalle, R., & Nof, S. (2017). Resilience in supply networks: Definition, dimensions, and levels. *Annual Reviews in Control*, 1-13.
- Ribeiro, J., & Barbosa-Póvoa, A. (2018). Supply Chain Resilience: Definitions and quantitative modelling approaches - A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 109-220.
- Ribeiro, J., & Barbosa-Póvoa, A. (2022). A responsiveness metric for the design and planning of resilient supply chains. *Annals of Operations Research*, 1-53.
- SAP. (2020). *What is a sustainable supply chain?* Obtenido de Supply chain sustainability in a changing world: <https://www.sap.com/insights/what-is-a-sustainable-supply-chain.html>
- Scavarda, L. F., Santos, P., Pires, S., & Klingebiel, K. (2014). SUPPLY CHAIN RESILIENCE ANALYSIS: A BRAZILIAN AUTOMOTIVE CASE. *RAE - Revista de Administración de Empresas*, 304-313.

Sedex. (20 de Abril de 2022). *Sedex*. Obtenido de What is supply chain sustainability and why is it important?: <https://www.sedex.com/what-is-supply-chain-sustainability-and-why-is-it-important/>

Software DELSOL. (s.f.). *DELSOL*. Obtenido de Análisis de sensibilidad: <https://www.sdelsol.com/glosario/analisis-de-sensibilidad/>

Thesaurus.com. (2022). *Thesaurus.com*. Retrieved from <https://www.thesaurus.com/>

United Nations. (2010). *Sustentabilidad de la Cadena de Suministro - Una Guía Práctica para la mejora continua*.

Villanueva, A., Ramos, P., & Jiménez, M. (2012). SIMULACIÓN: HERRAMIENTA PARA GESTIONAR CADENAS DE . *Ingeniería y Sociedad*, 50-58.

Vlajic, J., Van der Vorst, J., & Hendrix, E. (2010). On robustness in food supply chain networks. *Towards Effective Food Supply Chains.*, 63-82.

Walters, W. (Enero de 2009). Google Scholar Search Performance: Comparative Recall and Precision. *Portal-Libraries And The Academy*, 5-24.

WWF. (18 de Septiembre de 2018). *Glosario ambiental: ¿Sabes qué se pactó en el Acuerdo de París?* Obtenido de <https://www.wwf.org.co/?uNewsID=334976#:~:text=Colombia%20en%20el%20Acuerdo%20de,de%20emisiones%20nacionales%20de%202010>

Yu, H., & Solvang, W. (2020). A fuzzy-stochastic multi-objective model for sustainable planning of a closed-loop supply chain considering mixed uncertainty and network flexibility. *Journal of Cleaner Production*, 266.