EFECTO DE LAS ASIMETRÍAS EN CAPACIDADES LOGÍSTICAS SOBRE LA SOSTENIBILIDAD DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS PERECEDEROS

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en ingeniería industrial

Presentada por:

ING. TATIANA MAYA TRUJILLO

Director: PhD JAVIER ARTURO ORJUELA CASTRO

Co-Director: PhD JUAN PABLO OREJUELA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ÉNFASIS EN SISTEMAS PRODUCTIVOS Y LOGÍSTICOS
BOGOTÁ, D.C. 2021

Dedicatoria

A mis padres que siempre han sido un ejemplo en mi vida
y me han apoyado en cada uno de los proyectos que he
decidió emprender.

A los demás miembros de mi familia: Katherin y Peter
por su apoyo constante y su amor infinito,
por siempre llenarme de fuerza y esperanza
para poder cumplir con mis sueños.

A Django por acompañarme cuando debía trasnochar y
por poner esa carita tierna para que jugará con el
en los momentos que más estresada estaba
y necesitaba un respiro.

A mi madrina por sembrar en mi ese espíritu aventurero,
por siempre apoyar mis sueños
y por siempre recordarme creer en mí misma.

A mis amigos por su compañía, apoyo
y cariño infinito

Agradecimientos

A los Doctores, Javier Arturo Orjuela y Juan Pablo Orejuela, directores de la tesis por sus orientaciones y aportes en mi proceso de formación y constante apoyo para la culminación de esta investigación.

A mi familia por entenderme en los momentos de frustración, por apoyarme en seguir con este proceso y por todo su amor que ha sido el motor en todo momento.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, institución que me apoyo en todos los aspectos.

A todos aquellos otros que contribuyeron de alguna manera.

Lista de Siglas y Abreviaturas

Gestión de la cadena de suministro (SCM)

Gestión de la cadena de suministro de alimentos (FSCM)

Gestión de la Cadena de Suministros Sostenible (SSCM)

Cadenas de suministro (SC)

Cadena de suministro de alimentos (FSC)

Cadenas de suministros sostenibles (SSC)

Centrales de acopio (CA)

Centrales mayoristas (SM)

Tabla de contenido

Resumen 9

1. INTRODUCCIÓN 10

1.1 Antecedentes 11

1.1.1 Gestión de la cadena de suministro 11

1.1.2 Sostenibilidad de la cadena de suministro 12

1.1.3 Cadenas de suministro alimentarias 12

1.1.4 Asimetría 13

1.1.5 Gestión de cadenas de suministro alimentarias sostenibles 13

1.2 Objetivos 14

Objetivo general 14

Objetivo especifico 14

1.3 Pregunta problema e hipótesis de la investigación 14

1.4 Metodología y organización de la tesis 14

1.5 Contribución de la investigación 16

2. MARCO DE REFERENCIA 18

2.1 Gestión de la cadena de suministro 18

2.2 Configuración de la cadena de suministro 18

2.3 Capacidades logísticas 21

2.3.1 Conceptualización de las capacidades logísticas 21

2.3.2 Clasificación de las capacidades logísticas 22

2.4 Sostenibilidad en la FSC 26

2.4.1 Medidas de desempeño de sostenibilidad 27

2.5 Gestión de la cadena de suministro sostenible (SSCM) 30

3. RELACIÓN ENTRE LA EXISTENCIA DE ASIMETRÍAS DE CAPACIDADES LOGÍSTICAS Y LA SOSTENIBILIDAD DE LA SC DE ALIMENTOS PERECEDEROS 32

- **Relación entre la configuración de la SC y las capacidades logísticas** 34
- **Relación entre capacidades logísticas y sostenibilidad** 36
- **Relación entre la configuración de la SC y sostenibilidad** 38

4. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS PERECEDEROS (CAPACIDADES LOGÍSTICAS Y SOSTENIBILIDAD) 40

5. IDENTIFICACIÓN DE ASIMETRIAS EN CAPACIDADES LOGITICAS EN LA CADENA DE SUMINISTRO FRUTICOLA, CUNDINAMARCA-BOGOTÁ 52
5.1 Cadena frutícola en Cundinamarca 52
5.2 Definición de parámetros específicos 53
5.3 Planteamiento inicial 63
5.4 Definición de asimetrías en capacidades logísticas 63
6 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA EXISTENCIA DE ASIMETRÍAS DE CAPACIDADES LOGÍSTICAS EN LA SOSTENIBILIDAD DE LA CADENA 67
6.1 Análisis de asimetría en capacidad de almacenamiento a nivel inter-eslabón 67
6.1.1 Análisis de dominancia para las soluciones 70
6.1.2 Soluciones en frontera de pareto 72
6.2 Análisis de asimetrías en la disponibilidad de sistemas de refrigeración a nivel inter-eslabón 73
6.2.1 Análisis de dominancia para las soluciones 77
6.2.2 Soluciones en frontera de pareto 78
6.3.1 Análisis de dominancia para las soluciones 84
6.3.2 Soluciones en frontera de pareto 86
7 CONCLUSIONES GENERALES 87
8 APORTES 88
9 RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS 88
10. BIBLIOGRAFÍA 89

Lista de Tablas

Tabla I. Modelos sobre el diseño de la CS 19
Tabla II. Conceptualización de capacidades logísticas 21
Tabla III. Clasificación de las capacidades logísticas 22
Tabla IV Capacidades logísticas cualitativas 23
Tabla V. Capacidades logísticas cuantitativas. 26
Tabla VI. Medidas de desempeño 27
Tabla VII. Definiciones de SSCM más relevantes para la investigación 30
Tabla VIII. Principales aspectos considerados en los modelos revisados 33
Tabla IX Resultados de la matriz 1 (configuración y capacidades logísticas) 35
Tabla X. Resultados de la matriz 2 (capacidades logísticas y sostenibilidad) 37
Tabla XI. Resultados de la matriz 3 (configuración y sostenibilidad) 38
Tabla XII. Huella hídrica de la naranja $m3ton$ 53
Tabla XIII. Huella hídrica de la mandarina $m3ton$ 53
Tabla XIV. Huella hídrica de la fresa $m3ton$ 53
Tabla XV. Huella hídrica del mango $m3ton$ 54
Tabla XVI. Huella hídrica de la mora $m3ton$ 54
Tabla XVII. Medidas promedio de las frutas analizadas 54
Tabla XVIII. Cantidad de fruta por empaque 55
Tabla XIX. Datos relevantes de los empaques utilizados en el modelo 56
Tabla XX. Tipos de vehículos 57
Tabla XXI Tipo de vehículo por arco 58
Tabla XXII. Empaques por estiba y máximo de apilamiento 60
Tabla XXIII. Cantidad de empaques por tipo de vehículo 60
Tabla XXIV. No. de empaques máximo por vehículo con relación a la limitante de área y de peso 61
Tabla XXV. Tipos de vehículos 62
Tabla XXVI. Resultados de la metodología 64
Tabla XXVII. Variaciones del modelo según asimetrías 66
Tabla XXVIII. Asimetría 1 - FO: Minimizar huella hídrica 67
Tabla XXIX. Asimetría 1 - FO: maximizar número de clientes atendidos 68
Tabla XXX. Asimetría 1 - FO: minimizar costos 69
Tabla XXXI. Asimetría 1 - Análisis de dominancia en las soluciones 71
Tabla XXXII. Asimetría 1 - Conjunto óptimo de Pareto 72
Tabla XXXIII. Asimetría 2 - FO: Minimizar huella hídrica 73
Tabla XXXIV. Asimetría 2 - FO: Maximizar número de clientes atendidos 75
Tabla XXXV. Asimetría 2 - FO: Minimizar costos asociados a la SC 76
Tabla XXXVI. Asimetría 2 - Análisis de dominancia en las soluciones 77
Tabla XXXVII. Asimetría 2 - Conjunto óptimo de Pareto 79
Tabla XXXVIII. Asimetría 3 - FO: Minimizar huella hídrica 80
Tabla XXXIX. Asimetría 3 - FO: Maximizar número de clientes atendidos 82
Tabla XL. Asimetría 3 - FO: Minimizar costos asociados a la SC 83
Tabla XLI. Asimetría 3 - Análisis de dominancia en las soluciones 84
Tabla XLII. Asimetría 3 - Conjunto óptimo de Pareto 86

Listado de Ilustraciones

Ilustración 1. Relación entre las principales temáticas abordadas 13
Ilustración 2. Metodología y organización de la tesis 15
Ilustración 3. Canastilla Carullera 55
Ilustración 4. Canastilla Fresera 55
Ilustración 5. Malla Naranjera 56
Ilustración 6. Caja de cartón 56
Ilustración 7. Tipo de vehículo en cada flujo 58
Ilustración 8.Dimensiones estiba estándar 59
Ilustración 9.Distribucion de canastillas (60*40cm) en una estiba 60
Ilustración 10. Consumo de agua en el lavado de vehículos 62
Ilustración 11. Composición inicial de la cadena 63
Ilustración 12. Metodología para definición de asimetrias 64
Ilustración 13. Asimetría 1 - FO: minimizar huella hídrica 68
Ilustración 14. Asimetría 1 - FO: maximizar número de clientes atendidos 69
Ilustración 15. Asimetría 1 - FO: minimizar costos 70
Ilustración 16. Asimetría 2 - FO: Minimizar huella hídrica 74
Ilustración 17. Asimetría 2 - FO: Maximizar número de clientes atendidos 75
Ilustración 18. Asimetría 2 - FO: Minimizar costos asociados a la SC 76
Ilustración 19. Asimetría 3 - FO: Minimizar huella hídrica 81
Ilustración 20. Asimetría 3 - FO: Maximizar número de clientes atendidos 82
Ilustración 21. Asimetría 3 - FO: Minimizar costos asociados a la SC 84

Resumen

Dadas las tendencias de los consumidores y constantes cambios en el mercado, el cliente presta mayor atención a los aspectos relacionados con el alimento que está comprando. Una mayor conciencia en el consumo ha generado que la sostenibilidad se convierta en parte fundamental de la gestión de las cadenas de suministro de alimentos. Por esto, resulta necesario estudiar los comportamientos que pueden influir en la sostenibilidad. Esta investigación se centra en determinar cómo inciden las asimetrías de las capacidades logísticas existentes, a nivel inter eslabón, en la sostenibilidad de la cadena de suministro de alimentos perecederos, vista desde las tres dimensiones (social, ambiental y económica). El presente documento aborda el marco de referencia en el que se da origen a la investigación y sobre el cual se hace el planteamiento del problema, su justificación, hipótesis y objetivos así como el desarrollo exhaustivo de cada uno de estos objetivos, en los que se busca principalmente definir la relación entre asimetrías de capacidades logísticas y la sostenibilidad de la cadena tanto a nivel conceptual como a nivel de representación mediante un modelo de optimización que abarca la configuración de la cadena mediante la optimización de medidas de desempeño relacionadas con las tres dimensiones de la sostenibilidad, de igual forma en el modelo se representan tres asimetrías de capacidades cuantitativas y cualitativas entre dos eslabones de la cadena y se analiza el efecto de estas en el desempeño de la cadena.

Palabras Claves:

Capacidades logísticas, asimetrías, sostenibilidad, cadena de suministro, alimentos perecederos

1. INTRODUCCIÓN

La gestión de la cadena de suministro (SCM) abarca tres niveles de decisión: estratégico, táctico y operativo. En particular, a nivel estratégico, el diseño de la cadena de suministro comprende las decisiones relativas al número y la ubicación de las instalaciones de producción y almacenamiento, la cantidad de capacidad en cada instalación, la conciliación de la demanda del mercado y las decisiones sobre la selección de proveedores desde una perspectiva de costo total (Chopra & Meindl, 2003). De acuerdo a la literatura este es un tema de investigación con un gran número de publicaciones, sin embargo en los últimos años entre las principales tendencias en SCM, los principios del desarrollo sostenible se han extendido considerablemente en la literatura científica, lo que ha llevado a que la investigación se centre principalmente en evaluar las políticas de SCM de acuerdo con un triple resultado que incluye aspectos económicos, desempeño ambiental y responsabilidad social (Eskandarpour et al., 2015). Sin embargo aunque la integración de las tres dimensiones juega un papel central, de acuerdo a (Seuring, 2013) dicha integración hasta ahora no se aborda con frecuencia, además el estrecho alcance de las medidas ambientales y sociales en los modelos actuales debería ir más allá de los limitados indicadores de gases de efecto invernadero a enfoques más amplios, incluidas nuevas métricas sociales (Eskandarpour et al., 2015).

La creciente demanda de alimentos, impulsada principalmente por el crecimiento de la población y la riqueza, no solo conduce a precios más altos y una mayor volatilidad del mercado sino que también impone una mayor carga a los escasos recursos naturales como el agua potable, la tierra y la energía (Parfitt et al., 2010)(Dobbs et al., 2011), es por esto que la gestión sostenible de las cadenas de suministro (SC) se ha convertido en una preocupación creciente frente a los recursos ambientales limitados y una población mundial en crecimiento porque las actividades de producción y logística consumen los recursos disponibles y aumentan los desechos y la contaminación (Rebs et al., 2019). Esta nueva amenaza al desarrollo sostenible exige urgentemente nuevos modos de cadena de suministro de alimentos (FSC) que desarrollen un equilibrio sostenible a través del triple resultado (Zhu et al., 2018); por esta razón en los últimos años, esfuerzos considerables en investigación se han realizado para ampliar los enfoques actuales y equilibrar las tres dimensiones (económica, social y ambiental) con el fin de garantizar la sostenibilidad a largo plazo (Nikolopoulou & Ierapetritou, 2012).

Por otro lado, para manejar la alta demanda de alimentos, la gestión de la cadena de suministro de alimentos (FSCM) se vuelve indispensable. Para ser eficaz, una red de cadena de suministro de alimentos (FSC) sólida debe tener un diseño rentable que ayude a tomar decisiones estratégicas y tácticas sobre las ubicaciones y la asignación de las instalaciones relevantes en la red, así como las cantidades óptimas de productos que se transportan en cada escalón de la red. Definir un nivel de capacidad adecuado ayuda a las organizaciones a cumplir con las demandas del consumidor con la cantidad adecuada de producto en el momento adecuado (Adland et al., 2018). De igual forma maximizar la utilización de la capacidad de las instalaciones es un factor importante que aumenta significativamente la eficiencia de la red logística al tiempo que disminuye los costos totales de las instalaciones (Jakubovskis, 2017). Lo anterior resalta lo ya mencionado por (Seuring, 2013) quien afirma que en investigaciones futuras se deben asumir algunos de los desafíos para llenar los vacíos en la intersección aún emergente de la sostenibilidad y la gestión de la cadena de suministro, ya que las dimensiones sostenibles específicas de las SC alimentarias son muy diferentes de las de una cadena de suministro general, y aún no se han abordado muchos temas nuevos relacionados con las características de dichas cadenas (Zhu et al., 2018).

1.1 Antecedentes

El concepto de Gestión de la Cadena de Suministros Sostenible (SSCM) está derivado del concepto de Gestión de la cadena de suministro (SCM); (Seuring & Müller, 2008) definen la SSCM como la gestión de materiales, información y flujos de capital, así como la cooperación entre las compañías a lo largo de la cadena, teniendo en cuenta las metas de las tres dimensiones del desarrollo sostenible, ecológicas, económicas y sociales, derivadas de los requerimientos de los consumidores y los grupos de interés, de este mismo modo (Carter & Rogers, 2008) consideran que la SSCM se enfoca en metas a largo plazo económicas, ecológicas y sociales para mejorar el desempeño y competitividad de las organizaciones que participan en la cadena. Es claro que la fuerte relevancia que ha tomado la SSCM de acuerdo con lo planteado por (Seuring, 2013) se debe en gran medida a que la globalización impone exigencias a la SCM para que vayan más allá de las cuestiones puramente económicas a cuestiones como, por ejemplo, condiciones laborales justas y producción respetuosa con el medio ambiente, despertando el interés en la intersección entre la SCM y el desarrollo sostenible. Dicho interés ha crecido significativamente y se ha convertido en un tema de mayor preocupación debido a las limitaciones de recursos ambientales, una explosión demográfica global, la corrupción de las actividades logísticas de producción y consumo, y el aumento de los desechos y la contaminación (Rebs et al., 2019). De este modo aunque las últimas dos décadas, en particular, han sido testigos de un creciente interés hacia esta subdisciplina de la SCM, la SSCM sigue siendo un tema de creciente importancia entre académicos y profesionales, esto se refleja en el crecimiento de la literatura académica sobre este tema (Roy et al., 2018). En esta sección se definen brevemente las principales temáticas de esta investigación y como su relación da origen a la pregunta problema.

1.1.1 Gestión de la cadena de suministro

La SCM exitosa requiere muchas decisiones relacionadas con el flujo de información, productos y fondos. Cada decisión debe tomarse para incrementar el superávit de la cadena. Estas decisiones caen dentro de tres categorías o fases, según la frecuencia de cada decisión y el marco de tiempo durante el cual se dé el efecto de una fase de decisión, estas categorías son: Estrategia, planeación y operación de la cadena de suministro (Chopra & Meindl, 2003); dentro del nivel estratégico se busca diseñar la cadena de suministro (SC) para los siguientes años, aquí se tienen fundamentalmente dos enfoques: uno de gestión y otro de configuración física, el primero hace referencia a la estructura de la cadena, la cual es la suma de las estrategias empleadas por cada actor respecto a sus relaciones con proveedores y clientes, mientras el segundo hace referencia a la configuración de la cadena, la cual está determinada por el flujo físico de productos y la ubicación de las locaciones (Orjuela Castro, 2018).

1.1.1.1 Configuración de la SC

La configuración de la SC implica determinar el número óptimo y la **ubicación de las instalaciones**, **asignar capacidad** y **requisitos tecnológicos a las instalaciones** y decidir el flujo de productos a través de la cadena de suministro para satisfacer las demandas de los clientes (Martins, Melo, and Pato 2019). Otros autores como (Chopra & Meindl, 2003) consideran que este enfoque incluye la toma de decisiones como: subcontratar una función de la SC o realizarla en casa, la ubicación y capacidades de producción e instalaciones de almacenamiento, los productos que se van a fabricar o almacenar en varios lugares, los modos de transporte que se pondrán a disposición a lo largo de diferentes tramos de embarque, y el tipo de sistema de información que se utilizará.

Capacidades logísticas

Dentro del diseño de la SC se definen las capacidades logísticas de la cadena, están son el resultado de la cantidad, calidad y ubicación geográfica de instalaciones para la producción, acopio, transformación, almacenamiento y distribución de los alimentos *(capacities),* estas son abordadas desde el enfoque de la **configuración física de la cadena**; así como de la estructura derivada de la capacidad de gestión *(capabilities)* de los agentes y su cultura de relacionamiento, abordadas desde la estructura de la cadena (Orjuela Castro, 2018). La primera parte hace referencia a capacidades físicas, en este contexto (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011) plantea por primera vez el concepto de **capacidades logísticas cuantitativas y capacidades logísticas cualitativas**, concepto que a la fecha ha sido como explorado pero que resulta relevante para el desarrollo de este trabajo.

1.1.2 Sostenibilidad de la cadena de suministro

La sostenibilidad es definida como la **importancia de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades**; definición dada en el Informe Brundtland de las Naciones Unidas, citado por (Varsei & Polyakovskiy, 2017). El **enfoque de Triple resultado final**, fue propuesto por John Elkington, plantea que los desafíos de sostenibilidad pueden resolverse mejor si hay un equilibrio entre las dimensiones económica, ambiental y social del crecimiento, el desarrollo y el desempeño (Elkington, 1998); enfoque ampliamente estudiando en los últimos años.

Los sistemas económicos globalizados implican cadenas de suministro complejas (SC) en las que los impactos ambientales y sociales deben gestionarse en consonancia con las diversas expectativas de las partes interesadas y para mitigar los riesgos relacionados con la sostenibilidad (Rebs et al., 2019). Con base en esto la gestión sostenible de la cadena de suministro (SSCM) ha crecido significativamente y se ha convertido en un tema de mayor preocupación debido a las limitaciones de recursos ambientales, una explosión demográfica mundial, corrupción en la producción logística y en las actividades de consumo y el aumento de los desechos y la contaminación (Rebs et al., 2019). (Seuring & Müller, 2008) definieron SSCM como la gestión del flujo de materiales, información y capital, así como la cooperación y colaboración entre empresas dentro de la cadena de suministro, adoptando todos los objetivos de desarrollo sostenible que implican los aspectos económicos, ambientales y sociales (el triple resultado final; TBL) expectativas de las partes interesadas y los clientes.

1.1.3 Cadenas de suministro alimentarias

Los alimentos perecederos tienen características específicas debido a su ciclo de vida (Kilcast & Subramaniam, 2000), características que aumentan la complejidad del sistema; debido a esto la gestión de la cadena de suministro de alimentos (FSCM) es generalmente muy diferente al de las cadenas de suministro industriales debido a las propiedades únicas de los productos alimenticios, como la perecibilidad, las estrictas regulaciones gubernamentales sobre seguridad alimentaria, la gran variación de los gustos y procesos de los consumidores y las consiguientes limitaciones operativas sobre su almacenamiento, procesamiento y distribución (Zhu et al., 2018), esto se debe a que todos los productos alimenticios están compuestos de materias primas biológicas que intrínsecamente tienen la capacidad de deteriorarse y dañarse con el tiempo; este proceso de deterioro no se puede detener por completo; sin embargo, todos los actores de la FSC buscan desacelerarlo y controlarlo durante la producción, el envasado, el almacenamiento y la manipulación (La Scalia et al., 2019).

1.1.4 Asimetría

Entendida como el uso de **capacidades logísticas** cuantitativas y cualitativas heterogéneas por los diferentes eslabones a lo largo de la cadena de suministro, en los procesos de **almacenamiento y transporte**.

1.1.5 Gestión de cadenas de suministro alimentarias sostenibles

(Feitó Cespón et al., 2016) menciona que el diseño de las Cadenas de suministros sostenibles (SSC) es un elemento esencial en la SSCM, ya que se debe tener un diseño de la cadena que permita un desempeño sostenible de la misma; ello **involucra aspectos tanto estratégicos como tácticos y relaciona varias áreas importantes de la logística (localización, capacidad, flujos y transporte)** que, en la práctica más común, se gestionan de manera independiente realizando esfuerzos en óptimos locales y no en la optimización del sistema. Esta decisión, costosa en tiempo y dinero, comprende la determinación del número, capacidad y localización de las instalaciones necesarias y el diseño de los flujos de materiales para satisfacer a los clientes de manera eficiente. Para el caso específico de las cadenas de suministro alimentarias (FSC) la creciente demanda de alimentos, impulsada principalmente por el crecimiento de la población y la riqueza, no solo conduce a precios más altos y una mayor volatilidad del mercado, sino que también impone una mayor carga a los escasos recursos naturales como el agua potable, la tierra y la energía (Dobbs et al., 2011). Lo anterior representa una gran amenaza para el desarrollo sostenible y exige urgentemente nuevos modos de cadena de suministro de alimentos (FSC) que desarrollen un equilibrio sostenible a través del triple resultado al considerar simultáneamente los problemas económicos, ambientales y sociales (Elkington, 1998). Es decir que en investigaciones futuras se deben asumir algunos de los desafíos para llenar los vacíos en la intersección aún emergente de la sostenibilidad y la gestión de la cadena de suministro (Seuring, 2013), específicamente en las FSC ya que las dimensiones sostenibles específicas de las SC alimentarias son muy diferentes de las de una cadena de suministro general, y aún no se han abordado muchos temas nuevos relacionados con las características de dichas cadenas (Zhu et al., 2018).

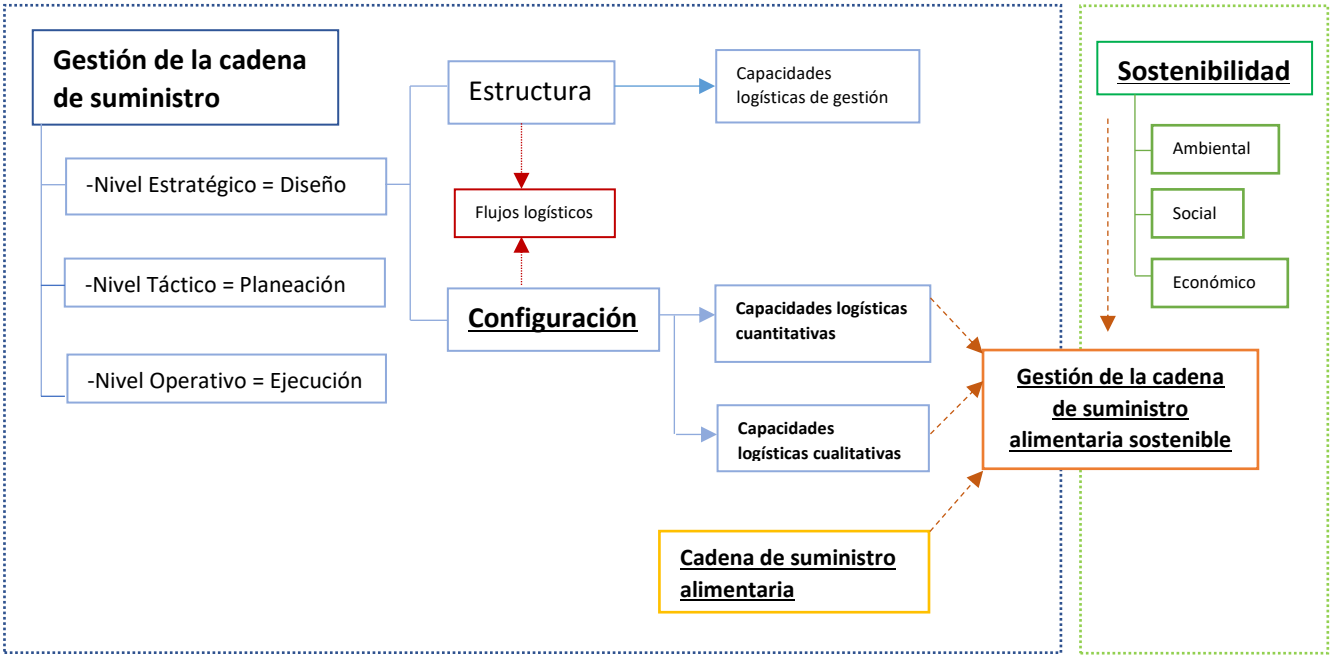


Ilustración 1. Relación entre las principales temáticas abordadas

1.2 Objetivos

Objetivo general

Evaluar los efectos de la existencia de asimetrías en capacidades logísticas a nivel inter-eslabón en la sostenibilidad de la cadena de suministro de alimentos perecederos mediante un modelo de optimización.

Objetivo especifico

- Establecer qué relación hay entre la existencia de asimetrías de capacidades logísticas a nivel inter-eslabón, con la sostenibilidad de la cadena de suministro de alimentos perecederos.
- Diseñar un modelo de optimización para la cadena de suministro de alimentos perecederos que relacione la sostenibilidad de la cadena con la existencia de asimetrías de capacidades logísticas a nivel inter-eslabón.
- Identificar las asimetrías de capacidades logísticas actuales a nivel inter-eslabón en la cadena de suministro frutícola, caso de estudio Cundinamarca.
- Validar como la existencia de asimetrías de capacidades logísticas a nivel inter-eslabón afecta la sostenibilidad de la cadena de suministro de frutas, mediante el modelo planteado.

1.3 Pregunta problema e hipótesis de la investigación

La pregunta de investigación formulada fue: ¿Qué efectos tiene la existencia de asimetrías de capacidades logísticas a nivel inter-eslabón en la sostenibilidad de la cadena de suministro de alimentos perecederos?

La hipótesis que se planteó es la siguiente: La existencia de asimetrías de capacidades logísticas a nivel inter-eslabón incide negativamente en la sostenibilidad de la cadena de suministro de alimentos perecederos.

1.4 Metodología y organización de la tesis

La metodología se desarrolló a partir de los cuatro objetivos específicos planteados, teniendo como base la implementación por fases, las cuales se resumen en: fundamentación teórica, caracterización de las cadenas de suministro de alimentos perecederos, establecimiento de relaciones entre capacidades logísticas y sostenibilidad de la cadena, propuesta de un modelo de optimización multiproducto y multieslabón para medir los efectos de las capacidades logísticas en la sostenibilidad de la cadena, modelado y análisis del estado actual de las cadenas de suministro alimentarias y análisis por escenarios para validar los efectos de las capacidades logísticas en la sostenibilidad de la cadena; cada una de las fases estuvieron ligadas entre sí para alcanzar el objetivo general. Con relación a la fundamentación teórica, ella hizo parte implícita de cada una de las fases de la investigación desarrollada.

La Ilustración 2. muestra un diagrama a manera de resumen de la metodología, donde se observa la contribución de cada capítulo para la consecución de los objetivos general y específicos. Las uniones realizadas con fechas punteadas corresponden a una correlación recíproca entre actividades. Igualmente se presenta las herramientas de software empleadas en cada capítulo que sirvieron como punto de apoyo para su respectivo desarrollo.

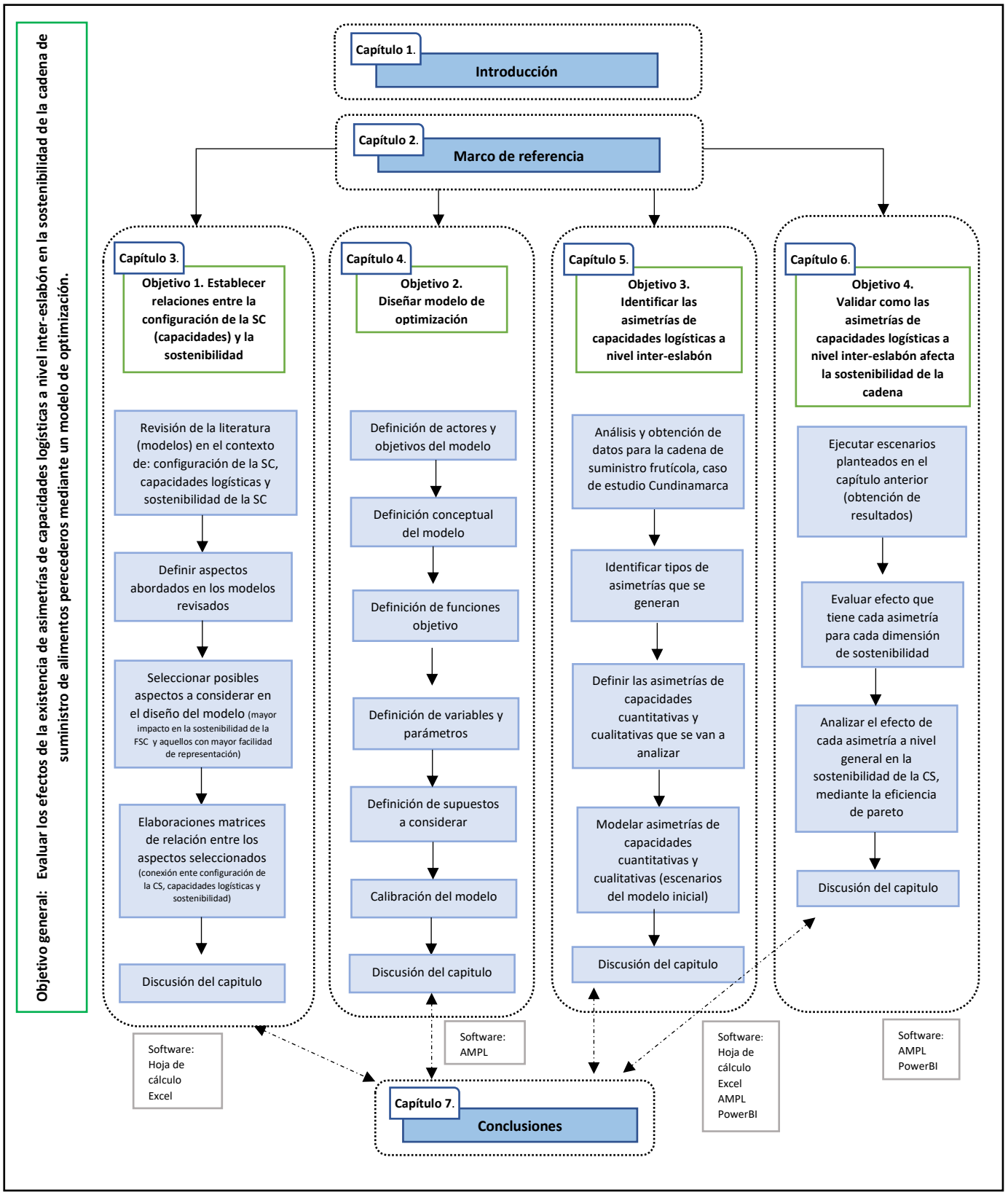


Ilustración 2. Metodología y organización de la tesis

El presente documento se estructura en cinco capítulos principales incluyendo la introducción, donde se presenta una aproximación de los antecedentes de las principales temáticas que son abordadas en el trabajo y la forma en la que están se relacionan, los objetivos, la pregunta e hipótesis de la investigación, la descripción de la metodología desarrollada que se abordó para el desarrollo de la tesis y la organización del documento.

El capítulo 2 presenta el marco de referencia donde se expone una aproximación conceptual de los temas involucrados en el desarrollo de la investigación de la siguiente manera: Gestión de la cadena de suministro, configuración de la cadena de suministro, capacidades logísticas y sostenibilidad en la FSC.

En el capítulo 3 se muestra la revisión de 14 artículos que planteaban modelos que involucraban las tres temáticas abordadas en la presente investigación (configuración de la CS, las capacidades logísticas y la sostenibilidad de la CS). En esta revisión se enfatizó en las variables y parámetros considerados en cada modelo, con el ánimo de identificar de manera preliminar posibles relaciones. Posterior a esto se seleccionaron los aspectos con mayor impacto en la sostenibilidad de la FSC y con mayor facilidad de representación para mediante matrices de relación encontrar definitivamente la conexión entre las tres temáticas abordas y así seleccionar los aspectos a incluir en el modelo que se iba a diseñar.

En el capítulo 4 se encuentra la propuesta de un modelo de optimización multiproducto y multieslabón para la cadena de suministro de alimentos perecederos que relacione la sostenibilidad de la cadena con las capacidades logísticas (cuantitativas y cualitativas) a nivel inter-eslabón, en este modelo se incluyen los aspectos seleccionados anteriormente; se busca que dicho modelo permita determinar los efectos que dichas asimetrías tienen en las medidas de desempeño de sostenibilidad: costos, seguridad alimentaria y huella hídrica.

El capítulo 5 expone la caracterización de la CS frutícola, caso de estudio Bogotá – Cundinamarca, para esto se tomaron tres frutas climatéricas (mango, mandarina y naranja) y dos frutas no climatéricas (fresa y mora). En este capítulo se definen los datos específicos del caso de estudio y además se hace un análisis de las asimetrías en capacidades cuantitativas y cualitativas que se generan, para de esta forma planteas “escenarios” que representen dichas asimetrías, posterior a esto se modelan dichas asimetrías realizando variaciones al modelo inicial.

En el capítulo 6 se hace el análisis de resultados de cada uno de los escenarios planteados, inicialmente se detalla en el efecto que tienen cada una de las asimetrías que se representaron en cada uno de las dimensiones de la sostenibilidad de manera independiente y posterior a esto se analiza de manera macro el efecto de cada asimetría en la sostenibilidad de la cadena, lo anterior se realiza mediante eficiencias de pareto.

1.5 Contribución de la investigación

En el esquema que se muestra a continuación se muestra las principales contribuciones de la presente investigación de acuerdo con la revisión de la literatura realizada:

MODELOS CONTEMPLADOS

Modelo para el **diseño de la configuración de la PFSC**, específicamente para la **localización de instalaciones**.

- Reducir pérdidas, minimizar el costo y el tiempo promedio de servicio y maximizar el numero clientes.
- **Efectos de la temperatura y la humedad relativa**

(Orjuela Castro et al., 2017)

Modelo de **gestión de capacidades de transporte y almacenamiento** para la cadena de suministro de alimentos

- **Ampliación de capacidad propia** frente a la contratación de 3PL
- Capacidad cualitativa: **con y sin cadena de frio**

(Martins et al., 2019)

Modelo para el **rediseño de una red de cadena de suministro** de bancos de alimentos de varios niveles

- Apertura de nuevas instalaciones y la selección de sus **capacidades.**
- **Enfoque de sostenibilidad**

MODELO PLANTEADO

Modelo **configuración de la PFSC**, específicamente para la localización de instalaciones y la **definición de las capacidades logísticas cuantitativas y cualitativas** de estas, bajo un enfoque de **sostenibilidad**.

- La **sostenibilidad** es abordada desde las **tres dimensiones**: ambiental (huella hídrica), social (clientes atendidos) y económico (costos).
  - La **huella hídrica** es de los indicadores menos utilizados en el modelado de la sostenibilidad.
- El modelo permite analizar los efectos de **asimetrías de capacidades logísticas** en la **sostenibilidad** de la cadena,
  - La **relación entre asimetrías en capacidades logísticas y sostenibilidad** no había sido abordada
- El modelo enfocado en **la gestión de la cadena** de suministro **alimentaria sostenible**

INVESTIGACIONES CONTEMPLADAS

(Eskandarpour et al., 2015)

- La **integración de las tres dimensiones de la sostenibilidad** hasta ahora no se aborda con frecuencia en el modelado de la SC
- Las medidas ambientales y sociales **deberían ir más allá de los limitados indicadores** de gases de efecto invernadero a enfoques más amplios.

(Zhu et al., 2018)

- Se requieren urgentemente **nuevos modos de FSC** que desarrollen un equilibrio sostenible a través del triple resultado
- Aún no se han abordado las **características específicas** de las cadenas alimentarias a nivel de sostenibilidad.

(Seuring, 2013)

- Hay **vacíos en la intersección aún emergente de la sostenibilidad y la gestión de la SC**

HIPÓTESIS CORROBORADAS

(Orjuela Castro et al., 2018)

- La **diversidad de medios** utilizados a lo largo de la cadena genera **fuertes asimetrías en las capacidades de transporte y almacenamiento** entre los eslabones lo que conlleva a altos **costos logísticos y pérdidas** considerables.

(Z. Liu & Nagurney, 2012)

- Las CSA perecederos están **sesgadas** dada **la naturaleza heterogénea en las capacidades** de almacenamiento y en la logística de transporte

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1Gestión de la cadena de suministro

El objetivo de una cadena de suministro es generar valor en forma de productos y servicios que se entregan a un cliente. Las cadenas de suministro no son cadenas lineales, sino redes de relaciones complejas (Winter & Knemeyer, 2013). Según esta visión orientada a la red, una cadena de suministro es: una red de organizaciones que están vinculadas a través de relaciones ascendentes y descendentes en los diferentes procesos y actividades que producen valor en forma de productos y servicios en manos del cliente final (Martin, 1992).

Con base a esto se da origen a la gestión de la cadena de suministro (SCM) la cual abarca todos los movimientos y almacenamiento de materias primas, inventario de productos en proceso y productos terminados desde el punto de origen hasta el punto de consumo (Frankel, R. et al., 2004), abarca tres niveles de decisión: estratégico, táctico y operativo. En particular, a nivel estratégico, el diseño de la cadena de suministro comprende las decisiones sobre el número y la ubicación de las instalaciones de producción y almacenamiento, la cantidad de capacidad en cada instalación, la conciliación de la demanda del mercado y las decisiones sobre la selección de proveedores desde una perspectiva de costo total (Chopra & Meindl, 2003).

Desde el punto de vista de la investigación de operaciones, el diseño o configuración de la red de la cadena de suministro (SCND) es la disciplina que se utiliza para determinar la ubicación, el tamaño y las especificaciones óptimas de las instalaciones y el flujo a través de las mismas (C. Autry et al., 2013).

2.2 Configuración de la cadena de suministro

Orjuela Castro .J. hizo una ampliación de la teoría del diseño organizacional estrategia-estructura-procesos de Miles, et al. (Miles et al., 1978) al aplicarla en logística y luego en las SC , con base en esto afirma que en el diseño de la FSC se tienen fundamentalmente dos enfoques uno de gestión y otro de configuración física. La configuración se refiere a aspectos físicos relacionados con la ubicación de las instalaciones (localización de los actores y de las instalaciones de producción, transformación, comerciales y de distribución), mientras la estructura se deriva de la forma en que los actores se relacionan, eso es cómo gestionan la SC , con que estrategia (Orjuela Castro, 2018). En este mismo contexto *Martins. C* afirma que el diseño de la SC incluye el proceso de planificación estratégica para optimizar la configuración de una red de cadena de suministro; este implica determinar el número óptimo y la ubicación de las instalaciones, asignar capacidad y requisitos tecnológicos a las instalaciones y decidir el flujo de productos a través de la cadena de suministro para satisfacer las demandas de los clientes (Martins et al., 2019). En este mismo sentido (Joshi, 2022) plantea que el diseño de la SC se da en dos niveles de decisión se centran en determinar la configuración de la red mediante la optimización del número de instalaciones y la selección de las mejores ubicaciones de la red, estas decisiones son muy costosas de cambiar ya que se toman a nivel estratégico y en segundo nivel se tienen decisiones que definen las operaciones de la cadena de suministro a través de la asignación de demandas de instalaciones y flujos de materiales para formular estrategias de transporte para la SC (Joshi, 2022).

Se evidencia que en la literatura no se encuentra una diferenciación clara entre el diseño de la FSC y la configuración de esta, por lo que en muchos modelos se habla del diseño de la cadena sin considerar decisiones relacionadas con la estructura. Se seleccionaron 16 modelos relacionados con el Diseño o Rediseño de la SC que abordaran las decisiones de configuración contempladas anteriormente en

relación con los procesos de distribución y almacenamiento, no se consideraron los modelos relacionados con producción o gestión de inventarios.

En la *Tabla I.* se presentan los principales resultados de la revisión, los modelos fueron clasificados según su enfoque: Rediseño para aquellos modelos reconfiguran en su totalidad una SC existente para mejorar ciertas medidas de desempeño o Diseño para aquellos modelos que presentan metodologías o modelos generales para el diseño de nuevas SC ; en la mayoría de los modelos se abordan ambos enfoques y se contemplan decisiones relacionadas con la distribución y el almacenamiento, otros modelos abordan solamente el proceso de distribución (Laura Xu et al., 2009), (Mohammed & Wang, 2017) y (Haial et al., 2020) y finalmente solo un modelo (Razmi et al., 2013) aborda únicamente el proceso de almacenamiento.

Los resultados encontrados muestran que 7 de los artículos revisados se desarrollaron mediante Programación multiobjetivo, dentro de los cuales 2 son de Programacion de enteros mixtos multiobjetivo; otros 3 modelos fueron desarrollados con Programación lineal entera mixta y 2 modelos con Programacion lineal y solamente 1 modelo de simulación. Mediante los modelos de simulación se pueden representar las SC actuales o proyectadas y luego proponer mejoras mediante el rediseño de estas a través de la representación y validación de escenarios (Van der Vorst et al., 2000) mientras si el interés es lograr medidas de desempeño óptimas se formulan modelos de optimización, los cuales muchas veces presentan mayor complejidad en la búsqueda de soluciones (Goetschalckx et al., 2002).

Se evidencia que varios modelos abordan la sostenibilidad desde sus tres dimensiones (Van Der Vorst et al., 2009), (Mohammed & Wang, 2017), (Varsei & Polyakovskiy, 2017), (Martins et al., 2019) y (Mohebalizadehgashti et al., 2020), mientras otros modelos abordan solamente la sostenibilidad ambiental (Navazi et al., 2019) y (Krishnan et al., 2020). Se resalta el modelo planteado por *Soto-Silva, W.E. et, al.* ya que aborda decisiones sobre el almacenamiento en frio, considerando el uso de almacenamiento propio, de cooperativas o subcontratado y la selección del tipo de cámara de frio a utilizar (Soto-Silva et al., 2017); de igual forma se destaca el modelo de *Martins et al., 2019* el cual se fundamenta en la reconfiguración de una FSC para mejorar las medidas de desempeño de sostenibilidad a través de la modificación de capacidades cuantitativas en los nodos (Martins et al., 2019), ambos artículos abordan aspectos relevantes en el modelo planteado. Bajo este mismo esquema se resalta el modelo planteado por *Orjuela Castro. J* el cual considera la perdida de alimentos, el número de proveedores seleccionados y la modificación de capacidades de almacenamiento cuantitativas (Orjuela Castro, 2018), este modelo se tomó como base para el desarrollo del modelo propuesto.

Tabla I. Modelos sobre el diseño de la CS

MILP: Programación lineal entera mixta, MIMP: Programación entera mixta multiobjetivo, MP: Programación multiobjetivo, LP: Programación lineal, SD: Simulación de eventos discretos, LCA: Análisis del Ciclo de vida del producto				
Autor	**Objetivo**	**Metodología**	**Enfoque**	**KPIS**
(Melo et al., 2006)	Marco de modelado matemático para la ubicación dinámica de las instalaciones (Melo et al., 2006) .	Modelo matemático	(Re) Diseño de la CS	Costos
(Laura Xu et al., 2009)	Revisión de diferentes modelos para el diseño de redes de distribución de diferentes tipos. Se presenta un marco y un enfoque para rediseñar la red de distribución en una CS (Laura Xu et al., 2009).	LP	Rediseño de la red de distribución	Costos operativos Nivel de servicio
(Van Der Vorst et al., 2009)	Enfoque integrado hacia el análisis de , sostenibilidad y calidad de los alimlogísticaentos, se incorporan modelos de cambio de calidad de alimentos e indicadores de sostenibilidad en modelos de simulación de eventos discretos (Van Der Vorst et al., 2009).	SD	(Re) Diseño de la CS	Costos Energía y emisiones Calidad del producto
(Kim et al., 2011)	Modelo para la selección de tecnologías de conversión de combustible, capacidades,	MILP	Diseño de la CS	Costos

	ubicaciones de instalaciones y la logística del transporte (Kim et al., 2011).			
(Razmi et al., 2013)	Modelo para rediseñar una red de almacenes confiable, considera la capacidad máxima para cada ubicación de almacén, la fiabilidad y la incertidumbre (Razmi et al., 2013).	MP	Rediseño de la red de almacenes	Costos Porcentaje de cobertura de la demanda dentro del plazo de entrega preferido
(Nourbakhsh et al., 2016)	Modelo matemático para reducir la pérdida poscosecha (PHL) en las redes de la cadena de suministro de granos. Determina la logística óptima para el transporte de granos y la inversión en infraestructura, considera la expansión de la capacidad de carreteras / ferrocarriles (Nourbakhsh et al., 2016).	LP	Diseño de la CS	Costo total del sistema (considera inversión en infraestructura y costo e las perdidas)
(Mohammed & Wang, 2017)	Planificador de distribución difuso de productos para un diseño de cadena de suministro de carne verde (MSC) de tres niveles en términos de cuestiones que incluyen números y ubicaciones de instalaciones que deben abrirse en asociación con los flujos de cantidad de productos (Mohammed & Wang, 2017)	MP difuso	Diseño red de distribución	Tasa de entrega promedio Emisiones C02 Costos (transporte e implementación) Tiempo de distribución
(Varsei & Polyakovskiy, 2017)	Modelo para el diseño de una cadena de suministro de vino, se busca mostrar cómo integrar las tres dimensiones de la sostenibilidad (Varsei & Polyakovskiy, 2017).	MIMP	Diseño de la CS	Costo fijos y variables Emisiones CO2 Empleo e impacto en las regiones
(Orjuela-Castro et al., 2017)	Modelo para la localización de centros de recolección y compañías que procesan alimentos perecederos en regiones montañosas, basado en un sistema de transporte multiproducto y escalonado; considera la planificación, el diseño y la capacidad adecuadas para las instalaciones (Orjuela-Castro, Sanabria-Coronado, et al., 2017).	MILP	Diseño de la CS	Costos (instalación, transporte y perdidas)
(Soto-Silva, W.E. et, al. 2017)	Modelos de optimización que se ocupan de tres tipos de decisiones relacionadas en horticultura: la compra, el transporte y el almacenamiento de productos frescos (Soto-Silva et al., 2017).	MP	Rediseño de la CS	Costo total
(Orjuela Castro, 2018)	Modelo matemático para la FSC, incluye diferentes pisos térmicos y su impacto en la perecibilidad de diferentes tipos de fruta. Considera los excesos de inventario en los diferentes nodos. El modelo establece la localización de las centrales de acopio en Cundinamarca y de distribución (mayoristas) en Bogotá (Orjuela Castro, 2018).	MP	Rediseño de la CS	Costo total Perdida de alimentos Número de proveedores seleccionados
(Navazi et al., 2019)	Modelo de tres etapas para la ubicación de centros de distribución, asociado a un problema de transporte con limitación de capacidad de camiones, mediante un enfoque de sostenibilidad (Navazi et al., 2019).	MP	Diseño de la CS	Costos de implementación Efectos ambientales (energía y CO2)
(Martins et al., 2019)	Modelo para rediseñar una red de cadena de suministro de bancos de alimentos de múltiples niveles para la recolección de donaciones de alimentos y su distribución a agencias de caridad (Martins et al., 2019).	MILP	Rediseño de la CS	Costo total Valor total del desperdicio de alimentos y del CO 2 emitido Acceso a los alimentos donados de manera equitativa
(Krishnan et al., 2020)	Propone un marco para rediseñar la CS, para esto se identifican las ineficiencias operativas y de recursos, a través de la evaluación del impacto ambiental (Krishnan et al., 2020).	LCA	Rediseño de la CS	Sostenibilidad ambiental
(Haial et al., 2020)	Se presenta un marco para diseñar una red de transporte en una cadena de suministro farmacéutica (Haial et al., 2020).	MP	Rediseño red de distribución	Costos Satisfacción de los clientes
(Mohebalizadehgashti et al., 2020)	Modelo matemático para diseñar y configurar una red de cadena de suministro de carne verde de múltiples períodos, múltiples productos y eslabones (Mohebalizadehgashti et al., 2020).	MIMP	Diseño de la CS	Costo total Emisiones C02 Utilización de la cap. total de las instalaciones Tasa de tardanza ponderada Tasa de accidentes conducción

2.3 Capacidades logísticas

Las FSC perecederos están sesgadas dada la naturaleza heterogénea en las capacidades de almacenamiento y en la logística de transporte (Z. Liu & Nagurney, 2012), por lo tanto la diversidad de medios logísticos utilizados a lo largo de la FSC genera fuertes asimetrías en las capacidades de transporte y almacenamiento entre los eslabones, lo que conlleva a altos costos logísticos y pérdidas considerables de alimentos (Orjuela Castro, 2018). De allí la relevancia de desarrollar modelos capaces de considerar la correcta planificación y desarrollo de capacidades logísticas a lo largo de las FSC para así garantizar el correcto funcionamiento de éstas.

2.3.1 Conceptualización de las capacidades logísticas

En la revisión de la literatura realizada se encontró que los autores han definido las capacidades logísticas desde diferentes enfoques, entre ellos se destaca las capacidades vistas como activos (recursos) que posee la organización y otro enfoque respecto a las habilidades y conocimientos que ha desarrollado la organización. Los activos son las dotaciones de recursos que el negocio ha acumulado y las habilidades son el medio mediante el cual se reúnen estos activos y se despliegan ventajosamente, están habilidades están tan profundamente arraigadas en las rutinas y prácticas organizacionales por lo que no se pueden comercializar o imitar (Day, 1994); en este último enfoque autores como *Hafeez, Zhang, & Malak* consideran las capacidades desde un punto de vista organizacional (Hafeez et al., 2002). En relación al primer enfoque algunos autores enfocan su definición desde el punto de vista de los medios logísticos, refiriéndose a los recursos físicos que posee una organización (Van Mieghem, 2003), (Georgiadis et al., 2005) y (López Fernández, 2010). En la Tabla II, se presentan las principales definiciones de capacidades logísticas encontradas en la literatura.

Tabla II. Conceptualización de capacidades logísticas

Autor	Definición de capacidades logísticas
(Day, 1994)	Conjuntos complejos de habilidades y conocimientos acumulados, ejercidos a través de procesos organizacionales, que permiten a las empresas coordinar actividades y hacer uso de sus activos (Day, 1994).
(Hafeez et al., 2002)	Capacidad de hacer uso de los recursos para realizar alguna tarea o actividad, definieron un recurso como cualquier cosa tangible o intangible propiedad o adquirida por una empresa. Las capacidades clave de una empresa se pueden dividir en cinco áreas funcionales principales: compras, fabricación, ventas, marketing e investigación y desarrollo (I + D) (Hafeez et al., 2002).
(Van Mieghem, 2003)	Es una medida de las capacidades y limitaciones de procesamiento que se derivan de la escasez de varios recursos de procesamiento y se representa como un vector de existencias de dichos recursos (Van Mieghem, 2003).
(Georgiadis et al., 2005)	La capacidad puede referirse a todas las operaciones de una cadena de suministro (espacio de inventario, mano de obra, instalaciones de producción, medios de transporte, etc.) (Georgiadis et al., 2005)
(Bowersox, Closs, & Cooper, 2010)	La capacidad logística de una empresa se relaciona directamente con su capacidad para atender circunstancias inesperadas relativas a cambios que se dan cuando el producto ya está en el sistema logístico en asuntos como retiro de productos y cambio de precios o empaques durante el transporte (Bowersox et al., 2010).
(López Fernández, 2010)	La cantidad de producto que puede contener un almacén, sistema o dispositivo de almacenaje de mercancía, un vehículo o medio de transporte, entre otros (López Fernández, 2010).
(Gou et al., 2013)	La capacidad logística de la cadena de suministro de las frutas frescas y vegetales tienen los más altos requerimientos que cualquier otra en la industria, ya que requieren entre otras cosas del uso de vehículos especiales que estén equipados con la logística de la cadena de frio (Gou et al., 2013).
(Crainic et al., 2014)	La capacidad cuantitativa de almacenamiento o transporte se refiere al número máximo de unidades de carga que pueden almacenarse o transportarse (Crainic et al., 2014)
(J. A. Orjuela Castro et al., 2017)	Las capacidades cualitativas hacen referencia a la tecnología de conservación utilizada, el tipo de embalaje y las técnicas manipulación (Orjuela Castro et al., 2017).

Las capacidades logísticas en las cadenas de suministro de frutas y vegetales frescos tienen los más altos requerimientos en la industria, esto gracias a la perecibilidad de los productos (Gou et al., 2013), es decir que éstas deben permitir la conservación de alimentos y garantizar velocidad en los procesos logísticos

para reducir las pérdidas y los costos (Orjuela Castro et al., 2017). Con base a esta necesidad de conservación y preservación se da origen al concepto de capacidades cualitativas y cuantitativas (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011), concepto que ha sido poco explorado. La capacidad cuantitativa de almacenamiento o transporte se refiere al número máximo de unidades de carga que pueden almacenarse o transportarse (Crainic et al., 2014), mientras las capacidades cualitativas hacen referencia a la tecnología de conservación utilizada, el tipo de embalaje y las técnicas manipulación (Orjuela Castro et al., 2017).

2.3.2 Clasificación de las capacidades logísticas

En la literatura se encuentran diferentes clasificaciones, para esto en la Tabla III. se citan las más relevantes. Las capacidades pueden ser vistas desde el punto de vista de recursos y desde el aprendizaje organizacional (Esper et al., 2007), desde el punto de vista de recursos las capacidades pueden ser clasificadas en términos de: capacidad teórica, capacidad instalada, capacidad disponible, capacidad necesaria y capacidad utilizada (Kalenatic, 2005). Para el desarrollo del modelo se toma como referencia la clasificación de (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011).

Tabla III. Clasificación de las capacidades logísticas

Autor	Síntesis
(Kalenatic, 2005)	Clasifica las capacidades en términos de: capacidad teórica, capacidad instalada, capacidad disponible, capacidad necesaria y capacidad utilizada (Kalenatic, 2005).
(Georgiadis et al., 2005)	Identifican tres enfoques para las capacidades logísticas: Leading capacity strategy: el exceso de capacidad se usa para cubrir demandas imprevistas, Trailing capacity strategy: la capacidad no satisface siempre la demanda, pero si se usa totalmente, Matching capacity strategy: hacer que la capacidad y la demanda coincidan ((Georgiadis et al., 2005).
(Wu et al., 2006)	Clasifica las capacidades en cuatro dimensiones: intercambio de información, coordinación, integración de actividades y capacidad de respuesta de la cadena de suministro (Wu et al., 2006).
(Esper et al., 2007)	Clasifica las capacidades logísticas desde un punto de vista basado en los recursos y el aprendizaje organizacional: capacidad de integración; capacidad de medición e intercambio de información; y capacidades de aprendizaje (culturales, relacionales, estructurales y temporales) (Esper et al., 2007).
(Lu & Yang, 2007)	Las capacidades primarias pueden dividirse en diferentes categorías: a saber, interfaz de mercado, infraestructura y capacidades tecnológicas (Lu & Yang, 2007).
(Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011)	Clasifica las capacidades logísticas en: Capacidades cuantitativas y cualitativas. (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011)
(Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011)	Define cuatro tipos de capacidades logísticas: Capacidad de almacenamiento, capacidad de manipulación, capacidad de transporte y capacidad de información (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011)
(Sandberg & Abrahamsson, 2011)	Clasifican las capacidades logísticas en capacidades operativas y dinámicas. Las primeras las describen como conjuntos complejos de habilidades individuales, activos y conocimientos acumulados y las segundas como rutinas presentes en los procesos de gestión y organización de la empresa (Sandberg & Abrahamsson, 2011).
(Liu & Nagurney, 2012)	Clasifican la capacidad logística en tres dimensiones: capacidad de los procesos, capacidad flexible (adaptabilidad) y capacidad de integración de la información (Z. Liu & Nagurney, 2012).
(Gligor & Holcomb, 2013)	Clasifican las capacidades logísticas de las siguientes maneras: enfocadas a la demanda, gestión de la cadena y la gestión de la información (Gligor & Holcomb, 2013).
(Herrera-Ramírez & Orjuela Castro, 2014)	Plantea que existen dos tipos de capacidad logística la cualitativa y la cuantitativa, esta última presenta una restricción ya que no solo se analiza la empresa sino también lo requerimientos del cliente. La logística se divide principalmente en dos grandes procesos: el almacenamiento y el transporte (Herrera-Ramírez & Orjuela Castro, 2014).

Para el desarrollo de la investigación se tomara como punto de partida la clasificación realizada por (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011) y por (Herrera-Ramírez & Orjuela Castro, 2014); partiendo de la primera clasificación hablamos de:

- Capacidad del almacén: Número máximo de unidades de carga (palés, cajas, cartones, etc.) que puede procesar un almacén.
- Capacidad de manipulación: Incluye la clasificación, la colocación y la extracción del stock, así como la carga y descarga del transporte. Conecta el flujo interno y externo de mercancías, así como los diferentes medios de transporte y almacenamiento. Por tanto, la capacidad de manipulación es el rendimiento operativo total dentro de un período de tiempo definido.
- Capacidad de transporte: Depende de las dimensiones de la bodega de carga, así como de la capacidad de carga permitida. Por lo tanto, las mercancías se miden en unidades de embalaje, unidades de carga o en unidades de volumen (para mercancías a granel).
- Capacidad de información: Comprende la "captura, almacenamiento, procesamiento y salida de datos que son necesarios para el control y monitoreo del flujo de materiales e información en un sistema de transporte y almacenamiento", consta de componentes de hardware y software. Las capacidades de información se pueden definir en relación con esto como el rendimiento máximo que el sistema de información puede proporcionar.

De acuerdo con esto para el desarrollo de la investigación se van a trabajar con las capacidades de almacenamiento y de transporte. Con relación a la segunda clasificación a continuación se presenta en detalle lo propuesto.

2.3.2.1 Capacidades cualitativas

Para (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011) las capacidades cualitativas cubre las características y otras condiciones de la capacidad, para (Sanabria Coronado et al., 2017) este tipo de capacidad hace referencia a las condiciones óptimas en las que se deben desarrollar los diferentes procesos logísticos. Con base en esto para la presente investigación se entienden las capacidades logísticas cualitativas como todas aquellas condiciones que se deben considerar para garantizar la calidad de los productos a lo largo de la CS, especialmente para los productos perecederos se hace referencia a la tecnología de conservación utilizada, el tipo de embalaje y las técnicas manipulación (Orjuela Castro et al., 2017). De acuerdo con la revisión de la literatura realizada, en la siguiente tabla se presenta la relación de los aspectos encontrados con las capacidades logísticas cualitativas que se determinaron para la presente investigación.

Tabla IV Capacidades logísticas cualitativas

Capacidades logísticas cualitativas		
Aspecto	**Capacidad cualitativa asociada**	**Autor**
Temperatura	Sistemas de refrigeración	Principales causas de las pérdidas poscosecha definidas por la FAO
Ventilación	Sistemas de ventilación	
Iluminación	Ambientes controlados	
Variaciones de altitud	Ambientes controlados	(Sanabria Coronado et al., 2017)
Humedad relativa	Ambientes controlados	
Empaque	Tipo de empaque (materiales y tamaños)	(Orjuela-Castro, Herrera-Ramírez, et al., 2017) (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011)
Embalaje	Tipos de embalaje	(Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011)
Estiba	Técnicas de manipulación	

a. Sistema de refrigeración

La cadena de frio es la sucesión de procesos logísticos (producción, almacenaje, distribución, embalajes, transporte, carga y descarga, venta directa) con una temperatura y humedad relativa controlada, desde el momento inicial de la producción hasta el consumidor final. Su finalidad es preservar el producto de

temperaturas críticas de riesgo y evitar la proliferación bacteriana que pueda afectar la salud de los consumidores finales. La implementación de actividades logísticas a lo largo de la cadena de abastecimiento es fundamental para garantizar las temperaturas específicas que requieren determinados productos perecederos, de acuerdo con sus características, tales como recepción de la materia prima, almacenamiento, transporte y comercialización del producto (Procolombia - Exportaciones turismo marca país, 2015).

La finalidad que tiene la cadena de frío es restringir la velocidad de deterioro en el producto, sin acarrear una maduración anómala u otros cambios perjudiciales, de tal manera que el producto se conserve durante períodos tan largos como sea posible, en condiciones aceptables para el consumidor (Giraldo Perdomo & Torres Rubio, 2018). De acuerdo a (Urrego, 2018) el cumplimiento detallado de la cadena de frío es la mejor forma de garantizar la correcta conservación de los productos perecederos, la inocuidad y la calidad de estos, a la vez permite disminuir la pérdida y desperdicio a lo largo de los diferentes procesos (desde la producción hasta el consumo). En los países en vías de desarrollo se dañan los alimentos, teniendo en cuenta que no disponen de cadenas de suministro de frío y congelado, ni de infraestructuras adecuadas, tecnología y personal capacitado para el mantenimiento (Procolombia - Exportaciones turismo marca país, 2015). En Colombia, específicamente, con base en estudios realizados recientemente, se ha determinado un alto volumen de alimentos que no llegan al consumo humano debido a pérdidas causadas por procesos deficientes y desperdicio, mal manejo o disposición de estos (Urrego, 2018). En el informe *"Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia. Estudio de la dirección de seguimiento y evaluación de políticas públicas*", el Departamento Nacional de Planeación (S.Gaviria, L.Mejia, M.Castro, E.Gómez, 2016) muestra que los 9.7 millones de toneladas que se pierden o desperdician en Colombia corresponden al 34% de los 28.5 millones de toneladas de alimentos producidos. El mismo informe indica que de los 9.7 millones de toneladas, 6.1 millones (que corresponden al 58% de los alimentos que se pierden o desperdician) son frutas y verduras.

De acuerdo a (Ariza Arevalo, 2015) existen generalmente 8 categorías de productos que requieren cadena de frio, de las cuales 5 hacen referencia directamente a alimentos. Hacen parte la carne cruda fresca y procesada, la leche, frutas y verduras, materias primas y alimentos congelados. Para estos productos resulta indispensable la cadena de frio ya que de acuerdo a (Rudolf Plank, 2004) "a diferencia de otros procedimientos, la conservación a través del frio es el único capaz de conseguir que el sabor natural, el olor y el aspecto de los productos apenas se diferencien (…) los alimentos conservados en frio o congelados, pueden mantenerse durante meses prácticamente sin alteración, si el tratamiento es correcto". Lo que permite establecer que la logística de la cadena de frio es un factor clave de éxito debido al impacto e importancia que tiene en la conservación de alimentos.

b. Empaque productos hortifrutícola

La calidad con que llegan los productos hortofrutícolas al consumidor depende, en gran medida, del material del empaque. Una selección adecuada del material para empaque y embalaje debe corresponder a las exigencias cada vez mayores tanto del mercado de exportación como del mercado local, brindar protección, solucionar problemas en la conservación, prolongar la vida útil y al mismo tiempo ser una estrategia de posicionamiento comercial de los productos (Unibague, 2013). Se entiende por empaque todo producto fabricado con materiales de cualquier naturaleza y que se utilice para contener, proteger, manipular, distribuir y presentar mercancías, desde materias primas hasta artículos acabados, en cualquier fase de la cadena de fabricación, distribución y consumo (PROEXPORT, 2012).

La función principal de cualquier tipo de embalaje es proporcionar al producto empacado la protección necesaria para que pueda soportar, sin sufrir daño alguno, los diferentes riesgos a los que se ve expuesto durante su almacenamiento, transporte y distribución, como lo son el riesgo mecánico asociado a vibraciones, el riesgo biológico por contaminación cruzada o el riesgo por humedad o altas precipitaciones, de tal manera que llegue a su destino final en condiciones óptimas de venta (Unibague, 2013). De acuerdo a lo mencionado por (ICONTEC, 2007) los materiales de envasado se seleccionan teniendo en cuenta las necesidades de los productos, el método de envasado, el método de prerrefrigeración, la resistencia, el costo, la disponibilidad, las condiciones del comprador y los fletes. Los importadores, compradores y fabricantes de envases proporcionan recomendaciones valiosas. Entre los materiales utilizados se incluyen los siguientes:

- Recipientes, cajas (encoladas, engrapadas, entrelazadas), cajones, bandejas, bateas, tabiques o mamparas, y separadores de cartón ondulado o tablero de fibra.
- Sacos, fundas, envolturas, forros, almohadillas, virutas y etiquetas de papel.
- Recipientes, cajas, bandejas, sacos (de malla, compactos), contenedores, fundas, envolturas de película, forros, tabiques y separadores de plástico.
- Cajas, bandejas, cajones, fundas, forros, tabiques y almohadillas de goma espuma.

Se destacan los empaques más utilizados para productos frutícolas de acuerdo con lo mencionado por (Unibague, 2013):

- Cajas de cartón corrugado: Son el material más utilizado para la elaboración de empaques de comercialización y exportación de productos hortofrutícolas. Generalmente, se elaboran con láminas sencillas, dobles o triples onduladas y con perforaciones que permiten la ventilación del calor, respiración del producto y la circulación del aire frío al producto. Las dimensiones para las cajas de cartón corresponden a las mismas establecidas por la norma ISO 3394 recomendadas para los empaques 60 cm x 40 cm (múltiplos y submúltiplos) y altura variable que se determina según las características físicas de los productos. Los empaques de doble ranura brindan mayor resistencia al apilado por lo que se recomienda utilizarlos en frutas y hortalizas.
- Canastilla plástica: Son la mejor alternativa en el empaque de productos hortofrutícolas que son comercializados en el mercado local de cada país, al brindar una mayor protección física y mecánica a los productos y garantizar la conservación de la calidad a lo largo de la cadena de suministro siempre y cuando, los productos se organicen en orden y en niveles. Tienen la ventaja de ser resistentes, fáciles de manejar y limpiar, apilables y reutilizables. Las dimensiones para las canastillas corresponden a las mismas establecidas por la norma ISO 3394 recomendadas para los empaques 60 cm x 40 cm (múltiplos y submúltiplos) y altura variable que se determina según las características físicas de los productos.
- Fibras naturales: Son principalmente utilizadas para la comercialización de tubérculos y algunas frutas y hortalizas dado que no brindan ninguna resistencia mecánica. La NTC 5422 del 2006 presenta algunas recomendaciones generales en el uso de fibras naturales:
    - La costura para unir los extremos del saco debe proporcionar una resistencia suficiente, de manera que impida su separación en el momento del llenado o durante su uso.
    - Los hilos deben ser de una calidad tal que no se rompan o se separen durante su uso y la boca del saco debe tener un doblez u orillo, suficientemente fuerte para que no se rompan ni se descosan durante el uso.
    - Las dimensiones del saco de fibra natural serán acordadas entre los clientes y los fabricantes.

2.3.2.2 Capacidades cuantitativas

La capacidad cuantitativa es el potencial cuantitativo dentro de un cierto período de tiempo. Se puede dividir en capacidad mínima, capacidad óptima y capacidad máxima(Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011). Para la presente investigación se entiende la capacidad cuantitativa de almacenamiento o transporte como el número máximo o mínimo de unidades de carga que pueden almacenarse o transportarse (Crainic et al., 2014). La siguiente tabla presenta como son utilizadas las capacidades logísticas cuantitativas en los modelos más relevantes que se revisaron.

Tabla V. Capacidades logísticas cuantitativas.

Autor	Proceso logístico Almacenamiento			Tipo de capacidad			
	Transporte	Almacenamiento	Oferta	Utilizada	Disponible	Requerida	Suministro
(Navazi et al., 2019)	x				x		
(Orjuela-Castro et al., 2018)	x				x		
(Darbari et al., 2019)	x				x		
(Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011)	x	x		x	x		
(Martins et al., 2019)	x	x				x	
(Soto-Silva et al., 2017)		x				Camara fria	
(Soysal et al., 2014)			x				x
(Kim et al., 2011)			x				x
(Mohammed & Wang, 2017)			x				x

2.4 Sostenibilidad en la FSC

De acuerdo a (Yadav et al., 2022) el concepto de sostenibilidad podría derivarse del “Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: 'Nuestro Futuro Común' de las Naciones Unidas” de (Chacón Vargas et al., 2018). El informe dice: “El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Además, (Elkington, 1998) amplió este concepto como Triple Bottom Line con tres franjas en las dimensiones "económica, ambiental y social", ya que pide con urgencia nuevos modos de FSC que desarrollen un equilibrio sostenible al considerar simultáneamente los problemas de estas tres dimensiones. (Gamboa Bernal et al., 2020) realiza una revisión de la literatura alrededor de las perspectivas actuales de la gestión de la cadena de suministro sostenibles dada la importancia emergente de este campo y con el propósito de motivar futuras investigaciones, en este contexto de acuerdo con la revisión realizada menciona las siguientes definiciones para cada una de las dimensiones.

- **Dimensión social**

En esta dimensión se incluye la responsabilidad social empresarial, que implica la toma de decisiones éticas en campos como las relaciones con los empleados, la participación comunitaria y las prácticas de gestión empresarial a través de la educación y el desarrollo del talento (Closs et al., 2011) . Otros autores incluyen prácticas como los sistemas de gestión de la salud y la seguridad, así como el diseño de productos y procesos que impactan positivamente en el bienestar de los consumidores y trabajadores. Esto también incluye acciones que contribuyan al bienestar de la comunidad en la que opera el SC

(Chacón Vargas et al., 2018). La mayoría de los problemas sociales en FSC sostenible suelen ser: la seguridad alimentaria, el bienestar animal y la donación de alimentos. La seguridad alimentaria ha sido más investigada, representando casi la mitad de los artículos revisados que involucran problemas sociales (Zhu et al., 2018).

- **Dimensión ambiental:**

Ha evolucionado desde la preocupación por las emisiones en la fuente, los vertidos y los residuos ambientales, para luego enfocarse en el medio ambiente local considerando todo el ciclo de vida del producto. Actualmente se enfoca en la capacidad de los ecosistemas para continuar proporcionando bienes y servicios (Chacón Vargas et al., 2018)

- **Dimensión económica:**

Consiste en la mejora del valor total y la reducción de costes de la SC desde una perspectiva de gestión empresarial, así como de iniciativas estratégicas y sostenibles que impulsen las finanzas y el marketing de la empresa (Gamboa Bernal et al., 2020). Para (Silvestre, 2015) las SC deben adoptar y priorizar la sostenibilidad mientras describen cómo se pueden implementar y gestionar las cadenas de suministro sostenibles. Además, (Touboulic et al., 2014) argumentan que las iniciativas de sostenibilidad organizacional están relacionadas con la evolución de las estrategias comerciales para abordar los impactos sociales.

2.4.1 Medidas de desempeño de sostenibilidad

Respecto a la revisión realizada se destacan el informe de (Department for Environment, 2006) y la guía planteada por (Global Reporting Initiative, 2013), ya que en ellos se indican una serie de medidas de desempeño para la sostenibilidad, se resalta principalmente la primera de estas ya que está enfocada a la agricultura y alimentación sostenible, los cuales hacen parte del tema de estudio. Dado el campo de aplicación en el que se desarrolla la investigación, en la Tabla VI, se plasman las medidas de desempeño de sostenibilidad utilizadas en los modelos analizados, en los que se tenían en consideración las capacidades logísticas y que abordaran más de una dimensión de sostenibilidad.

Tabla VI. Medidas de desempeño

	Ambiental							Social											Económico			
Autor	**Energía**	**Residuos**	**Agua**	**Cambio climático**	**Biodiversidad**	**Emisiones CO2**	**Cumplimiento regulatorio**	**Nutrición**	**Seguridad alimentaria (D: disponibilidad I: inocuidad)**	**Igualdad oportunidades**	**Seguridad**	**Comercio ético**	**Trabajo digno**	**Desarrollo social**	**Responsabilidad social**	**Derechos humanos**	**Tasa de empleo**	**Tasa de accidentes**	**Innovación**	**Presencia en el mercado**	**Ganancias**	**Costos**
(Allen, S. J., & Schuster, E. W. 2004)									D													Exceso capacidad
(Department for Environment, 2006)	x	x	x	x				x	x	x	x	x							x			
(Global Reporting Initiative, 2013)	x	x	x		x	X	x						x	x	x	x				x	x	

(Ramezani, Bashiri, & Tavakkoli-Moghaddam, 2013)									Calidad												x	
(Castro et al., 2015)									D													Totales
(Orjuela-Castro et al., 2016)									D													
(Orjuela-castro et al., 2016)						X			D													Transporte
(Varsei & Polyakovskiy, 2017)						X											x					Totales
(J. A. Orjuela Castro et al., 2017)									D													Ampliación capacidad
(Orjuela-Castro, Cardona-Rojas, et al., 2017)									D													Logísticos
(Orjuela-Castro, Morales-Aguilar, et al., 2017)									I													Inventario Transporte Adquisición Alistamiento
(Milton M Herrera-Ramírez et al., 2017)									Trazabilidad													Tecnología
(Orjuela-Castro, Sanabria-Coronado, et al., 2017)									D													Apertura
(Navazi, F. et, al. 2018)						X												x				Totales
(Orjuela-Castro et al., 2018)									D												x	
(J. Orjuela Castro & Adarme Jaimes, 2018)									D													Logísticos Adquisición Producción Perdida
(Yu, H. &Solvang, W.D. 2018)						X															x	
(Martins et al., 2019)						X			D												x	Operación Almacenamiento Transporte
(Darbari et al., 2019)						X											X				x	
(Orjuela-Castro, Aranda-Pinilla, et al., 2019)						X			D													Totales
(Mohebalizadehgashti et al., 2020)						X																Totales
Total	2	2	2	1	1	9	1	1	15	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	6	14

Es evidente que en la dimensión ambiental la medida de desempeño más utilizada son las emisiones de CO2, esto se debe a que en los últimos años ha sido una de las temáticas más estudiadas y con mayor interés para la comunidad científica, en el caso de las FSC, en Europa por ejemplo los alimentos contribuyen con el 31% de las emisiones totales de la UE-25 según un análisis regional en Europa

(Garnett, 2011); de igual forma en relación al consumo de energía, se estima que la contribución del uso de energía relacionada con los alimentos al presupuesto nacional de energía aumentó del 14,4% en 2002 al 15,7% en 2007 (Canning et al., 2010), esto se debe por ejemplo a la relevancia que han adquirido las tecnologías de conservación, ya que el consumo de energía para el control de la temperatura es necesario para garantizar la calidad e inocuidad de los alimentos (Zhu et al., 2018), dada la realidad actual se considera relevante incluir en el modelado otros aspectos como el uso de recursos no renovables, como los es el agua. En la dimensión social se coincide con lo planteado por *Zhu et al.* respecto a que el enfoque más utilizado es el de seguridad alimentaria, desde la inocuidad y la disponibilidad de los alimentos, el primero sobre todo está estrechamente relacionada con sistemas de conservación mediante la temperatura controlada (Zhu et al., 2018) y el segundo enfocado a la necesidad de atender la demanda de alimentos; también se considera importante incluir el bienestar de los agricultores al modelar la FSC para que los pequeños agricultores puedan recibir un trato justo del mercado (Sodhi & Tang, 2014). Por otro lado, la dimensión económica es una de las más estudiadas ya que la mayoría de los modelos sobre todo los de optimización consideran los diferentes costos en los que se incurre en las SC, de la revisión realizada se destaca, el costo de modificación de capacidad, el costo por desperdicios de alimentos y el costo de implementación de nuevas tecnologías.

A nivel ambiental es evidente que desafíos como el rápido crecimiento de la población y el cambio climático han aumentado las preocupaciones sobre los problemas ambientales de las industrias (Abbas et al., 2021). Las industrias consumen alrededor del 50% de la energía mundial y son responsables de la emisión de más de un tercio del dióxido de carbono (Ramezanian et al., 2019). Es claro que problemáticas como el cambio climático, el aumento de la demanda mundial de energía y las reservas limitadas de combustibles fósiles han llevado a la innovación de nuevas soluciones como es el uso de energías limpias y renovables, incluida la energía solar térmica (Soto-Silva et al., 2017) y el uso de medios de transporte más amigables con el medio ambiente para la reducción de emisiones. Sin embargo, aún existen graves problemas ambientales que no han sido abordados y que en los últimos años han llamado la atención del sector agrícola (Hosseini-Fashami et al., 2019). De acuerdo a (Baghizadeh et al., 2021) hay una demanda creciente de las limitadas fuentes de agua en partes de Europa y la cuenca del Mediterráneo, al igual que en el resto del mundo. Hasta ahora, las mayores cantidades de agua utilizadas en la cadena de valor de alimentos y hortalizas frescas se atribuyen al cultivo (Hosseini-Fashami et al., 2019), pero no se puede olvidar el consumo de agua que involucra el resto de eslabones de la FSC. (Gustavsson & Stage, 2011) afirmaron que algunas pérdidas de alimentos podrían reflejar grandes cantidades de consumo de agua y energía, lo que representa casi el 38 % de todo el consumo de energía en la industria alimentaria. Por ello, (Baghizadeh et al., 2021) plantean que es de vital importancia estudiar y analizar las causas y reducir su consumo, para lo cual plantean un modelo multiobjetivo y multiperíodo de la SC de la producción de fresa. Las funciones objetivo del modelo incluyen maximizar la ganancia de la venta de fresas, incluido el costo ambiental, minimizar el consumo de energía y agua y el desperdicio de agua, así como minimizar el tiempo de espera para el transporte de productos cosechados en base a un modelo de cola G/M/S/M. Estas funciones objetivas también minimizan indirectamente el desperdicio de productos.

De acuerdo con la revisión realizada y con base en los objetivos de la investigación, se pretende enfatizar en la seguridad alimentaria en relación con la disponibilidad y a la huella hídrica como medidas de desempeño.

+

2.5 Gestión de la cadena de suministro sostenible (SSCM)

De acuerdo a la revisión realizada por (Rebs et al., 2019) la SSCM se ha convertido en una preocupación creciente frente a los recursos ambientales limitados y una población mundial en crecimiento debido a que las actividades de producción y logística consumen los recursos disponibles y aumentan los desechos y la contaminación. Además, las condiciones humanas de trabajo y otros factores sociales generan con frecuencia tensiones, particularmente si se evidencia una distribución inequitativa de los beneficios. La transformación del SCM convencional en SSCM genera una tremenda presión sobre los eslabones para que introduzcan cambios en su SC existente con el fin de satisfacer las necesidades actuales de sostenibilidad (Busse et al., 2017), ya que las influencias ambientales y los factores sociales afectan las SC, que a su vez responde a estos impactos socioambientales (Jaehn, 2016).Por esta razón, en un mundo desafiante y competitivo como el nuestro, SSCM es una herramienta tan robusta que podría provocar una revolución al mejorar la efectividad corporativa en términos de desempeño social y ambiental, logrando así una mayor rentabilidad para los actores y proporcionar una ventaja competitiva ante la competencia (Seuring & Müller, 2008).

(Panigrahi et al., 2019) realizo una extensa revisión de la literatura enfocada a determinar futuros campos de investigación para la SSCM, en esta revisión se muestra que aún no hay consenso con relación a la definición de la SSCM. En la revisión se mencionan alrededor de 19 definiciones o acercamientos a este concepto; el primer acercamiento fue planteada en 1995 por quien plantea la necesidad de *"Reducción de los riesgos que ocurren a largo plazo asociados con la utilización de recursos, la utilización de energía y los costos asociados, el diseño de productos, la contaminación y la gestión de desechos en una cadena de suministro"* Como consecuencia, se busca la "[…] integración de las consideraciones económicas, ambientales y sociales con otros sistemas empresariales interorganizacionales […]" (Ahi & Searcy, 2013) amplía el mero enfoque de la gestión de la cadena de suministro tradicional (SCM) sobre los aspectos económicos a la gestión sostenible de la cadena de suministro (SSCM).

En la revisión de la literatura realizada por (Khan et al., 2021) se muestran nueve definiciones de la SSCM, con base a dichas definiciones se seleccionaron las que se consideran más relevantes para la presente investigación, las cuales son presentadas en la Tabla VII, se decidió tomar como base la definición planteada por (Seuring & Müller, 2008).

Tabla VII. Definiciones de SSCM más relevantes para la investigación

No	Definición	Autor
1	"SSCM puede definirse como el logro estratégico de los objetivos económicos, ambientales y sociales de una empresa en la coordinación sistemática de procesos clave entre empresas para mejorar el crecimiento y/o el rendimiento financiero".	(Carter & Rogers, 2008)

2	“La gestión de la cadena de suministro sostenible se ocupa de la gestión de la información, los flujos de capital y los materiales, así como la cooperación entre diferentes empresas a lo largo de la cadena de suministro, al mismo tiempo que toma objetivos de todas las 3D (3 dimensiones) del desarrollo sostenible que se derivan de los requisitos de las partes interesadas y los consumidores"	(Seuring & Müller, 2008).
3	"SSCM es la adición de la sostenibilidad a los procesos tradicionales de SCM, teniendo en cuenta los impactos financieros, ambientales y sociales de las actividades de la empresa".	(Turker & Altuntas, 2014)

De acuerdo a (Lis et al., 2020) los déficits de sustentabilidad a lo largo de una cadena de suministro pueden resultar en una disminución en el desempeño financiero de la empresa o en una pérdida de su competitividad. Por lo tanto, la investigación sobre cadenas de suministro sostenibles constituye un campo que ha atraído la atención de investigadores y profesionales en los últimos años. Esto ha llevado a una cantidad cada vez mayor de trabajos en el campo, que cubren una variedad de subtemas tales como: gestión y desempeño ambiental, toma de decisiones siguiendo el enfoque de triple resultado, evaluación y selección de proveedores sostenibles, riesgos de gestión de la cadena de suministro sostenible, logística inversa, gestión de la cadena de suministro para productos sostenibles, etc.

3. RELACIÓN ENTRE LA EXISTENCIA DE ASIMETRÍAS DE CAPACIDADES LOGÍSTICAS Y LA SOSTENIBILIDAD DE LA SC DE ALIMENTOS PERECEDEROS

Como se mencionó anteriormente en la presente investigación se pretende involucrar tres temáticas principales: La configuración de la CS, las capacidades logísticas y la sostenibilidad de la CS; sin embargo, para determinar la relación que existe entre estas tres temáticas con base a la literatura se revisaron 14 artículos que planteaban modelos que involucraban dichas temáticas, enfatizando en la teoría planteada en el artículo para buscar relaciones entre las temáticas y en las variables, parámetros y demás aspectos que fueron considerados en cada uno de los modelos. Para esta revisión se recalcó en la forma en la que se abordaban las capacidades logísticas en el transporte y en el almacenamiento, incluyendo capacidades cuantitativas y cualitativas (sistemas de conservación y empaques utilizados), en las decisiones de configuración de la CS y las dimensiones de sostenibilidad.

Se tomo como punto de partida el hecho de que la gestión de la cadena de suministro (SCM) abarca tres niveles de decisión: estratégico, táctico y operativo (Lis et al., 2020) y tienen fundamentalmente dos enfoques uno de gestión y otro de configuración física (Orjuela Castro, 2018), siendo este ultimo el de interés para la investigación, entendiéndose como la disciplina utilizada para determinar el número óptimo y la ubicación de las instalaciones, asignar capacidad y requisitos tecnológicos a las instalaciones y decidir el flujo de productos a través de la cadena de suministro para satisfacer las demandas de los clientes (Martins et al., 2019), es decir que se centra en cuestiones de localización, dimensionamiento de instalaciones y definición de flujos de material a través de la red (Eskandarpour et al., 2015). En la revisión realizada se evidencia que una de las decisiones más utilizadas en los modelos de configuración de la CS es la apertura de nuevas instalaciones con lo cual se amplía la capacidad de dicho eslabón; también se destaca las decisiones relacionadas con el flujo de productos entre nodos, involucrando la cantidad a transportar, la asignación origen destino y los medios de transporte utilizados.

Desde la temática de capacidades logísticas, teniendo en cuenta que junto a las variaciones biológicas, la calidad de los alimentos está determinada por el tiempo y las condiciones ambientales (como la temperatura, la humedad y la presencia de contaminantes), dichas condiciones pueden verse influidas, por ejemplo, por el tipo de embalaje, la forma de carga y la disponibilidad de medios de transporte y almacenes acondicionados con temperatura controlada(Van Der Vorst et al., 2009), de esta forma se destaca además de la capacidad disponible y requerida a nivel de capacidades cuantitativas, el uso de métodos de conservación como: sistemas de refrigeración, uso de atmosferas controladas y sistemas de preenfriamiento para preservar las características de los alimentos. Frente a la sostenibilidad se evidencia que el aspecto económico es predominante en cada uno de los modelos que se analizaron, siendo esta la medida de desempeño más utilizada en los modelos de optimización, sin embargo con el paso del tiempo la dimensión ambiental ha tomado relevancia pero sobre todo en relación a las emisiones de CO2 a lo largo de la cadena, dejando a un lado los demás aspectos ambientales en los que se incurre la CS, finalmente la dimensión social es la menos abordad, siendo aún un campo insipiente y que requiere de mayor investigación. En la Tabla VIII se presentan los resultados de dicha revisión.

Tabla VIII. Principales aspectos considerados en los modelos revisados

	Capacidad instalaciones				Capacidad transporte		Capacidad de respuesta		Decisiones de reconfiguración												Sistemas de conservación		Sostenibilidad			Consideraciones	
	Disponible	Requerida	Eliminar o reubicar	Potencial	Disponibles (camiones)	Expansión	Cobertura demanda	Tiempo entrega	Modificación de capacidad	Apertura de instalaciones	Número nuevas instalaciones	Ubicación potencial	Carga completa de camiones	Sub contratar capacidad	Cantidad a transportar	Cantidad de camiones	Número de viajes	Asignación origen	Modos de transporte	Empaque	Control de temperatura	Nivel tecnológico	Ambiental	Social	Económico	Restr. Geográficas	Disponibilidad mano de obra
(Melo et al., 2006)	x	x	x	x						Reubicación					x										x		
(Laura Xu et al., 2009)										x		x			x			x							x	x	x
(Van Der Vorst et al., 2009)										Reubicación									x	x	x		x		x		
(Kim, Realff, Lee, Whittaker, & Furtner, 2011)				x						x					x										x		
(Razmi et al., 2013)	x	x	x				x	x	Almacenamiento	x	x				x				x						x	x	
(Nourbakhsh, Bai, Maia, Ouyang, & Rodríguez, 2016)					Carretera	Carretera			Carretera	x					x	x								x	x		
(Mohammed & Wang, 2017)	x	x		x	x					x	x	x			x								x		x		
(Varsei & Polyakovskiy, 2017)	x	x		x						x		x			x			x	x				x	x	x		
Orjuela-Castro, J. A., Sanabria-Coronado, L. A., & Peralta-Lozano, A. M. (2017)				Min-Max						x		x			x			x							x	x	
(Navazi, F. et, al. 2018)				Max	x					x		x			x	x		x				x	x		x		
(Martins, C.L. et, al. 2018)	x	x	x	x	Propia Alquila					x		x		Transporte	x			x					x	x	x		
(Krishnan et al., 2020)					x								x				x			x			x				
(Haial et al., 2020)	x	x		x						x					x				x						x		
(Mohebalizadehgashti, F. et,al. 2020)				Max						x	x	x		x	x								x	x	x		
Total	6	6	3	9	5	1	1	1	2	13	3	7	1	2	12	1	1	4	4	2	1	1	7	4	13	3	1

Aspectos considerados en los modelos

Luego de la revisión detallada de cada uno de los artículos seleccionados, con base en estos se analizó la forma en la que se relacionan las decisiones de configuración logística de las SC con las asimetrías de capacidades logísticas y las medidas de desempeño de sostenibilidad desde sus tres dimensiones, para esto se diseñaron tres matrices en la que se fueron relacionado uno a uno los aspectos mencionados anteriormente, Las matrices se estructuraron de la siguiente manera:

- Matriz 1: Formada por la relación entre el conjunto de decisiones de configuración y las capacidades logísticas seleccionadas, en cada intersección decisión-capacidad se describió si esa decisión afectaba a dicha capacidad logística y la manera en que lo hacía.
- Matriz 2: Formada por la relación entre el conjunto de las capacidades logísticas seleccionadas y las medidas de desempeño de sostenibilidad, en cada intersección se describió si esa capacidad logística afectaba a la medida de desempeño y en qué manera lo hacía.
- Matriz 3: Formada por la relación entre el conjunto de decisiones de configuración y las medidas de desempeño de sostenibilidad, en cada intersección se describió si esa decisión afectaba la medida de desempeño y la manera en que lo hacía.

La selección se realizó de tal manera que se incluyeran los aspectos con mayor impacto en la sostenibilidad de la FSC y aquellos con mayor facilidad de representación. Los resultados finales de cada una de las matrices se presentan en la se encontraron decisiones de configuración relacionadas a las características de las infraestructuras físicas (almacenamiento), decisiones sobre las condiciones y cantidades a movilizar entre los diferentes nodos de la SC (transporte) y decisiones sobre los actores que van a participar en la configuración principalmente con relación a los proveedores (capacidad productiva). Por el lado de las Capacidades logísticas se aborda capacidades cuantitativas (disponible, requerida y máxima) y cualitativas (sistemas de refrigeración y empaques) tanto para almacenamiento como para trasporte.

- Relación entre la configuración de la SC y las capacidades logísticas

En el contexto de las FSC la selección adecuada de proveedores resulta una decisión determinante dadas las condiciones de perecibilidad que tienen los alimentos, en estos contextos más que en cualquier otro es indispensable determinar lo más exacto posible la oferta que se requiere (capacidad requerida) para el funcionamiento de la cadena, ya que una estimación por debajo de lo requerido puede llevar a la no disponibilidad de alimentos poniendo en riesgo la seguridad alimentaria, pero una estimación por encima generará perdida de cosecha por sobreproducción y una disminución del precio por el alto volumen ofertado lo que en casos extremos puede llevar a la generación de perdidas para el productor. En tal sentido se requiere una coordinación aguas arriba y aguas debajo de la SC para que exista lo más cercano a un equilibrio entre la capacidad requerida y la capacidad disponible que tienen los proveedores, frente a este comportamiento el proveedor deberá hacer las respectivas estimaciones a largo plazo en caso de decidir ampliar su capacidad, por lo que deberá tener en cuenta las dinámicas del mercado a la hora de determinar esta nueva capacidad máxima y dentro de esta decisión se deberá considerar aspectos como la cercanía a los demás nodos para reducir tiempos de transporte y por ende los riesgos de perdida de alimento. Finalmente, a la hora de seleccionar un proveedor también se deberá considerar el empaque utilizado ya que en este se hará el primer transporte y como se ha mencionado influye en la conservación del producto.

En relación con las decisiones de modificación de la capacidad de almacenamiento en los diferentes nodos de la SC, se puede dar mediante la ampliación de capacidad de una infraestructura ya existente, cierre de instalaciones, apertura de nuevas instalaciones o modificaciones en el sistema de conservación utilizado, dichas decisiones están estrictamente relacionadas con las capacidades, ya que la capacidad requerida y la disponible

son los parámetros base para la toma de decisiones, la diferencia entre estas dos definirá si hay capacidades ociosas que están generando costos adicionales y por ende se deberá hacer el cierre de estas o por el contrario si hay déficit de capacidad y se debe optar por la apertura de nuevas instalaciones o ampliación de las existentes, en estas dos ultimas opciones se determina la capacidad máxima que se tendrá ya sea para la nueva o para la antigua modificada, también se deber considerar en estos tipos de modificaciones los sistemas de refrigeración a utilizar.

Con relación a las decisiones de configuración frente al transporte de alimentos se destaca la asignación origen destino y la magnitud que cada uno de estos flujos, de acuerdo con estos y las características de los productos se deberá definir el tipo de transporte a utilizar. Una vez se definan cada uno de los posibles actores a participar en la configuración de la SC se deberán tener en cuenta las capacidades que estos tienen (cuantitativas y cualitativas) para de esta forma definir cuáles serán seleccionados y como será el flujo entre estos, para ello se definirá cada arco origen destino y la magnitud del flujo que se movilizará a traves de dicho arco. En esta decisión deberá también considerarse el transporte disponible (capacidad cuantitativa y sistema de refrigeración) y/o el transporte requerido principalmente para los caos en los que se subcontrate el transporte de acuerdo a los requerimientos de los flujos.

Tabla IX, la

Relación **entre capacidades logísticas y sostenibilidad**

Para la sostenibilidad se tiene en consideración las tres dimensiones: la ambiental abordada desde las emisiones de CO2 y la huella hídrica, la social desde las perdidas de alimentos (seguridad alimentaria) y la tasa de empleo y la social desde los costos asociados a la cadena. En la matriz se muestra la relación de cada uno de estos aspectos con las capacidades abordadas anteriormente.

La diferencia entre la capacidad disponible y la capacidad requerida, puede generar por un lado capacidades ociosas tanto en transporte como en almacenamiento que son traducidas a el aumento de los costos asociados a la cadena y en el caso del transporte emisiones de CO2 innecesarias y por el otro lado el déficit de capacidad en ambas actividades genera que se opten por costumbres inadecuadas en relación al exceso de producto por empaque o en el transporte, sobre apilamiento de producto y mezcla de productos incompatibles que al final se traducen en el deterioro del producto y por ende el aumento de las perdidas de alimento lo largo de la cadena, estas perdidas tienen una fuerte conexión con la huella hídrica que se genera, ya que cada producto tiene asociada un consumo de agua desde el origen hasta el destino (agua utilizada para el cultivo, para el lavado del producto, para la elaboración y limpieza de los empaques, para la limpieza d ellos vehículos en los que se transporta, para el funcionamiento de las infraestructuras por donde pasa, entre otros), a medida que el producto va mas aguas abajo mayor es su huella hídrica asociada, por consiguiente la pérdida del producto no solo genera efectos en la sostenibilidad social sino también en la ambiental por el consumo de agua “innecesario” en un producto que finalmente no fue consumido sino por el contrario pasa a ser desperdicio el cual entre muchas otras cosas debe ser tratado para no generar contaminación.

Por otro lado se evidencia que las capacidades cualitativas asociadas a los sistemas de refrigeración utilizados tanto en almacenamiento como en trasporte y la selección del tipo de empaque a utilizar se relacionan principalmente con la huella hídrica, la perdida de alimentos y los costos de la cadena, dicha relación se debe principalmente a que estas dos capacidades cualitativas permiten prolongar la vida útil del alimento ya que ayudan a la conservación de este, por consiguiente reducen las pérdidas de alimentos y de manera indirecta la huella hídrica asociada a la cadena (por perdidas), de igual forma se evidencia que la selección e empaques

amigables con el medio ambiente también ayuda a reducir dicha huella. Vale la pena precisar que esta relación se cumple siempre y cuando se respete el hecho de que una vez se inicia la cadena de frio esta no puede ser interrumpida y que en la selección del empaque se tenga en cuenta las características específicas de cada producto y el impacto de dicho empaque en el medio ambiente.

Tabla X y en la Tabla XI.

La configuración de la SCA implica una serie de decisiones a nivel estratégico que resultan decisivas con relación al funcionamiento y eficiencia de esta, siendo uno de los aspectos mas trascendentales a evaluar. De acuerdo con la revisión de la literatura realizada se encontraron decisiones de configuración relacionadas a las características de las infraestructuras físicas (almacenamiento), decisiones sobre las condiciones y cantidades a movilizar entre los diferentes nodos de la SC (transporte) y decisiones sobre los actores que van a participar en la configuración principalmente con relación a los proveedores (capacidad productiva). Por el lado de las Capacidades logísticas se aborda capacidades cuantitativas (disponible, requerida y máxima) y cualitativas (sistemas de refrigeración y empaques) tanto para almacenamiento como para trasporte.

- Relación entre la configuración de la SC y las capacidades logísticas

En el contexto de las FSC la selección adecuada de proveedores resulta una decisión determinante dadas las condiciones de perecibilidad que tienen los alimentos, en estos contextos más que en cualquier otro es indispensable determinar lo más exacto posible la oferta que se requiere (capacidad requerida) para el funcionamiento de la cadena, ya que una estimación por debajo de lo requerido puede llevar a la no disponibilidad de alimentos poniendo en riesgo la seguridad alimentaria, pero una estimación por encima generará perdida de cosecha por sobreproducción y una disminución del precio por el alto volumen ofertado lo que en casos extremos puede llevar a la generación de perdidas para el productor. En tal sentido se requiere una coordinación aguas arriba y aguas debajo de la SC para que exista lo más cercano a un equilibrio entre la capacidad requerida y la capacidad disponible que tienen los proveedores, frente a este comportamiento el proveedor deberá hacer las respectivas estimaciones a largo plazo en caso de decidir ampliar su capacidad, por lo que deberá tener en cuenta las dinámicas del mercado a la hora de determinar esta nueva capacidad máxima y dentro de esta decisión se deberá considerar aspectos como la cercanía a los demás nodos para reducir tiempos de transporte y por ende los riesgos de perdida de alimento. Finalmente, a la hora de seleccionar un proveedor también se deberá considerar el empaque utilizado ya que en este se hará el primer transporte y como se ha mencionado influye en la conservación del producto.

En relación con las decisiones de modificación de la capacidad de almacenamiento en los diferentes nodos de la SC, se puede dar mediante la ampliación de capacidad de una infraestructura ya existente, cierre de instalaciones, apertura de nuevas instalaciones o modificaciones en el sistema de conservación utilizado, dichas decisiones están estrictamente relacionadas con las capacidades, ya que la capacidad requerida y la disponible son los parámetros base para la toma de decisiones, la diferencia entre estas dos definirá si hay capacidades ociosas que están generando costos adicionales y por ende se deberá hacer el cierre de estas o por el contrario si hay déficit de capacidad y se debe optar por la apertura de nuevas instalaciones o ampliación de las existentes, en estas dos ultimas opciones se determina la capacidad máxima que se tendrá ya sea para la nueva o para la antigua modificada, también se deber considerar en estos tipos de modificaciones los sistemas de refrigeración a utilizar.

Con relación a las decisiones de configuración frente al transporte de alimentos se destaca la asignación origen destino y la magnitud que cada uno de estos flujos, de acuerdo con estos y las características de los productos

se deberá definir el tipo de transporte a utilizar. Una vez se definan cada uno de los posibles actores a participar en la configuración de la SC se deberán tener en cuenta las capacidades que estos tienen (cuantitativas y cualitativas) para de esta forma definir cuáles serán seleccionados y como será el flujo entre estos, para ello se definirá cada arco origen destino y la magnitud del flujo que se movilizará a traves de dicho arco. En esta decisión deberá también considerarse el transporte disponible (capacidad cuantitativa y sistema de refrigeración) y/o el transporte requerido principalmente para los caos en los que se subcontrate el transporte de acuerdo a los requerimientos de los flujos.

Tabla IX Resultados de la matriz 1 (configuración y capacidades logísticas)

	Cap. Disponible	**Cap. Requerida**	**Cap. Máxima nueva instalación**	**Sistema de refrigeración**	**Empaques**
Selección de proveedores (cap. Productiva)	Cantidad de producto ofertada, dependerá si se es un contexto de déficit o de sobreproducción, de acuerdo con dicha disponibilidad se deberán tomar acciones sobre la configuración de la cadena para satisfacer la demanda de la manera más eficiente.	Dependiendo de las condiciones de los agricultores seleccionados (ubicación, clima, acceso por carretera) los nodos relacionados con estos o los mismos agricultores deberán contar con determinada capacidad de transporte para poder sacar los productos de la zona de cultivo, dicho transporte puede requerir tecnologías especiales.	Para la apertura de una nueva instalación se debe considerar su ubicación en relación con la de los demás nodos, incluidos sus proveedores, ya que el exceso en tiempos de transporte puede causar daños en los alimentos y aumento en los costos.	Si los procesos logísticos se van a realizar con cadena de frio todos los eslabones deben garantizar preservar dicha condición, contando con las capacidades cualitativas de almacenamiento y transporte necesarias, por tal motivo la disponibilidad de dicha tecnología debe ser considerada a la hora de seleccionar proveedores.	El proveedor seleccionado será el primer eslabón en determinar el tipo de empaque a utilizar, esta decisión será decisiva para el mantenimiento del alimento en optimas condiciones, ya que un mal empaque puede aumentar los riesgos de perdidas.
Ampliación capacidad propia de almacenamiento	La ampliación de la capacidad propia de almacenamiento implica el aumento de la capacidad disponible en el siguiente periodo	La ampliación de capacidad se da cuando la capacidad disponible no satisface la requerida, se debe tener cuidado de no llegar a tener capacidades ociosas, ya que generaría ineficiencias y sobrecostos en la cadena.		En la ampliación de la capacidad se puede considerar la inclusión o mejora de los sistemas de refrigeración en la instalación, dependiendo de las necesidades de la FSC	
Cierre de un Centro de acopio (CA) o de un Centro de distribución (CD)	El cierre de un CD o un CA implica la reducción de la capacidad total disponible de dicho eslabón si dicha instalación no es reubicada en otro sitio.	Se debe tener cuidado de que las decisiones relacionadas a cierre de instalaciones no llevo a déficit de capacidad de almacenamiento, generando perdidas de alimentos por falta de almacenamiento bajo las condiciones necesarias.		Evitar el cierre de instalaciones que ya cuenten con sistema de refrigeración ya que el costo de implementación de estos es alto y sería una inversión desperdiciada	
Apertura de un Centro de acopio (CA) o de un Centro de distribución (CD)	La apertura de un CA o un CD implica el aumento de la capacidad total disponible de dicho eslabón	La apertura de un nuevo CD o un DA se da cuando la capacidad disponible no satisface la requerida, se debe tener cuidado de no llegar a excesos de capacidad	Al considerar la apertura de una nueva instalación se debe tener en cuenta la capacidad máxima de las instalaciones potenciales, para seleccionar la más adecuada para la FSC	En la apertura de una nueva instalación se puede considerar la inclusión de sistemas de refrigeración, dependiendo de las necesidades de la FSC	
Selección metodo de conservación	Para efectos operativos la selección de métodos de conservación está sujeta a la capacidad disponible, la cual no implica que sea la adecuada, en caso de requerir modificaciones en la capacidad actual dicho aspecto deberá ser considerado en la toma de decisiones estratégicas.	La capacidad requerida hace referencia a la capacidad cuantitativa y a la cualitativa en la que se incluye los métodos de conservación necesarios de acuerdo con la FSC		Los sistemas de refrigeración son un metodo de conservación que busca preservar las propiedades del alimento mediante el control de temperatura	Los empaques también son considerados un metodo de conservación de alimentos, ya que un empaque adecuado protege y alarga la vida útil al aislarlos de la contaminación exterior, conserva la calidad, mantiene la frescura, reduce la posibilidad de deterioro, preserva la forma y la textura,

					prolonga el tiempo de almacenamiento, regula la humedad de los alimentos, entre otros
Cantidad a transportar	La cantidad a transportar debe estar relacionada con la capacidad de almacenamiento disponible en el nodo de destino, para evitar que el producto llegue y no tenga donde ser almacenado. Se debe considerar la capacidad de transporte que tiene cada actor como limitante de los flujos que se establezcan.	Si lo flujos que se asignan a un destino son superiores a la capacidad de transporte o almacenamiento actual, se traducirá una nueva capacidad requerida (aumento de capacidad).	Aplica cuando los flujos asignados a un destino supera su capacidad disponible y no se opta por la ampliación de la infraestructura actual sino por la apertura de una nueva instalación.	El uso de sistemas de refrigeración ayuda a preservar las propiedades del alimento sobre todo cuando las cantidades a transportar son altas	Se deberán respetar las limitaciones de capacidad de los empaques a la hora de transportar, ya que un exceso de producto durante el transporte reduce los beneficios del empaque.
Asignación origen destino	Para la asignación origen destino se debe considerar la capacidad cuantitativa y cualitativa de cada nodo		Si se abre una nueva instalación esta deberá ser considerada entre los orígenes o destinos de la configuración de la SC	Si el origen y el destino están en pisos térmicos diferentes, el sistema de refrigeración ayuda a preservar el alimento por más tiempo y en mejores condiciones	
Selección tipo y medio de transporte	A nivel operativo el medio de transporte a utilizar depende de la capacidad de transporte disponible que tiene cada eslabón, sin embargo, a largo plazo se deberán tomar decisiones sobre dicha capacidad para que se ajuste a las necesidades de la SC.			En la selección del tipo de transporte se considera el uso de sistemas de refrigeración en los camiones	Se deberán analizar los empaques utilizados frente a los medios de transporte seleccionados, para garantizar una correcta acomodación de estos para la conservación de los alimentos pero también un buen uso del espacio disponible.

- Relación entre capacidades logísticas y sostenibilidad

Para la sostenibilidad se tiene en consideración las tres dimensiones: la ambiental abordada desde las emisiones de CO2 y la huella hídrica, la social desde las perdidas de alimentos (seguridad alimentaria) y la tasa de empleo y la social desde los costos asociados a la cadena. En la matriz se muestra la relación de cada uno de estos aspectos con las capacidades abordadas anteriormente.

La diferencia entre la capacidad disponible y la capacidad requerida, puede generar por un lado capacidades ociosas tanto en transporte como en almacenamiento que son traducidas a el aumento de los costos asociados a la cadena y en el caso del transporte emisiones de CO2 innecesarias y por el otro lado el déficit de capacidad en ambas actividades genera que se opten por costumbres inadecuadas en relación al exceso de producto por empaque o en el transporte, sobre apilamiento de producto y mezcla de productos incompatibles que al final se traducen en el deterioro del producto y por ende el aumento de las perdidas de alimento lo largo de la cadena, estas perdidas tienen una fuerte conexión con la huella hídrica que se genera, ya que cada producto tiene asociada un consumo de agua desde el origen hasta el destino (agua utilizada para el cultivo, para el lavado del producto, para la elaboración y limpieza de los empaques, para la limpieza d ellos vehículos en los que se transporta, para el funcionamiento de las infraestructuras por donde pasa, entre otros), a medida que el producto va mas aguas abajo mayor es su huella hídrica asociada, por consiguiente la pérdida del producto no solo genera efectos en la sostenibilidad social sino también en la ambiental por el consumo de agua “innecesario” en un producto que finalmente no fue consumido sino por el contrario pasa a ser desperdicio el cual entre muchas otras cosas debe ser tratado para no generar contaminación.

Por otro lado se evidencia que las capacidades cualitativas asociadas a los sistemas de refrigeración utilizados tanto en almacenamiento como en trasporte y la selección del tipo de empaque a utilizar se relacionan principalmente con la huella hídrica, la perdida de alimentos y los costos de la cadena, dicha relación se debe principalmente a que estas dos capacidades cualitativas permiten prolongar la vida útil del alimento ya que ayudan a la conservación de este, por consiguiente reducen las pérdidas de alimentos y de manera indirecta la huella hídrica asociada a la cadena (por perdidas), de igual forma se evidencia que la selección e empaques amigables con el medio ambiente también ayuda a reducir dicha huella. Vale la pena precisar que esta relación se cumple siempre y cuando se respete el hecho de que una vez se inicia la cadena de frio esta no puede ser interrumpida y que en la selección del empaque se tenga en cuenta las características específicas de cada producto y el impacto de dicho empaque en el medio ambiente.

Tabla X. Resultados de la matriz 2 (capacidades logísticas y sostenibilidad)

	Emisiones	Agua	Perdidas de alimentos	Tasa de empleo	Costos
Cap. Disponible	Si la capacidad de transporte disponible es inferior a la requerida se deban aumentar el número de viajes, aumentando las emisiones de CO_2		Tener déficit de capacidad de almacenamiento aumenta las pérdidas de alimentos, ya que se aumentan los daños por compresión, de manera similar si la capacidad de transporte es deficitaria aumenta el riesgo de perdidas en transporte.		Si existe déficit de capacidad se producirá mayor pérdida de alimentos, aumentado el costo por perdidas. En los primeros eslabones no se suele contar con capacidad de transporte por lo que se debe recurrir a la intermediación de terceros que transportan altos volúmenes a menores costos, sin embargo, esta intermediación hace que el costo del producto aumente
Cap. Requerida	A mayor capacidad de transporte requerida, mayor cantidad de CO_2			Involucrar la mayor cantidad de agricultores, aumenta la tasa de empleo de dicho eslabón y genera que la capacidad requerida de almacenamiento y transporte sea mayor	
Cap. Máxima nueva instalación		La apertura de una nueva instalación involucra en aumento de la huella hídrica generada por dicho eslabón en relación con el agua requerida para el funcionamiento de este	El aumento en la capacidad disponible generada por la apertura de la nueva instalación reduce las pérdidas de alimentos por compresión, pero puede aumentar las perdidas por almacenamiento prolongado	La apertura de nuevas instalaciones involucra la contratación de mano de obra adicional para atender dichas instalaciones.	Costo apertura nueva instalación
Sistema de refrigeración		El uso de sistemas como el Hidroenfriamiento, enfriamiento evaporativo o enfriamiento por contacto con hielo genera consumo de agua, aumentado la huella azul	El uso de sistemas de refrigeración disminuye en riesgo de perdidas, ya que una temperatura controlada preserva las condiciones de los alimentos y alarga la vida útil de estos. Se debe enfatizar que una vez se inicia la cadena de frio esta no deberá ser modificada.		Costo de instalación, costo de funcionamiento
Empaques	En la selección del empaque también se deberá considerar los efectos al medio ambiente a la hora de producirlos y mantenerlos (lavado, reutilización, etc)		La selección del empaque adecuado reduce los riegos de perdidas tanto en el almacenamiento como en el transporte		Se deberá tener un equilibrio entre el empaque adecuado y los costos de dicha selección.

- Relación entre la configuración de la SC y sostenibilidad

Finamente se realizó el análisis de relación entre las decisiones de configuración y la sostenibilidad, en relación a la capacidad productiva de los proveedores se hallaron varios aspectos por ejemplo es fundamental tener entre los criterios de selección de un proveedor la ubicación de este, no solamente por los tiempo de entrega y los costos asociados al transporte sino también porque a mayor distancia recorrida mayor riesgo de pérdida de alimento y por otro lado mayor emisiones de CO2 en vehículos normales, como los usados en Colombia.

Respecto a las decisiones relacionadas con el almacenamiento se destaca principalmente los costos asociados a cada una de estas decisiones en específico en relación al uso de e sistemas de refrigeración el cual va a representar una inversión importante para el actor que decida implementarlo, por otro lado, se deberá tener mucho cuidado de no caer en capacidades ociosas o en déficit de capacidad para así evitar las perdidas ya se por compresión o por almacenamiento prolongado en otros casos, se destaca la importancia de considerar sistemas de refrigeración en las instalaciones de los diferentes eslabones, principalmente cuando algún eslabón los utiliza ya que se pretende mantener esta cadena de frio a lo largo de la SC. Por último se encuentra una fuerte relación entre las diferentes decisiones de transporte y aspectos como emisiones de CO2 y perdida de alimento, también se debe considerar los costos asociados a dicha actividad ya que suelen ser unos de los mas costosos de las FSC.

Tabla XI. Resultados de la matriz 3 (configuración y sostenibilidad)

	Emisiones	**Agua**	**Perdidas de alimentos**	**Tasa de empleo**	**Costos**
Selección de proveedores (cap. Productiva)	La selección de proveedores ubicados a una gran distancia de los demás eslabones involucra una mayor cantidad de emisiones de CO2 en transporte	Seleccionar proveedores con una huella hídrica baja (Uso de tecnología para el ahorro de agua en el proceso de cultivo	El déficit de capacidad de almacenamiento genera almacenamiento en condiciones inadecuadas lo que puede llevar a reducir su vida útil y aumentar las pérdidas de alimentos	La selección de la mayor cantidad de productores aumenta la tasa de empleo de dicho eslabón, garantizando un ingreso monetario. Cumplir la demanda de la mayor cantidad de tenderos, garantiza que puedan comercializar los productos y así tener un ingreso monetario.	
Ampliación cap. Propia de almacenamiento		La ampliación de la capacidad actual involucra en aumento de la huella hídrica generada por dicho eslabón con relación al agua requerida para el funcionamiento de este	El aumento de cap. de almacenamiento puede llevar a el aumento de los días que el producto esta almacenado si la rotación no es alta, aumentando las perdidas por almacenamiento prolongado	Un aumento de la capacidad podría estar relacionado con el aumento de la mano de obra que trabaja en dicha instalación, sin embargo, es una opción no aplica para todos los casos.	Costos modificación de capacidad Costo de almacenamiento
Cierre de un Centro de distribución o de acopio	El cierre y no reubicación de una instalación genera cambios en la red de distribución lo que puede aumentar las distancias recorridas y por ende las emisiones de CO2 en transporte	Puede involucrar la disminución de la huella hídrica generada por dicho eslabón con relación al agua requerida para el funcionamiento de este	Garantizar que no se produzca déficit de capacidad, para evitar el almacenamiento inadecuado de productos y por ende el aumento en las pérdidas de alimentos	El cierre de una infraestructura esta relacionada con la reducción de la mano de obra contratada en determinado eslabón.	Reducción costos de funcionamiento del eslabón Revisar costos involucrados al cierre de la infraestructura
Apertura de un Centro de distribución o de acopio	La apertura de una nueva instalación genera cambios en la red de distribución lo que puede aumentar las distancias recorridas y por ende las emisiones de CO2 en transporte	La apertura de una nueva instalación involucra en aumento de la huella hídrica generada por dicho eslabón con relación al agua requerida para el funcionamiento de este	A mayor capacidad de almacenamiento menores perdidas por compresión o apilamiento, evitar el almacenamiento prolongado	La apertura de nuevas instalaciones involucra la contratación de mano de obra adicional para atender dichas instalaciones.	Costo de apertura Costo de almacenamiento
Selección metodo de conservación	Los sistemas de refrigeración convencionales generan emisiones de CO2	El uso de sistemas como el Hidroenfriamiento, enfriamiento evaporativo o enfriamiento por contacto con hielo genera consumo de agua, aumentado la huella azul	El uso de métodos de conservación reduce las pérdidas de alimentos por cambios en temperatura y humedad		Costo de instalación, costo de funcionamiento

Cantidad a transportar	La magnitud de los flujos, el tipo de transporte y la capacidad de transporte disponible definirá la cantidad de viajes que se requiere realizar	El número y tamaño de los vehículos a utilizar , influye en la huella hídrica generada por la limpieza de los vehículos.	El exceso de productos transportados puede aumentar las perdidas por apilamiento y compresión, además se aumenta la temperatura y humedad de la carga aumentando las pérdidas de alimentos	Mayor cantidad de alimentos distribuidos implica mayor cobertura de la demanda, por ende, se garantiza que los minoristas puedan comercializar los productos	Costo de transporte
Asignación origen destino	El transporte a destino demasiado distanciados aumenta las emisiones de CO2 en transporte		El transporte a destinos demasiado distanciados aumenta el tiempo e transporte y por ende el riesgo e perdida de alimentos		Costo de transporte
Selección tipo y medio de transporte	Selección de medios de transporte con menores emisiones de CO2		El uso de tipos de transporte con sistema de refrigeración reduce la perdida de alimentos		Costo de transporte

4. MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS PERECEDEROS (CAPACIDADES LOGÍSTICAS Y SOSTENIBILIDAD)

Con base a la revisión de la literatura realizada, a los resultados encontrados en el capítulo anterior y de acuerdo con los objetivos planteados para la investigación se hace el planteamiento de un modelo de optimización enfocado en la configuración de la cadena principalmente en la definición de capacidades, con base a unas medidas de desempeño enfocadas en la sostenibilidad. Para el desarrollo de este modelo se toma como base la tesis doctoral de (Orjuela Castro, 2018) en la cual se plantea un modelo para el diseño de la configuración de la PFSC, específicamente para la localización de instalaciones; en dicho modelo se busca reducir las pérdidas de alimento, minimizar el tiempo promedio estimado de servicio y maximizar el numero clientes atendidos. Para esta investigación se toma como base el modelo planteado por (Orjuela Castro, 2018) y se le da un enfoque de sostenibilidad desde sus tres dimensiones, además se enfatiza no solo en la localización de instalaciones sino también en la definición de capacidades tanto cuantitativas como cualitativas para dichas instalaciones. m

La formulación que se presenta a continuación comprende la definición de los conjuntos, parámetros, variables de decisión, funciones objetivo, restricciones (balance de flujo, capacidad y demanda) y los tipos de variables requeridos. A continuación, se presentan los componentes fundamentales de la formulación:

Conjuntos

I $= Zonas\ de\ producción\ agricola, indice\ i$
$J = Posibles\ zonas\ de\ ubicación\ de\ las\ centrales\ de\ acopio, indice\ j$
$K = Posibles\ zonas\ de\ ubicación\ de\ las\ centrales\ mayoristas, indice\ k$
$F = Tipos\ de\ alimentos\ perecederos, indice\ f$
$P = Plazas\ de\ mercado, indice\ p$
$T = Tiendas\ consolidadas, indice\ t$
$H = Hipermercados, indice\ h$
$C = Centrosde\ transfomación\ productiva, indice\ p$
S $= Sistemas\ de\ conservación\ , indice\ s$
E = Tipos de empaque, indice e
N $= Niveles\ de\ capacidad\ ,\ \ indice\ n$

$OT = conjunto\ de\ todos\ los\ posibles\ origenes, indice\ o\ , OT = (I \cup J \cup K)$
$DT = conjunto\ de\ todos\ los\ posibles\ destinos, indice\ d, DT = (J \cup K \cup P \cup T \cup H \cup C)$
$DF = Conjunto\ de\ los\ destinos\ finales, indice\ d2, DF = (P \cup T \cup H \cup C)$

$FDT\{d\} = Conjunto\ de\ tipos\ de\ alimento\ perecedero\ que\ puede\ recibir\ el\ destino\ d \in DT$
$FDF\{d2\} = Conjunto\ de\ tipos\ de\ alimento\ perecedero\ que\ demanda\ el\ destino\ d2 \in DF$
$DTF\{f\} = Conjunto\ de\ destinos\ d \in DT\ que\ puede\ recibir\ el\ alimento\ perecedero\ f\ \in F$
$FOT\{o\} = Conjunto\ de\ tipos\ de\ alimentos\ perecederos\ que\ puede\ enviar\ el\ origen\ o\ \in\ OT$
$OTF\{f\} = Conjunto\ de\ origenes\ o \in OT\ que\ puede\ enviar\ el\ de\ tipo\ de\ alimentos\ perecederos\ f\ \in F$
$DTOT\{o\} = Posible\ destinos\ \ d \in DT\ \ a\ los\ que\ el\ origen\ o\ \in\ OT\ puede\ hacer\ envios$
$OTDT\{d\} = Posibles\ origenes\ o \in\ OT\ que\ pueden\ hacer\ envios\ al\ Destinos\ \ d\ \in\ DT$
$EFO\{f, o\} = Tipo\ de\ empaque\ e\ disponibles\ para\ el\ producto\ f\ \in F, en\ el\ origen\ o\ \in OT$
$SO\{o\} = Sistemas\ de\ conservacion\ \ s\ disponibles\ en\ el\ origen\ o \in OT$
$SD\{d\} = Sistemas\ de\ conservacion\ \ s\ \in S\ disponibles\ en\ el\ destino\ d \in DT$
$DS\{s\} = Destinos\ d \in DT\ que\ tienen\ los\ sistemas\ de\ conservacion\ \ s \in S$
$NOS\{o, s\} = Niveles\ de\ capacidad\ n\ disponibles\ en\ el\ origen\ o \in OT\ con\ sistema\ de\ conservacion\ s$

Parámetros:

$OFI_{if} = Cantidad\ producida\ del\ tipo\ de\ alimento\ perecedero\ f\ \ en\ \ la\ zona\ \ producción\ agricola\ i$
CX_{jsn}
$= Costo\ fijo\ de\ la\ central\ de\ acopio\ ubicada\ en\ j, con\ el\ sistema\ de\ s, en\ el\ nivel\ de\ capacidad\ n$
$CY_{ksn} = Costo\ fijo\ de\ la\ central\ mayorista\ ubicada\ en\ k, con\ el\ sistema\ de\ s, nivel\ de\ capacidad\ n$
$CT_{od} = Costo\ de\ transportar\ del\ origen\ o\ \in\ OT\ \ al\ destino \in DTOT\{o\}$

CAM_{jsn}
$= Capacidad\ máxima\ del\ centro\ de\ acopio\ ubicado\ en\ la\ zona\ j\ con\ elsistema\ de\ refrigeracion\ s$
$y\ \ el\ nivel\ de\ capacidad\ n$
CAL_{jsn}
$=\ Capacidad\ mínima\ del\ centro\ de\ acopio\ ubicado\ en\ la\ zona\ j\ con\ el\ sistema\ de\ refrigeracion\ s$
$y\ el\ niv\ el\ de\ capacidad\ n$
CTM_{ksn}
$= Capacidad\ máxima\ del\ centro\ mayorista\ ubicado\ en\ la\ zona\ k\ con\ elvsistema\ de\ refrigeracion\ s$

y el nivel de capacidad n

CTL_{ksn}

$=$ Capacidad mínima del centro mayorista ubicado en la zona k con el sistema de refrigeracion s y el nivel de capacidad n

$\alpha i_{d2f} =$ Porcentaje de demanda que el destino final $d \in DF$ tiene del tipo de alimento perecedero $f \in FDF\{d2\}$ para las zonas de produccion agricola

$\alpha j_{d2f} =$ Porcentaje de demanda que el destino final $d \in DF$ tiene del tipo de alimento perecedero $f \in FDF\{d2\}$ para las centrales de acopio

$\alpha k_{d2f} =$ Porcentaje de demanda que el destino final $d \in DF$ tiene del tipo de alimento perecedero $f \in FDF\{d2\}$ para las centrales mayoristas

$DN_{d2f} =$ Demanda que tiene el destino final $d2 \in DF$, del tipo de alimento perecedero $f \in FDF\{d2\}$

$DNT_{d2} = \sum_{f \in FDF\{d2\}} DN_{fd2} =$ Demanda total en el cliente $d2 \in DF$

β_{ofs}

$=$ Porcentaje de desperdicio que se genera por el almacenamiento del tipo de alimento perecedero $f \in FOT\{o\}$ en el origen $o \in J \cap K$ bajo el sistema de conservación s

$\rho_{d2f} =$ Porcentaje de desperdicio del tipo de alimento perecedero $f \in FDF\{d2\}$ por almacenamiento en el del destino $d2 \in DF$

$DIN_{od} =$ Distancia entre el origen $o \in OT$ y el destino $d \in DTOT\{o\}$

$TN_{odfs} =$ Porcentaje de perdida por cambio de temperatura en el trayecto del origen $o \in OT$, al destino $d \in DTOT\{o\}$ de la fruta f cuando el origen tiene sistema de conservación $s \in SO\{o\} \in OT$

HN_{odfs}

$=$ Porcentaje de perdida por cambio de humedad relativa en el trayecto del origen o OT, al destino $d \in DTOT\{o\}$ de la fruta f cuando el origen tiene sistema de conservación $s \in SO\{o\} \in OT$

$PE_{odfe} =$ Porcentaje de perdida en el trayecto del origen $o \in OT$ al destino $d \in DTOT\{o\}$ de la fruta f asociado al tipo de empaque e que se esta utilizando

$\gamma d2_{d2f} =$ Porcentaje de demanda mínima de la fruta $f \in FDF\{d2\}$ que debe recibir del cliente $d2 \in DF$ en caso de ser atendido

$PR_f =$ Costo promedio de la fruta f $\left(\$/_{ton}\right)$

$AG_f =$ Cantidad de agua gastada en el proceso de cultivo de la fruta f

$AGP_f = \frac{\sum_{i \in (OTF\{f\} \cap I)} OFI_{if} * AG_f}{\sum_{i \in (OTF\{f\} \cap I)} OFI_{if}}$

$=$ Cantidad de agua promedio gastada en el proceso de cultivo de la fruta f

$TF_{fe} =$ Cantidad de fruta f que cabe en el empaque e

$NU_e =$ Número de veces que se puede emplear el empaque e

$AGE_e =$ Cantidad de agua empleada en la realización del empaque e

$AGL_e =$ Cantidad de agua empleada en la limpieza del empaque e

$AGV_{od} =$

Cantidad de agua empleada en un vehículo para la limpieza y el gasto de agua en el tramo del origen al destino

CHV_{odef}

$=$ Cantidad máxima de empaques tipo e con fruta tipo f que se pueden trasnportar en un vehículo en el tramo del origen O al destino D

$AGY_{jsn=}$

$=$ Cantidad de agua empleada en la operación del centro mayoristas k con el sistema de conservacion s en el nivel

Variables de decisión

Variables de Apertura

$$X_{jsn=}\left\{\begin{matrix}1\ Si\ se\ abre\ una\ central\ de\ acopio\ en\ la\ zona\ j, con\ el\ sistema\ de\ conservación\ s, en\ el\ nivel\ de\ capacidad\ n\\ 0\quad En\ caso\ contrario\end{matrix}\right\}$$

$$Y_{ksn} = \left\{\begin{matrix}1\quad Si\ se\ abre\ la\ central\ mayorista\ en\ la\ zona\ k, con\ el\ sistema\ de\ conservación\ s, en\ el\ nivel\ de\ capacidad\ n\\ 0\quad En\ caso\ contrario\end{matrix}\right\}$$

Variables de Flujo

$$WN_{odfes} = Cantidad\ \ a\ enviar\ desde\ el\ origen\ o\ al\ destino\ d, del\ tipo\ de\ alimento\ perecedero\ f,\ en\ el\ sistema\ de\ empaque\ e, cuando\ el\ origen\ o\ tiene\ el\ \ sistema\ de\ consevación\ s,\quad \forall\ o \in OT,\ \ \forall\ \ d \in DTOT\{o\}, \forall\ f \in FOT\{o\} \cap FDT\{d\}\ , \forall\ e \in EFO\{f, o\}, s\ \in\ SO\{o\}$$

$$BPD2_{d2} = \left\{\begin{matrix}1\quad Si\ se\ \text{atiende el cliente final}\ d2 \in\ DF\\ 0\quad En\ caso\ contrario\end{matrix}\right\}$$

Función Objetivo

$$\textbf{Minimizar Z} = \ \boldsymbol{F(OBJ1, -OBJ2, OBJ3)}$$

Minimización de la huella hídrica.

$$OBJ1 = MIN\ Z1 = APE + APMC + AE1 + AV1 + AV2 + AJ + AK\ (1) \qquad \textbf{\textit{(E1)}}$$

$$APE = \sum_{z\in(J\cup K\cup DF)} \sum_{o\in OTDT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{z\}\cap FOT\{o\})} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{ozfes}\left(TN_{ozfs} + H_{ozfs} + PE_{ozfe}\right) * AG_{if}$$

$$APMC = \sum_{z\in(J\cup K)} \sum_{d\in DTOT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{d\}\cap FOT\{z\}} \sum_{e\in EFO\{f,z\}} \sum_{s\in SO\{z\}} WN_{zdfes} * \left(\beta_{zfs}\right) * AGP_f$$

$$AE1 = \sum_{z\in(J\cup K)} \sum_{o\in OTDT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{z\}\cap FOT\{o\}} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in SO\{o\}} \frac{WN_{ozfes}}{TF_{fe} * NU_e} * \left(AGE_e + AGL_e * (NU_e - 1)\right)$$

$$AE2 = \sum_{z\in(J\cup K)} \sum_{d\in DTOT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{d\}\cap FOT\{z\}} \sum_{e\in EFO\{f,z\}} \sum_{s\in SO\{z\}} \frac{WN_{zdfes}}{TF_{fe} * NU_e} * \left(AGE_e + AGL_e * (NU_e - 1)\right)$$

$$AV1 = \sum_{z\in(J\cup K)} \sum_{o\in OTDT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{z\}\cap FOT\{o\}} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in SO\{o\}} \frac{WN_{ozfes}}{TF_{fe} * CHV_{oze}} * (AGV_{oz})$$

$$AV2 = \sum_{z\in(J\cup K)} \sum_{d\in DTOT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{d\}\cap FOT\{z\}} \sum_{e\in EFO\{f,z\}} \sum_{s\in SO\{z\}} \frac{WN_{zdfes}}{TF_{fe} * CHV_{zde}} * (AGV_{zd})$$

$$AJ = \sum_{j\in J} \sum_{s\in SO\{j\}} \sum_{n\in NOS\{j,s\}} X_{jsn} * AGX_{jsn}$$

$$AK = \sum_{k\in K} \sum_{s\in SO\{k\}} \sum_{n\in NOS\{k,s\}} Y_{ksn} * AGY_{ksn}$$

Maximizar el número de clientes atendidos en el proceso

$$OBJ2 = MAX\ Z2 = \sum_{d2\in DF} BPD2_{d2} \qquad \textbf{(E2)}$$

Minimización del costo

$$OBJ3 = MIN\ Z3 = CTR + CI + CPT + CPI \qquad \textbf{(E3)}$$

$$CTR = \sum_{o\in OT} \sum_{d\in DTOT[o]} \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{d\})} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{odfes} * CT_{odfe} * DIN_{od}$$

$$CI = \sum_{j\in J} \sum_{s\in SO\{j\}} \sum_{n\in NOS\{j,s\}} X_{jsn} * CX_{jsn} + \sum_{k\in K} \sum_{s\in SO\{k\}} \sum_{n\in NOS\{k,s\}} Y_{ksn} * CY_{ksn}$$

$$CPT = \sum_{z\in(J\cup K\cup DF)} \sum_{o\in OTDT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{z\}\cap FOT\{o\})} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{ozfes}\left(TN_{ozfs} + H_{ozfs} + PE_{ozfe}\right) * PR_f$$

$$CPI = \sum_{z\in(J\cup K)} \sum_{d\in DTOT\{z\}} \sum_{f\in (FDT\{d\}\cap FOT\{z\}} \sum_{e\in EFO\{f,z\}} \sum_{s\in SO\{z\}} WN_{zdfes} * \left(\beta_{zfs}\right) * PR_f$$

Restricciones

Balance de flujo en las zonas de producción

Teniendo en cuenta que el modelo se desarrolla en un contexto de déficit se establece que todo el producto disponible debe ser despachado bajo las condiciones que se definan, para así tener el mayor aprovechamiento posible de la oferta disponible. ***(E4)***

$$\boldsymbol{OFI_{if}} = \sum_{\boldsymbol{d\in(DTF\{f\}\cap DTOT\{i\})}} \sum_{\boldsymbol{e\in EFO\{f,i\}}} \sum_{\boldsymbol{s\in SO\{i\}}} \boldsymbol{WN_{idfes}} \qquad \forall\, \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{I}, \forall\, \boldsymbol{f} \in \boldsymbol{FOT\{i\}}$$

Balance de flujo en las centrales de acopio y las centrales mayorista

$$\sum_{o\in(OTF\{f\}\cap OTDT\{z\})}\ \sum_{e\in EFO\{f,o\}}\ \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{ozfes}*\left(1-TN_{ozfs}-HN_{ozfs}-PE_{ozfe}\right) = \sum_{d\in(DTF\{f\}\cap DTOT\{z\})}\ \sum_{e\in EFO\{f,z\}}\ \sum_{s\in SO\{z\}} WN_{zdfes}*\left(1+\beta_{zfs}\right) \quad \forall z\in(J\cup K),\forall f \in (FDT\{z\}\cap FOT\{z\}) \qquad \textbf{(E5)}$$

Control de capacidad y apertura en las centrales de acopio

$$\sum_{t\in SD\{j\}}\ \sum_{n\in NOS\{j,t\}} CAL_{jtn}*X_{jtn} \le \sum_{o\in OTDT\{j\}}\ \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{j\})}\ \sum_{e\in EFO\{f,o\}}\ \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{ojfes} \quad \forall\ j\in J \qquad \textbf{(E6)}$$

$$\sum_{n\in NOS\{j,t\}} CAL_{jtn}*X_{jtn} \le \sum_{o\in OTDT\{j\}}\ \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{j\})}\ \sum_{e\in EFO\{f,o\}}\ \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{ojfes} \quad \forall\ j\in J,t \in (SD\{j\}\cap 1) \qquad \textbf{(E7)}$$

$$\sum_{n\in NOS\{j,t\}} CAL_{jtn}*X_{jtn} \le \sum_{o\in OTDT\{j\}}\ \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{j\})}\ \sum_{e\in EFO\{f,o\}}\ \sum_{s\in(SO\{o\}\cap 2)} WN_{ojfes} \quad \forall\ j\in J,t \in (SD\{j\}\cap 2) \qquad \textbf{(E8)}$$

.

$$\sum_{o\in OTDT\{j\}}\ \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{j\})}\ \sum_{e\in EFO\{f,o\}}\ \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{ojfes} \le \sum_{t\in SD\{j\}}\ \sum_{n\in NOS\{j,t\}} CAM_{jtn}*X_{jtn} \quad \forall\ j\in J \qquad \textbf{(E9)}$$

$$\sum_{o\in OTDT\{j\}}\ \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{j\})}\ \sum_{e\in EFO\{f,o\}}\ \sum_{s\in(SO\{o\}\cap 1)} WN_{ojfes} \le \sum_{n\in NOS\{j,t\}} CAM_{jtn}*X_{jtn} \quad \forall\ j\in J,t \in (SD\{j\}\cap 1) \qquad \textbf{(E10)}$$

$$\sum_{s\in SO\{j\}}\ \sum_{n\in NOS\{j,s\}} X_{jsn} \le 1 \quad \forall\ j\in J \qquad \textbf{(E11)}$$

Flujo de entrada en las centrales de acopio

$$\sum_{s\in SO\{o\}} WN_{ojfes} \le \sum_{t\in SD\{j\}}\ \sum_{n\in NOS\{j,t\}} X_{jtn}*CAM_{jtn} \quad \forall\ j\in J, o\in OTDT\{j\}, f \in (FDT\{j\}\cap FOT\{o\}), e\in EFO\{f,o\} \qquad \textbf{(E12)}$$

$WN_{ojfes} \le \sum_{n\in NOS\{j,t\}} X_{jtn}*CAM_{jtn} \quad \forall\ j\in J, o\in OTDT\{j\}, f\in(FDT\{j\}\cap FOT\{o\}), e\in EFO\{f,o\}, s\in(SO\{o\}\cap 1), t\in(SD\{j\}\cap 1)$

$$WN_{ojfes} \leq \sum_{t \in SD\{j\}} \sum_{n \in NOS\{j,t\}} X_{jtn} * CAM_{jtn} \quad \forall\ j \in J, o \in OTDT\{j\}, f \in (FDT\{j\} \cap FOT\{o\}), e \in EFO\{f,o\}, s \in (SO\{o\} \cap 2) \qquad \textbf{(E14)}$$

El conjunto de restricciones abordadas anteriormente para las centrales de acopio, garantiza inicialmente el cumplimiento de las capacidades mínimas para evitar capacidades ociosas y el cumplimiento de las capacidades máximas evitando que se quede producto sin almacenar; por otro lado en relación a la cadena de frio garantiza primero que los orígenes refrigerados envíen a centrales refrigeradas, en caso de tener aun espacio en estas centrales refrigeradas se podrá recibir flujo de orígenes no refrigerados, es decir que luego de garantizar el cumplimiento de la cadena de frio los orígenes no refrigerados pueden enviar a centrales refrigeradas o no refrigeradas según lo determine le modelo pero siempre sujeto a la capacidad disponible.

Flujo de salida en las centrales de acopio

$$\sum_{s \in SO\{j\}} WN_{jdfes} \leq \sum_{s \in SO\{j\},\ n \in NOS\{j,s\}} X_{jsn} * CAM_{jsn} \quad \forall\ j \in J, d \in DTOT\{j\}, f \in (FDT\{d\} \cap FOT\{j\}), e \in EFO\{f,j\} \qquad \textbf{(E15)}$$

$$WN_{jdfes} \leq \sum_{n \in NOS\{j,s\}} X_{jsn} * CAM_{jsn} \quad \forall\ j \in J, d \in (DTOT\{j\} \cap DS\{1\}), f \in (FDT\{d\} \cap FOT\{j\}), e \in EFO\{f,j\}, s \in (SO\{j\} \cap 1) \qquad \textbf{(E16)}$$

$$WN_{jdfes} \leq \left(1 - \sum_{s2 \in SO\{j\} | S2=1} \sum_{n \in NOS\{j,s2\}} X_{js2n}\right) * \left(\max_{s3 \in SO\{j\}, n3 \in NOS\{j,s3\}} CAM_{js3n3}\right) \quad \forall\ j \in J, d \in DTOT\{j\}, f \in (FDT\{d\} \cap FOT\{j\}), e \in EFO\{f,j\}, s \in (SO\{j\} \cap 2) \qquad \textbf{(E17)}$$

Control de capacidad y apertura en las centrales mayorista

.

$$\sum_{t \in SD\{k\}} \sum_{n \in NOS\{k,t\}} CTL_{ktn} * Y_{ktn} \leq \sum_{o \in OTDT\{k\}} \sum_{f \in (FOT\{o\} \cap FDT\{k\})} \sum_{e \in EFO\{f,o\}} \sum_{s \in SO\{o\}} WN_{okfes} \quad \forall\ k \in K \qquad \textbf{(E18)}$$

$$\sum_{n \in NOS\{k,t\}} CTL_{ktn} * Y_{ktn} \leq \sum_{o \in OTDT\{k\}} \sum_{f \in (FOT\{o\} \cap FDT\{k\})} \sum_{e \in EFO\{f,o\}} \sum_{s \in SO\{o\}} WN_{okfes} \quad \forall\ k \in K, t \in (SD\{k\} \cap 1) \qquad \textbf{(E19)}$$

(E20)

(E23) **(E22)**

$$\sum_{n\in NOS\{k,t\}} CTL_{ktn} * Y_{ktn} \leq \sum_{o\in OTDT\{k\}} \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{k\})} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in(SO\{o\}\cap 2)} WN_{okfes} \quad \forall\ k\in K, t \in (SD\{k\}\cap 2)$$

$$\sum_{o\in OTDT\{k\}} \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{k\})} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in SO\{o\}} WN_{okfes} \leq \sum_{t\in SD\{k\}} \sum_{n\in NOS\{k,t\}} CTM_{ktn} * Y_{ktn} \quad \forall\ k\in K$$

$$\sum_{o\in OTDT\{k\}} \sum_{f\in(FOT\{o\}\cap FDT\{k\})} \sum_{e\in EFO\{f,o\}} \sum_{s\in(SO\{o\}\cap 1)} WN_{okfes} \leq \sum_{n\in NOS\{k,t\}} CTM_{ktn} * Y_{ktn} \quad \forall\ k\in K, t \in (SD\{k\}\cap 1)$$

$$\sum_{s\in SO\{k\}} \sum_{n\in NOS\{k,s\}} Y_{ksn} \leq 1 \quad \forall\ k\in K$$

Flujo de entrada a centrales mayoristas

$$\sum_{s\in SO\{o\}} WN_{okfes} \leq \sum_{t\in SD\{k\}} \sum_{n\in NOS\{k,t\}} Y_{ktn} * CTM_{ktn} \quad \forall\ k\in K, o \in OTDT\{k\}, f\ (FDT\{k\}\cap FOT\{o\}), e\in EFO\{f,o\} \qquad \textbf{(E24)}$$

$$WN_{okfes} \leq \sum_{n\in NOS\{k,t\}} Y_{ktn} * CTM_{ktn} \quad \forall\ k\in K, o\in OTDT\{k\}, f\in (FDT\{k\}\cap FOT\{o\}), e \in EFO\{f,o\}, s\in (SO\{o\}\cap 1), t\in (SD\{k\}\cap 1) \qquad \textbf{(E25)}$$

$$WN_{okfes} \leq \sum_{t\in SD\{k\}} \sum_{n\in NOS\{k,t\}} Y_{ktn} * CTM_{ktn} \quad \forall\ k\in K, o\in OTDT\{k\}, f\in (FDT\{k\}\cap FOT\{o\}), e \in EFO\{f,o\}, s\in (SO\{o\}\cap 2) \qquad \textbf{(E26)}$$

El conjunto de restricciones abordadas anteriormente para las centrales mayoristas, garantiza inicialmente el cumplimiento de las capacidades mínimas para evitar capacidades ociosas y el cumplimiento de las capacidades máximas evitando que se quede producto sin almacenar; por otro lado en relación a la cadena de frio garantiza primero que los orígenes refrigerados envíen a centrales refrigeradas, en caso de tener aun espacio en estas centrales refrigeradas se podrá recibir flujo de orígenes no refrigerados, es decir que luego de garantizar el cumplimiento de la cadena de frio los orígenes no refrigerados pueden enviar a centrales refrigeradas o no refrigeradas según lo determine le modelo pero siempre sujeto a la capacidad disponible.

Flujo de salida de las centrales mayoristas

$$\sum_{s\in SO\{k\}} WN_{kdfes} \leq \sum_{s\in SO\{k\},n\in NOS\{k,s\}} Y_{ksn} * CTM_{ksn} \quad \forall\ k\in K, d\in DTOT\{k\}, f \in (FDT\{d\}\cap FOT\{k\}), e\in EFO\{f,k\} \qquad \textbf{(E27)}$$

$$WN_{kdfes} \leq \sum_{n\in NOS\{k,s\}} Y_{ksn} * CTM_{ksn} \quad \forall\ k\in K, d\in (DTOT\{k\}\cap DS\{1\}), f \in (FDT\{d\}\cap FOT\{k\}), e\in EFO\{f,k\}, s\in (SO\{k\}\cap 1) \qquad \textbf{(E28)}$$

(E29)

$$WN_{kdfes} \leq \left(1 - \sum_{s2 \in SO\{k\}} \sum_{n \in NOS\{k,s2\}\ s2=1} Y_{ks2n}\right) * \left(\max_{s3 \in SO\{k\}, n3 \in NOS\{k,s3\}} CAM_{ks3n3}\right) \qquad \forall\ k \in K, d \in DTOT\{k\}, f \in (FDT\{d\} \cap FOT\{k\}), e \in EFO\{f,k\}, s \in (SO\{k\} \cap 2)$$

Demanda mínima para el primer eslabón por fruta (zonas de producción agrícola)

$$\sum_{i \in (OTF\{f\} \cap OTDT\{d2\} \cap \mathrm{I})} \sum_{e \in EFO\{f,i\}} \sum_{s \in SO\{i\}} WN_{id2fes}\left(1 - TN_{id2fs} - H_{id2fs} - PE_{id2fe}\right) \geq DN_{d2f} * \alpha i_{d2f} * \left(1 + \rho_{d2f}\right) * \gamma d2_{d2f} * BPD2_{d2} \qquad \forall d2 \in DF, \forall f \in FDT\{d2\} \quad \textbf{(E30)}$$

Demanda máxima para el primer eslabón por fruta (zonas de producción agrícola)

$$\sum_{i \in (OTF\{f\} \cap OTDT\{d2\} \cap \mathrm{I})} \sum_{e \in EFO\{f,i\}} \sum_{s \in SO\{i\}} WN_{id2fes}\left(1 - TN_{id2fs} - H_{id2fs} - PE_{id2fe}\right) \leq DN_{d2f} * \alpha i_{d2f} * \left(1 + \rho_{d2f}\right) * BPD2_{d2} \quad \forall d2 \in DF, \forall f \in FDT\{d2\} \quad \textbf{(E31)}$$

Demanda mínima para el segundo eslabón (centrales de acopio)

$$\sum_{j \in (OTF\{f\} \cap OTDT\{d2\} \cap \mathrm{J})} \sum_{e \in EFO\{f,j\}} \sum_{s \in SO\{j\}} WN_{jd2fes}\left(1 - TN_{jd2fs} - H_{jd2fs} - PE_{jd2fe}\right) \geq DN_{d2f} * \alpha j_{d2f} * \left(1 + \rho_{d2f}\right) * \gamma d2_{d2f} * BPD2_{d2} \qquad \forall d2 \in DF, \forall f \in FDT\{d2\} \quad \textbf{(E32)}$$

Demanda máxima para el segundo eslabón (centrales de acopio)

$$\sum_{j \in (OTF\{f\} \cap OTDT\{d2\} \cap \mathrm{J})} \sum_{e \in EFO\{f,j\}} \sum_{s \in SO\{j\}} WN_{jd2fes}\left(1 - TN_{jd2fs} - H_{jd2fs} - PE_{jd2fe}\right) \leq DN_{d2f} * \alpha j_{d2f} * \left(1 + \rho_{d2f}\right) * BPD2_{d2} \qquad \forall d2 \in DF, \forall f \in FDT\{d2\} \quad \textbf{(E33)}$$

Demanda mínima para el tercer eslabón (centrales mayoristas)

$$\sum_{k \in (OTF\{f\} \cap OTDT\{d2\} \cap \mathrm{K})} \sum_{e \in EFO\{f,k\}} \sum_{s \in SO\{k\}} WN_{kd2fes}\left(1 - TN_{kd2fs} - H_{kd2fs} - PE_{kd2fe}\right) \geq DN_{d2f} * \alpha k_{d2f} * \left(1 + \rho_{d2f}\right) * \gamma d2_{d2f} * BPD2_{d2} \quad \forall d2 \in DF, \forall f \in FDT\{d2\} \quad \textbf{(E3)}$$

Demanda máxima para el tercer eslabón (centrales mayoristas)

$$\sum_{k \in (OTF\{f\} \cap OTDT\{d2\} \cap \mathrm{K})} \sum_{e \in EFO\{f,k\}} \sum_{s \in SO\{k\}} WN_{kd2fes}\left(1 - TN_{kd2fs} - H_{kd2fs} - PE_{kd2fe}\right) \leq DN_{d2f} * \alpha k_{d2f} * \left(1 + \rho_{d2f}\right) * BPD2_{d2} \quad \forall d2 \in DF, \forall f \in FDT\{d2\} \quad \textbf{(E35)}$$

Relaciones de flujo hacia clientes abiertos

$$WN_{od2fes} \leq DN_{d2f} * BPD2_{d2} \qquad \forall d2 \in DF, o \in OTDT\{d2\}, f \in (FDT\{d2\} \cap FOT\{o\}), e \in EFO\{f,o\}, s \in SO\{o\} \quad \textbf{(E36)}$$

Restricciones de tipo de variables

El siguiente conjunto de restricciones garantiza el dominio y el tipo de las variables de decisión.

X_{jsn} ∈ Binarias∀ $j \in J$
Y_{ksn} ∈ Binarias $\forall k \in K$
$BPD2_{d2} \in$ Binarias $\forall d2 \in DF$
$WN_{odfes} => 0$, $\forall o \in OT, \forall d \in DT$

Supuestos

- El modelo se desarrolla en un escenario de déficit.
- Se asume que los productores tienen asimetrías en cuanto a los sistemas de refrigeración es decir que unos tienen la capacidad de iniciar la cadena de frio para sus productos mientras que otros no.
- Una vez se inicia la cadena de frio esta no podrá romperse es decir si desde el productor el producto sale refrigerado en centrales de acopio y mayoristas deberá estar bajo estas mismas condiciones.
- La cadena de frio puede iniciar en cualquier eslabón de la cadena, es decir centrales de acopio o mayoristas refrigeradas podrán recibir productos refrigerados y no refrigerados, mientras centrales no refrigeradas solo pueden recibir productos no refrigerados.

Definición funciones objetivo

Ecuación 1: Busca minimizar la huella hídrica de la cadena de suministro contemplada en el presente modelo para esto se halla el consumo de agua en diferentes aspectos:

- APE: Consumo de agua dado por perdidas de fruta en los flujos de un origen a un destino - Mediante esta ecuación se calcula la huella hídrica generada por perdida de fruta en el transporte, para esto se utiliza la cantidad de productos que se desperdician en el transporte de un origen a un destino y se relaciona con la huella hídrica (agua azul, verde y gris) que involucra el cultivo de cada una de estas frutas.
- APMC: Consumo de agua dado por perdidas de fruta por manipulación en los centros de acopio y mayoristas - De manera similar a la ecuación anterior se involucra la huella hídrica generada por perdida de fruta por fallas en la manipulación que se hace de los productos en las diferentes centrales, también se hace con base a la huella hídrica que involucra el cultivo de cada fruta.

Las siguientes ecuaciones buscan hacer una aproximación a la huella hídrica relacionada al empaque utilizado para el transporte desde los orígenes a las diferentes centrales y desde dichas centrales a los diferentes destinos, para esto se calcula la cantidad de empaques que se requieren y se identifica la huella hídrica generada para la elaboración de cada uno de los empaques y el consumo de agua relacionando con el lavado de estos, esto está relacionado con el número de veces que puede ser utilizado cada empaque.

- AE1: Consumo de agua en el lavado y elaboración de empaques utilizados en el trasporte hacia las centrales de acopio y mayoristas-
- AE2: Consumo de agua en el lavado y elaboración de empaques utilizados en el trasporte desde las centrales de acopio y mayoristas

Las siguientes ecuaciones abordan la huella hídrica relacionada al trasporte de los productos desde y hacia las

diferentes centrales, para esto se calcula la cantidad de vehículos que se requieren y se relaciona con el consumo de agua en el lavado de dichos vehículos, teniendo en cuenta que al transportar alimentos se requiere mantener excelentes condiciones de higiene.

- AV1: Consumo de agua en el lavado de vehículos utilizados para el trasporte hacia las centrales de acopio y mayoristas
- AV2: Consumo de agua en el lavado de vehículos utilizados para el trasporte desde las centrales de acopio y mayoristas

Las siguientes ecuaciones calculan el consumo de agua tanto en las centrales de acopio como en las centrales mayoristas, se hace referencia al consumo relacionado por ejemplo con el funcionamiento de los sanitarios, el agua necesaria para la limpieza de las instalaciones entre otros.

- AJ: Consumo de agua en las centrales de acopio
- AK: Consumo de agua en las centrales mayoristas

Ecuación 2: Teniendo en cuenta que el modelo se desarrolla en un contexto de déficit de alimentos, uno de los objetivos que se debe garantizar en lograr la mayor cobertura posible de los clientes finales que son atendidos, con este se busca una sostenibilidad a nivel social garantizando seguridad alimentaria a la mayor cantidad de personas, se toma como referencia a los clientes finales (plazas, tiendas, hipermercados y centro de transformación) ya que son estos los casos suministran alimentos a los hogares, de esta forma entre mayor cobertura allá de clientes finales mayor cobertura a los hogares.

Ecuación 3: Con relación a la sostenibilidad económica el presente modelo tiene como función objetivo la minimización de los costos que involucra la gestión y funcionamiento de la cadena de suministro abordada.

- CTR: Costo de transporte con relación a la cantidad transportada y las distancias recorridas de un origen a un destino
- CI: Costos fijos de las centrales de acopio y las centrales mayoristas que se abren de acuerdo con el modelo.
- CPT: Costo por perdidas de fruta en los flujos de un origen a un destino
- CPI: Costo perdidas de fruta por manipulación en los centros de acopio y mayoristas

Ecuación 4: Se establece la oferta disponible en cada zona de producción dependiendo de las frutas que ofrece cada zona.

Ecuación 5: La cantidad de producto que ingresa a una central, considerando las pérdidas ocasionadas por el transporte en determinado trayecto debe ser igual a la cantidad que sale de dicha central considerando las perdidas dentro de esta por almacenamiento.

Ecuación 6: Control capacidad mínima a nivel general: Controla que la cantidad enviada a una central de acopio independiente del origen, la fruta, el empaque y el sistema de conservación que tenga dicho origen sea mayor que la capacidad mínima de dicha central, esto garantiza utilizar la capacidad disponible reduciendo capacidades ociosas.

Ecuación 7: Control de capacidad para las centrales de acopio refrigeradas, garantiza que independiente del origen, la fruta, el empaque y el sistema de conservación de dicho origen, la cantidad enviada a una central refrigerada sea mayor a la capacidad mínima de dicha central, evitando capacidades ociosas.

Ecuación 8: Control capacidad para las centrales de acopio no refrigeradas: Establece que centrales no refrigeradas solo puedan recibir de orígenes no refrigerados (s=2), garantizando que la cantidad enviada a una central no refrigerada(t=2) independiente del origen, la fruta y el empaque sea mayor a la capacidad mínima de dicha central, evitando capacidades ociosas.

Ecuación 9: Control capacidad máxima a nivel general, controla que la cantidad enviada una central de acopio independiente del origen, la fruta, el empaque y el sistema de conservación que tenga dicho origen sea menor que la capacidad máxima de dicha central, lo anterior busca evitar déficit de capacidad, ya que esto generaría que no se tuviera donde almacenar

Ecuación 10: Control capacidad para las centrales de acopio refrigeradas, controla que los orígenes refrigerados envíen solamente a centrales de acopio refrigeradas para preservar la cadena de frio garantizando que independiente de la fruta y el empaque la cantidad enviada sea menor que la capacidad máxima de dicha central refrigerada, lo anterior busca evitar déficit de capacidad ya que esto generaría que no se tuviera donde almacenar aumentando las perdidas.

Ecuación 11: Solo se pueden abrir centrales en un nivel de capacidad y con solo un sistema de conservación.

Ecuación 12: Control de entrada a nivel especifico: Garantiza por arco recorrido, por tipo de alimento y por tipo de empaque la cantidad enviada desde un origen con cualquier sistema de refrigeración a una central de acopio no supere la capacidad máxima de dicha central independiente del sistema de refrigeración que esta tenga.

Ecuación 13: Flujo de centrales refrigeradas: Los orígenes refrigerados (s=1) solo podrán enviar a centrales de acopio refrigeradas (t=1) de esta forma se garantiza que se respete la cadena de frio, respetando los limites de capacidad.

Ecuación 14: Flujos de orígenes no refrigerados: Los orígenes no refrigerados (s=2) podrán enviar a centrales de acopio no refrigeradas y refrigeradas, siempre y cuando halla capacidad disponible

Ecuación 15: Control de salida a nivel especifico: Garantiza por arco recorrido, por tipo de alimento y por tipo de empaque que la cantidad enviada desde una central de acopio con cualquier sistema de refrigeración a un destino no supere la capacidad máxima de dicha central independiente del sistema de refrigeración que este destino tenga.

Ecuación 16: Control de salida en centrales refrigeradas: Los centrales de acopio refrigeradas (s=1) solo podrán enviar a destinos refrigerados (DS=1) de esta forma se garantiza que se respete la cadena de frio.

Ecuación 17: Control de salida en centrales refrigeradas: Garantiza que de las centrales refrigeradas no salgan flujos no refrigerados

Ecuación 18: Control capacidad mínima a nivel general: Controla que la cantidad enviada a una central mayorista independiente del origen, la fruta, el empaque y el sistema de conservación que tenga dicho origen sea mayor que la capacidad mínima de dicha central, esto garantiza utilizar la capacidad disponible reduciendo capacidades ociosas

Ecuación 19: Control capacidad para las centrales mayoristas refrigeradas, garantiza que independiente del origen, la fruta, el empaque y el sistema de conservación de dicho origen, la cantidad enviada a una central refrigerada sea mayor a la capacidad mínima de dicha central, evitando capacidades ociosas.

Ecuación 20: Control de capacidad para las centrales mayoristas no refrigeradas: Controla que centrales no refrigeradas solo puedan recibir de orígenes no refrigerados (s=2), garantizando que la cantidad enviada a una

central no refrigerada(t=2) independiente del origen, la fruta y el empaque sea mayor a la capacidad mínima de dicha central, evitando capacidades ociosas.

Ecuación 21: Control capacidad máxima a nivel general, controla que la cantidad enviada una central mayorista independiente del origen, la fruta, el empaque y el sistema de conservación que tenga dicho origen sea menor que la capacidad máxima de dicha central, lo anterior busca evitar déficit de capacidad, ya que esto generaría que no se tuviera donde almacenar la fruta aumentando las perdidas.

Ecuación 22: Control capacidad máxima para las centrales mayoristas refrigeradas, controla que los orígenes refrigerados envíen solamente a centrales mayoristas refrigeradas para preservar la cadena de frio, garantizando que independiente de la fruta y el empaque la cantidad enviada sea menor que la capacidad máxima de dicha central refrigerada, lo anterior busca evitar déficit de capacidad ya que esto generaría que no se tuviera donde almacenar aumentando las perdidas.

Ecuación 23: Solo se puede abrir una central con un solo nivel de capacidad y un solo sistema de conservación.

Ecuación 24: Control de entrada a nivel especifico: Garantiza por arco recorrido, por tipo de alimento y por tipo de empaque la cantidad enviada desde un origen con cualquier sistema de refrigeración a una central mayorista no supere la capacidad máxima de dicha central independiente del sistema de refrigeración que esta tenga.

Ecuación 25: Flujo de centrales refrigeradas: Los orígenes refrigerados (s=1) solo podrán enviar a centrales mayoristas refrigeradas (t=1) de esta forma se garantiza que se respete la cadena de frio.

Ecuación 26: Flujos de orígenes no refrigerados: Los orígenes no refrigerados (s=2) podrán enviar a centrales de acopio no refrigeradas y refrigeradas, siempre y cuando halla capacidad disponible.

Ecuación 27: Control de salida a nivel específico: Garantiza por arco recorrido, por tipo de alimento y por tipo de empaque que la cantidad enviada desde una central de acopio con cualquier sistema de refrigeración a un destino no supere la capacidad máxima de dicha central independiente del sistema de refrigeración que este destino tenga.

Ecuación 28: Control de salida en centrales refrigeradas: Los centrales de mayoristas refrigeradas (s=1) solo podrán enviar a destinos refrigerados (DS=1) de esta forma se garantiza que se respete la cadena de frio.

Ecuación 29: Control de salida en centrales refrigeradas: Garantiza que de las centrales refrigeradas no salgan flujos no refrigerados

Ecuación 30: Garantiza que en caso de que un cliente sea atendido, la cantidad de fruta enviada desde una finca considerando las pérdidas generadas hasta que llega a dicho destino sea mayor o igual al porcentaje de demanda mínima de fruta que debe recibir dicho cliente de las fincas considerando las pérdidas que se generan en este último eslabón.

Ecuación 31. Garantiza que en caso de que un cliente sea atendido, la cantidad de fruta enviada desde una finca considerando las pérdidas generadas hasta que llega a dicho destino sea menor o igual a la demanda total que debe recibir dicho cliente de las fincas considerando las pérdidas que se generan en este último eslabón.

Ecuación 32 Garantiza que en caso de que un cliente sea atendido, la cantidad de fruta enviada desde una finca considerando las pérdidas generadas hasta que llega a dicho destino sea mayor o igual a la demanda mínima que debe recibir dicho cliente de las fincas considerando las pérdidas que se generan en este último eslabón.

Ecuación 33

Ecuación 34

Ecuación 35

Ecuación 36. Solo podrá haber flujos hacia los clientes abiertos

5. IDENTIFICACIÓN DE ASIMETRIAS EN CAPACIDADES LOGITICAS EN LA CADENA DE SUMINISTRO FRUTICOLA, CUNDINAMARCA-BOGOTÁ

5.1 Cadena frutícola en Cundinamarca

Colombia cuanta con 32 departamentos, de los cuales Cundinamarca es el tercero más poblado del país con 2.800.000 habitantes sin contar Bogotá, capital de Colombia. Cundinamarca cuenta con 116 municipios en una región de 22.623 km², ubicada al centro del país región andina cordillera oriental, esto hace que tenga una diversidad de pisos térmicos y sea productora de un sin número de alimentos. El departamento abastece más del 60% de los alimentos que consumen en Bogotá, la ciudad más poblada del país.

De acuerdo a la investigación realizada por (Orjuela Castro, 2018) en relación a la caracterización de la FSC caso específico Cundinamarca se evidencio que existen relaciones verticales entre los actores que dan origen a flujos de frutas totalmente definidos, a través de la SC. Los productores de Cundinamarca envían las frutas a Bogotá, principalmente a los mayoristas (más de 80%), en algunos casos con la participación de asociaciones o cooperativas de campesinos. Son muy pocas las frutas vendidas directamente a los hipermercados, industria o plazas (no supera el 10%) y se encontró que no venden fruta a tenderos. Por su parte, los mayoristas venden las frutas, compradas de los productores, a los hipermercados, industrias, plazas y tenderos. Los principales mayoristas se encuentran ubicados en la más grande central comerciante de Bogotá, Corabastos y existe una pequeña participación de la plaza de Codabas. Otra plaza importante es Paloquemao, la cual cumple función en algunos casos de mayorista, aunque su principal mercado es al detal, le compran principalmente a Corabastos y a algunos productores que les venden directamente. Por último, la investigación evidenció que algunos mayoristas producen directamente la fruta en fincas de su propiedad o con arrendamiento de terceros. Esta caracterización fue tomada como base para el desarrollo de la presente investigación.

5.2 Definición de parámetros específicos

Definición del parámetro AG_f = Cantidad de agua gastada en el proceso de cultivo de la fruta f

En 2011 (Mekonnen & Hoekstra, 2011) publicaron un estudio en el que se cuantifica la huella hídrica verde, azul y gris de la producción mundial de cultivos de una manera espacialmente explícita para el período 1996-2005. Utilizaron un modelo de balance hídrico dinámico basado en cuadrículas para calcular el uso de agua del cultivo a lo largo del tiempo, con un intervalo de tiempo de un día. El modelo tiene en cuenta el balance hídrico diario

del suelo y las condiciones climáticas para cada celda de la cuadrícula. Además, la contaminación del agua asociada con el uso de fertilizantes nitrogenados en la producción de cultivos se estima para cada celda de la cuadrícula. Además, calcularon la huella hídrica de más de doscientos productos agrícolas derivados, entre los que se incluyen diversas harinas, bebidas, fibras y biocombustibles. Este estudio se tomó base para determinar la huella hídrica de cuatro de las frutas que se trabajan en el modelo (naranja, mango, mandarina y fresa), como el estudio abarca diferentes países se tomaron los datos de Colombia para hacer la estimación. En las siguientes tablas se presentan los resultados de dicho calculo:

Tabla XII. Huella hídrica de la naranja m^3/ton

Huella	Amazonas	Antioquia	Arauca	Atlántico	Caquetá	Cauca	Cesar	Choco	Córdoba	Guaviare	Guainía	Huella hídrica de la naranja en Colombia
Verde	134	1297	1041	1117	1120	1191	1287	1306	1200	1021	1219	
Azul				174	0	13	24	0	51		0	
Gris	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Total	136	1299	1043	1293	1122	1206	1313	1308	1253	1023	1221	**1110,63636**

Se destaca que la huella hídrica de la naranja es de 560 m^3/ton por lo que la huella hídrica nacional supera de gran manera a la global

Tabla XIII. Huella hídrica de la mandarina m^3/ton

Huella	Amazonas	Antioquia	Arauca	Atlántico	Caquetá	Cauca	Cesar	Choco	Córdoba	Guaviare	Guainía	Huella hídrica de la mandarina en Colombia
Verde	417	442	381	380	381	406	438	444	409	348	415	
Azul				59		4	8	0	17			
Gris	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Total	420	443	382	440	382	411	447	445	427	349	416	**414,727273**

Tabla XIV. Huella hídrica de la fresa m^3/ton

Huella	Amazonas	Antioquia	Arauca	Atlántico	Caquetá	Cauca	Cesar	Choco	Córdoba	Guaviare	Guainía	Huella hídrica de la fresa en Colombia
Verde	233	203	168	175	171	158	184	210	194	167	184	
Azul	4	7	8	31	14	43	21	5	11	2	3	
Gris	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	246	210	176	206	185	201	205	215	205	169	187	**200,454545**

Tabla XV. Huella hídrica del mango m^3/ton

Huella	Amazonas	Antioquia	Arauca	Atlántico	Caquetá	Cauca	Cesar	Choco	Córdoba	Guaviare	Guainía	Huella hídrica del mango en Colombia
Verde	1104	1190	979	1102	1028	1077	1185	1198	1126	938	1107	
Azul				78		20			26			
Gris	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Total	1107	1191	980	1181	1029	1098	1186	1199	1153	939	1108	**1106,45455**

Se destaca que la huella hídrica del mango es de 1800 m^3/ton por lo que la huella hídrica nacional esta por debajo de la global. Sin embargo, del estudio de (Mekonnen & Hoekstra, 2011) se destaca que para el caso puntual de Colombia se evidencia que aún falta aunar esfuerzos para definir la huella azul y gris de las frutas analizadas en el modelo, por lo que se considera que pueda existir un desfase entre los datos a utilizar en el modelo sobre la huella hídrica y la realidad.

Para el caso específico de la mora, estas no son tratadas específicamente sino se incluyen en el grupo de *"Berries not specified elsewhere"* código 558 sin embargo para el caso puntual de Colombia no se tienen datos registrados, por esta razón se utilizaron otras fuentes para definir la huella hídrica de esta fruta.

(Barragan & Siachoque, 2017) aplicaron la metodología propuesta por (Mekonnen & Hoekstra, 2011) con el fin de cuantificar la huella hídrica de los sistemas de producción agrícola y pecuario predominantes en la microcuenca de La Plata- Tolima, para evaluar y fomentar propuestas y estrategias orientadas a mejorar la sostenibilidad de los recursos hídricos de la misma. Para la presente investigación se tomaron como base los resultados hallados en dicha investigación con relación al cultivo de mora. En la siguiente información se presenta la huella hídrica de la mora.

Tabla XVI. Huella hídrica de la mora m^3/ton

Fruta	Verde	Azul	Gris	Huella hídrica total
Mora	733,6		119,2	852,8

Definición de los parámetros que relacionan los empaques con la fruta

Se requiere definir la cantidad de fruta que se puede transportar o Almacenar en cada uno de los posibles empaques, para esto de manera experimental se tomaron las medidas de una unidad de cada fruta (radio y altura), para el peso se tomaron referencias cuando existían o de manera experimental se pesaron las frutas.

Tabla XVII. Medidas promedio de las frutas analizadas

Fruta	Mandarina	Mango	Naranja	Fresa	Mora
Medidas	R: 4 cm (Villalba-Campos et al., 2014) H: 2.5 cm	H: 12 cm R: 4.5 cm	R: 4 cm	H: 2.5 cm R: 1.1 cm (Gómez, 2004)	H: 2.2 cm R: 0.95 cm (Gómez P, 2014)
Peso promedio und	200 gr (Villalba-Campos et al., 2014)	480 gr	200 gr	6.5 gr (Gómez, 2004)	4.5 gr (Gómez P, 2014)

Con base en estos datos se estimó el número de unidades que pueden ser empacadas en cada uno de los empaques, se especifica que para el caso de los empaques como canastillas y cajas no se pueden llenar hasta el tope, por cuestiones de apilamiento, ya que se requiere que no quede producto sobresaliendo los bordes del empaque. Para el caso de la mora se asume que la canastilla se llena solo hasta la mitad de la altura disponible por la delicadeza del producto, también se debe considerar que en ocasiones por volumen disponible podrían empacarse más unidades sin embargo debe tenerse en cuenta la capacidad máxima como limitante.

Tabla XVIII. Cantidad de fruta por empaque

	Mandarina		Mango		Naranja		Fresa		Mora	
	Und	Kg	Und	Kg	Und	Kg	Und	Kg	Und	Kg
Canastilla carullera	175	35	36	18	105	21				
Canastilla fresera							1728	11.2	2790	12.5
Malla			36	17.2	72	14.4				
Caja de cartón	60	12	15	7.2	30	6	1408	9.2	1404	6.3

Definición de los parámetros relacionados con el empaque

Para el modelo se seleccionaron cuatro tipos de empaque los cuales se muestran a continuación:

Ilustración 3. Canastilla Carullera



Fuente: Plasticestibas LTDA

Ilustración 4. Canastilla Fresera



Fuente: Plasticestibas LTDA

Ilustración 5. Malla Naranjera



Fuente: Marienberg LTDA

Ilustración 6. Caja de cartón



Fuente: CEOCOMPANY (www.ceocompany.com.mx/ceo/cotizar/NE_0064091#)

Estos empaques suelen ser los más utilizados para el transporte de frutas, en la Tabla XIX se presentan los datos más relevantes de estos:

Tabla XIX. Datos relevantes de los empaques utilizados en el modelo

	Canastilla tipo carullera	**Canastilla fresera**	**Malla**	**Caja de cartón**
Medidas	25 x 40 x 60 cm (2)	18 x 40 x 60 cm (2)	41 x 63 cm (1)	50 x 40 x 9.4 cm (9)
Capacidad	40 kg	15 kg	18 kg	15 kg
Material	Polipropileno (PP)	Polipropileno (PP)	Polipropileno (PP)	Cartón corrugado
Peso	2.10 kg aproximado (2)	1.05 kg aproximado (3)	0.2 kg (4)	0.43 kg (9)
Frutas que utilizan ese empaque	Naranja Mandarina Mango	Mora Fresa	Mango Naranja	Naranja Mandarina Mango Fresa Mora
Ciclo de vida del empaque	100 usos (5)	100 usos (5)	1 uso	1 uso (5)
Agua empleada en la realización del empaque	$0{,}0946\ {}^{m^3}/_{canastilla}$ (6)	$0{,}045\ {}^{m^3}/_{canastilla}$ (6)	$0{,}0086\ {}^{m^3}/_{malla}$ (6)	$0{,}02279\ {}^{m^3}/_{caja}$ (7)
Agua empleada en la limpieza del empaque	$0{,}0005\ {}^{m^3}/_{canastilla}$ (5)(8)	$0{,}0005\ {}^{m^3}/_{canastilla}$ (8)	————	————

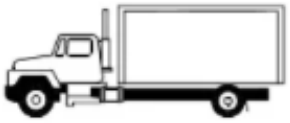
(1) Mallas naranjeras - Marienberg
(2) Plasticestibas LTDA
(3) Viplast industrias palsticas S.A
(4) Arpysac- Mexico
(5) Asociación de Operadores Logísticos de Elementos Reutilizables Eco-sostenibles (ARECO) (Universitat Politècnica de Catalunya, 2017)
(6) 1kg de PP = 0.043 litros de agua -MELNIK
(7) 1kg de caja de cartón = 0.053 litros de agua - Artequim.com Manual de Gestión de Huella del Agua- Listado de Huella del Agua por productos

(8) Betelgeux- Lavadora de cajas EKW
(9) https://www.ceocompany.com.mx/ceo/cotizar/NE_0064091#

Definición de los parámetros relacionados con los vehículos

Para este modelo, teniendo en cuenta las dinámicas de transporte que se dan en la región de estudio, se seleccionaron 4 tipo de vehículos, en la Tabla XX se muestran las características principales de dichos vehículos, así como una representación gráfica de estos, de igual forma se hace énfasis en que los sistemas de refrigeración se están considerando únicamente para las instalaciones donde se hace almacenamiento, este no es considerado para el transporte, por lo que no se tienen en cuenta vehículos refrigerados.

Tabla XX. Tipos de vehículos

Tipo de camión	Capacidad	Descripción	Medidas	Grafico
Turbo	4 ton	Camión sencillo	Ancho útil: 2.3 m Largo útil: 4,8 m Alto útil: 2.3	
Sencillo	7 ton	Camión rígido de 2 ejes	Ancho útil: 2.5 m Largo útil: 7 m Alto útil: 2.5 m	
Doble troque	14 ton	Camión rígido de 3 ejes	Ancho útil: 2.5 m Largo útil: 7 m Alto útil: 2.5	
Minimula	22 ton	Tractocamión de 2 ejes y semirremolque de 2 ejes	Ancho útil: 2.5m Largo útil: 12.2 m Alto útil: 2.5m	

Fuente: https://www.internacionallogistica.com/vehiculos.html

Tipos de vehículos por arco

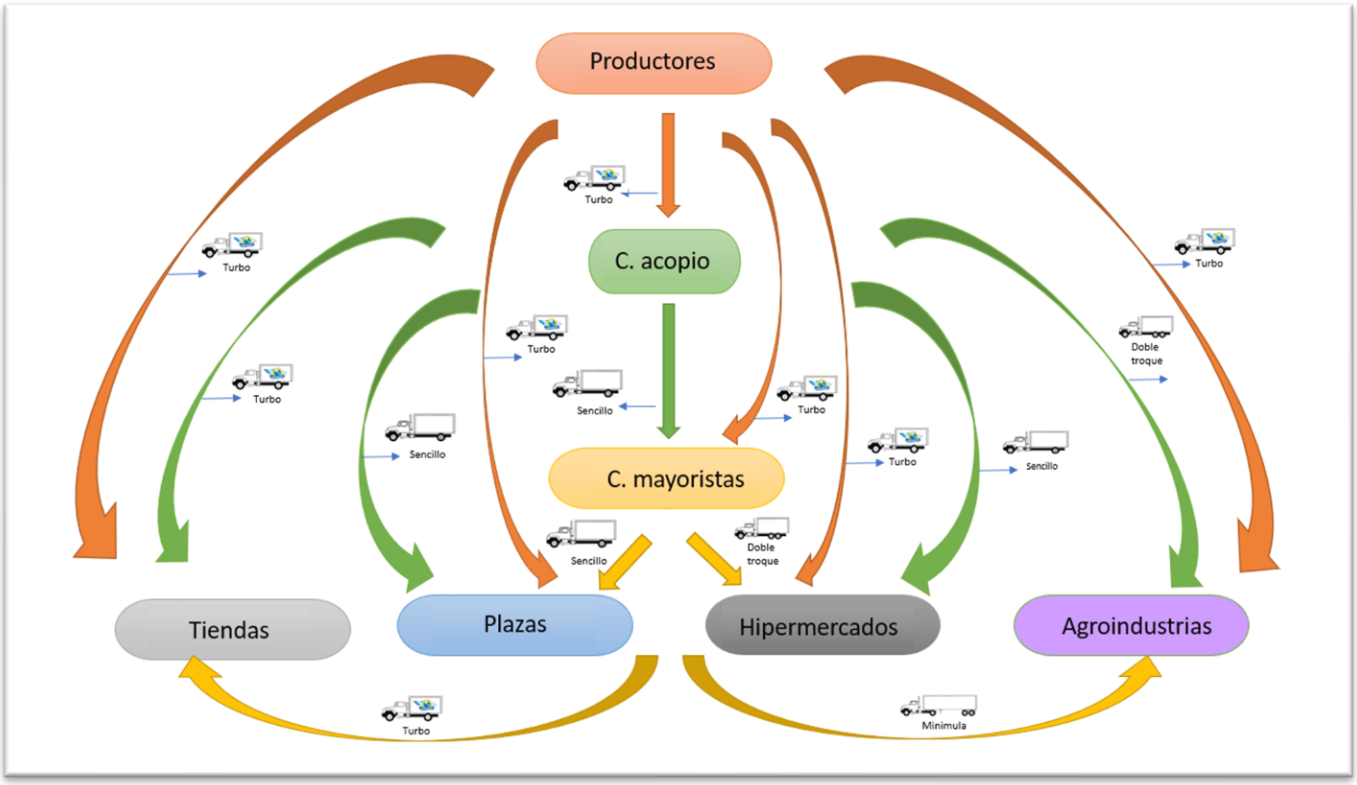
De igual forma tenido en cuenta las características y dimensiones de cada uno de los vehículos y los tipos de vías que suelen comunicar a cada uno de los eslabones, se definió para cada tipo de arco el tipo de vehículo que realiza el correspondiente transporte. En la Tabla XXI se observa la asignación realizada.

Tabla XXI Tipo de vehículo por arco

	C. acopio	C. mayorista	Plazas	Hipermercados	Agroindustria	Tiendas
Productores	Turbo (4 ton)	Turbo (4 ton)	Turbo (4 ton)	Turbo (4 ton)	Turbo (4 ton)	Turbo (4 ton)
C. acopio		Sencillo (7 ton)	Sencillo (7 ton)	Sencillo (7 ton)	Doble troque (14 ton)	Turbo (4 ton)
C. mayorista	Sencillo (7 ton)		Sencillo (7 ton)	Doble troque (14 ton)	Minimula (22 ton)	Turbo (4 ton)

De igual forma en la Ilustración 7 se muestra de manera grafica el tipo de vehículo asignado a cada tipo de flujo que se da entre los eslabones de una cadena.

Ilustración 7. Tipo de vehículo en cada flujo



Definición parámetros que relaciona empaques con vehículos

Para la presente investigación se asume que la operación de carga y transporte de los productos seleccionados se hace utilizando estibas sobre las cuales se pone la carga, con la finalidad de garantizar el flujo de arie necesario en la parte inferior de la carga para reducir las pérdidas de alimento, de igual forma se limita la cantidad de empaques apilados en primera medida para reducir perdidas por exceso de peso y también garantizar el flujo de aire en la parte superior del vehículo.

Como se requiere determinar la cantidad de empaques que se pueden transportar en cada tipo de vehículo se tome primero la cantidad de empaques que pueden ir en una estiba estándar y luego la cantidad de estibas en un vehículo. En la Ilustración 8 y en la Ilustración 9 se muestra las dimensiones de una estiba estándar y la

distribución de las canastillas carulleras (ejemplo) en dicha estiba, con base en estas relaciones se hizo el cálculo correspondiente.

Ilustración 8.Dimensiones estiba estándar

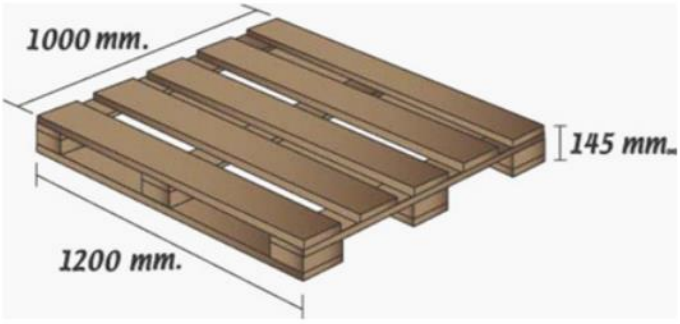
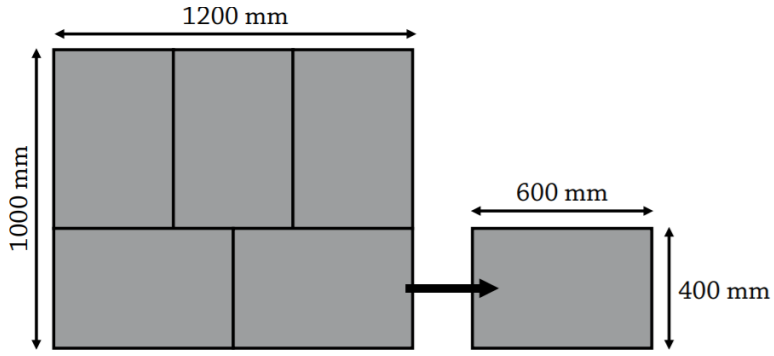


*Ilustración 9.Distribucion de canastillas (60*40cm) en una estiba*



Con base en esto y tomando en consideración la cantidad de empaques que pueden ser apilados se definió la cantidad de empaques que se pueden transportar en cada tipo de vehículo, en la Tabla XXII se muestran el número empaques por estiba y el número máximo de apilamiento para cada tipo de empaque y en la Tabla XXIII los resultados finales.

Tabla XXII. Empaques por estiba y máximo de apilamiento

	N. de empaques por estiba	**No. Máximo de empaques a apilar**
Canastilla carullera	5 canastillas	8 canastillas
Canastilla fresera	5 canastillas	7 canastillas
Malla	5 bultos	5 bultos
Caja	6 cajas	5 cajas

Tabla XXIII. Cantidad de empaques por tipo de vehículo

Vehículo	**Turbo**	**Sencillo**	**Doble troque**	**Minimula**
No. De estibas	8	14	14	24
Máximo de empaques a transportar (und)				
Canastilla carullera	320	560	560	960
Canastilla fresera	280	490	490	840
Malla	200	350	350	600
Caja	240	420	420	720

Al igual que se consideró el área disponible dentro de cada vehículo y con base en esto se halló el número de empaques que podía ser transportado, también se consideró la limitante de la capacidad de los vehículos en cuanto al peso, con base en esta limitante se planteó para cada tipo de producto la cantidad máxima de empaques que podría ser transportada.

En la Tabla XXIV se muestra en resumen el número de empaques máximo para cada vehículo con relación a la limitante de área disponible y a la limitante de peso disponible y se seleccionó el menor valor para dar cumplimiento a ambas limitantes, los valores en rojo son los valores seleccionados.

Tabla XXIV. No. de empaques máximo por vehículo con relación a la limitante de área y de peso

Vehículo	**Turbo**		**Sencillo**		**Doble troque**		**Minimula**	
Capacidad (ton)	4		7		14		22	
No. máximo de empaques a transportar con mango (Und)								
	Limitante área	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**
Canastilla carullera	320	250	560	400	560	700	960	1200
Malla	200	287	350	460	350	805	600	1379
Caja	240	649	420	1039	420	1818	720	3117
No. máximo de empaques a transportar con mandarina (Und)								
	Limitante área	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**
Canastilla carullera	320	135	560	216	560	377	960	647
Caja	240	400	420	640	420	1120	720	1920
No. máximo de empaques a transportar con naranja (Und)								
	Limitante área	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**
Canastilla carullera	320	217	560	348	560	609	960	1043
Malla	200	342	350	548	350	959	600	1644
Caja	240	769	420	1231	420	2154	720	3692
No. máximo de empaques a transportar con fresa (Und)								
	Limitante área	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**
Canastilla fresera	280	407	490	650	490	1138	840	1951
Caja	240	515	420	825	420	1443	720	2474
No. máximo de empaques a transportar con mora (Und)								
	Limitante área	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**	**Limitante área**	**Limitante peso**
Canastilla fresera	280	368	490	588	490	1029	840	1765
Caja	240	735	420	1176	420	2059	720	3529

Definición parámetros relacionados al consumo de agua en centros de acopio y centrales mayoristas

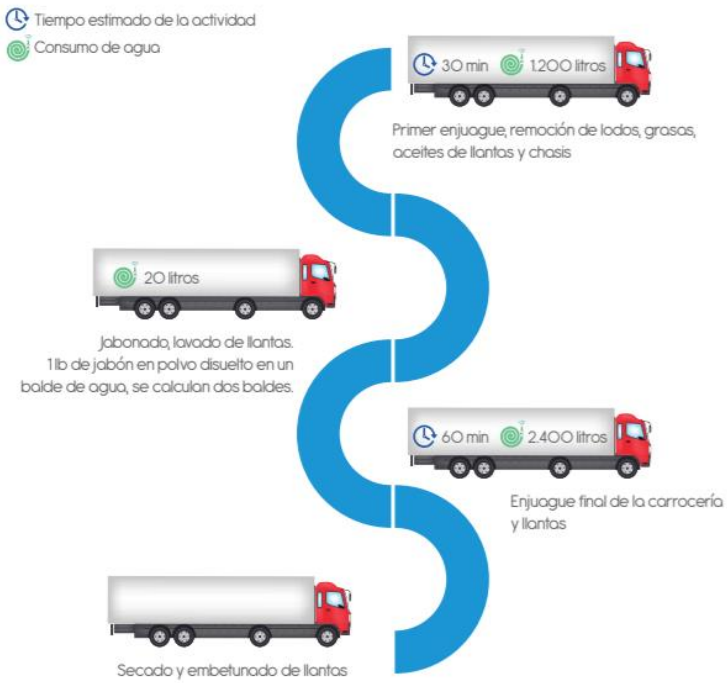
De acuerdo con la investigación realizada por (BARON MENDEZ & JULIAN, 2014) frente a la Formulación de un plan de manejo ambiental para la plaza de mercado las flores, se puede observar que la mayoría de las actividades comerciales que se realizan en la plaza de mercado demandan agua para el lavado de sus instalaciones, lavado de alimentos, preparación de alimentos, consumo en baterías sanitarias y el lavado de corredores y plaza en general. De igual forma se definió que el consumo de agua en dicha plaza de mercado es de $1600\ {}^{m^3}/_{mes}$ para el año 2014, dato que se obtuvo directamente de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB.

Con base a esta información se asume que el consumo de los centros de acopio es similar al registrado en la investigación mencionada anteriormente, para los casos donde hay sistema de refrigeración se tomó un aumento del 15% para procesos de limpieza y mantenimiento de los cuartos fríos. De igual forma se estimó que el consumo de agua en centrales mayoristas es alrededor de tres veces el consumo registrado en centrales de acopio por lo que se étimo en $4800\ {}^{m^3}/_{mes}$ y se manejó el 15% adicional para cuando son refrigerados

Definición parámetros relacionados al consumo de agua en el lavado de vehículos

De acuerdo al estudio realizado por (LIMPIA, 2016) en relación al consumo de agua en el lavado de vehículos se estima que el consumo de agua estimado es de $3.62\ m^3$por camión, teniendo en cuenta el proceso que se muestra en la Ilustración 10, este valor se tomó para las Minimulas, sin embargo para el caso de los camiones turbo, sencillo y doble troque se estima que el consumo de agua es menor, para hacer esta estimación se tomó en cuenta el largo de los vehículos y se realizó la respetiva estimación.

Ilustración 10. Consumo de agua en el lavado de vehículos



El consumo de agua en la limpieza de vehículos que se tomó para la investigación se muestra en la Tabla XXV.

Tabla XXV. Tipos de vehículos

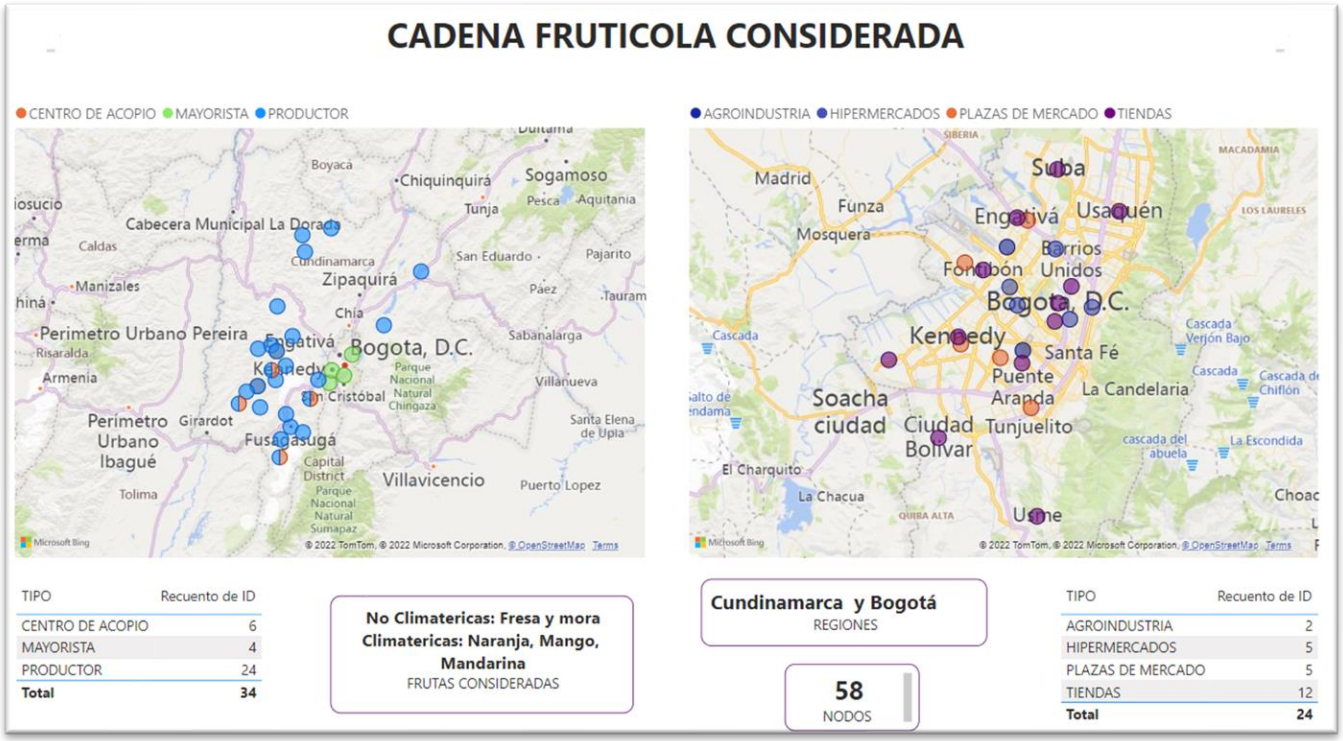
Tipo de camión	Medidas	Agua utilizada en el lavado (m^3)
Turbo	Largo útil: 4,8 m	1.42
Sencillo	Largo útil: 7 m	2.07
Doble troque	Largo útil: 7 m	2.07
Minimula	Largo útil: 12.2 m	3.62

5.3 Planteamiento inicial

El modelo que se presenta es un modelo multiproducto y multieslabón, en él se consideran 5 tipos de fruta: 3 de ellas no climatéricas (naranja, mango y mandarina) y dos climatéricas (fresa y mora); de igual forma se consideran 58 nodos distribuidos de la siguiente manera: 34 orígenes (6 centros de acopio, 4 mayoristas y 24 productores) y 24 clientes finales (2 agroindustrias, 5 hipermercados, 5 plazas de mercado y 12 tiendas ubicadas en las diferentes localidades de Bogotá). En la Ilustración 11 se muestra geográficamente donde están ubicados los 58 nodos que se consideran

Dado que el modelo se desarrolla en un escenario de déficit, los productores serán considerados en su totalidad ya que se requiere utilizar toda la oferta disponible, en relación a los centros de acopio y centros mayoristas el modelo tomará decisiones sobre la apertura de estos, es decir determinará cuales se deben abrir, con qué capacidad y con qué sistema de refrigeración, finalmente en relación a los clientes finales el modelo decidirá cuales serán atendidos, ya que al tener déficit de producto no se podrá atender toda la demanda.

Ilustración 11. Composición inicial de la cadena



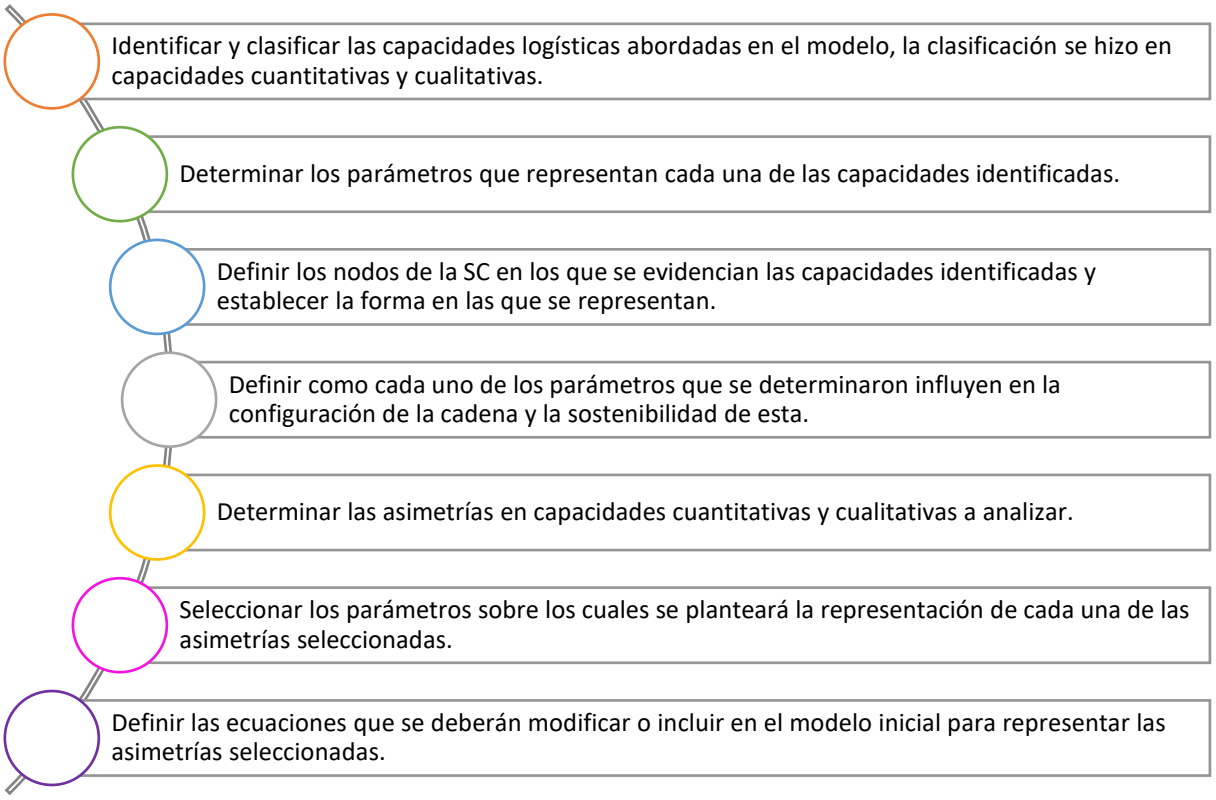
TIPO	Recuento de ID
CENTRO DE ACOPIO	6
MAYORISTA	4
PRODUCTOR	24
Total	**34**

TIPO	Recuento de ID
AGROINDUSTRIA	2
HIPERMERCADOS	5
PLAZAS DE MERCADO	5
TIENDAS	12
Total	**24**

5.4 Definición de asimetrías en capacidades logísticas

Con base en el modelo de optimización propuesto se busca definir una serie de asimetrías de capacidades logísticas para analizar sus efectos en la sostenibilidad de la cadena de suministro de alimentos perecederos, para esto se utilizó la metodología descrita en la Ilustración 12.

Ilustración 12. Metodología para definición de asimetrías



Se analizó la estructura del modelo de optimización para determinar la relación existente entre las capacidades logísticas abordadas, los parámetros establecidos y las medidas de desempeño definidas, para esto se aplicó la metodología planteada anteriormente, los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

Tabla XXVI. Resultados de la metodología

Capacidad	Tipo de capacidad	Parámetros que los representan	Nodos en que se evidencia	Medida de desempeño donde se reflejan
Capacidad almacenamiento centrales de acopio	Cuantitativa	CX_{jsn}: *Costo fijo de la central* CAM_{jsn}: *Capacidad máxima* CAL_{jsn}: *Capacidad mínima*	Centrales de acopio	$OBJ2$: Minimización Costos $OBJ1$: Minimización huella hídrica AJ: *Consumo de agua en las centrales de acopio*
Capacidad almacenamiento centrales mayoristas	Cuantitativa	CY_{ksn}: *Costo fijo de la central* CTM_{ksn}: *Capacidad máxima* CTL_{ksn}: *Capacidad mínima*	Centrales mayoristas	$OBJ2$: Minimización Costos $OBJ1$: Minimización huella hídrica AK: *Consumo de agua en las centrales mayoristas*
Tipo de empaque	Cualitativa	CT_{odfe}: *Costo de transporte* PE_{ode}: *Porcentaje de perdida asociado al empaque* TF_{fe}: *Capacidad del empaque* SO: *Sistema de conservación disponible en el origen* SD: *Sistema de conservación disponible en el destino*	Trayectos origen destino	$OBJ2$: Minimización Costos $OBJ1$: Minimización huella hídrica APE: *Consumo de agua dado por perdidas de fruta en los trayectos* $AE1$ *y* $AE2$: *Consumo de agua en el lavado y elaboración de empaques*
Sistema de	Cualitativa	CX_{jsn}: *Costo fijo de la central*	Central mayorista	$OBJ2$: Minimización Costos

refrigeración		CY_{ksn}: *Costo fijo de la central* β_{ofs}: *Porcentaje de desperdicio por almacenamiento* TN_{ods}: *Porcentaje de pérdida por temperatura* EFO: *Tipo de empaque disponibles*	Central de acopio Fincas Trayecto origen destino	$OBJ1$: Minimización huella hídrica APE: *Consumo de agua dado por perdidas de fruta en los trayectos* $APMC$: *Consumo de agua dado por perdidas de fruta por manipulación en la central*

Con base en los resultados presentados en la Tabla XXVI se definieron tres asimetrías en capacidades logísticas a trabajar en la presente investigación, una de ellas pertenece a las capacidades cuantitativas y las otras dos a las capacidades cualitativas, los resultados fueron los siguientes:

- **Asimetría en centros de almacenamiento a nivel inter-eslabón**

La primera asimetría analizar es con relación al número de centrales que tienen dos eslabones de la cadena, dicha asimetría pertenece a las Capacidades cuantitativas; para este caso los dos eslabones considerados son las centrales de acopio y las centrales mayoristas. Para esto se plantean dos escenarios, en el primero se varía el número de centrales de acopio a abrir y el número de centrales mayoristas se deja sin restricción para que el modelo determine el número a abrir, mientras en el segundo escenario se hace, al contrario, controlando el número de centrales mayoristas. Para este caso se busca representar el efecto de tener mayor capacidad en un eslabón que en el otro, por esta razón la variación se hace de forma incremental, es decir en ambos escenarios se inicia con el menor número de centrales a abrir y se va aumentando en cada corrida.

- **Asimetría en la disponibilidad de sistemas de refrigeración a nivel inter-eslabón**

Los sistemas de refrigeración son fundamentales a la hora de garantizar la seguridad alimentaria de los alimentos y la disponibilidad estos en casos de déficit, como el que aborda el modelo, por esta razón es fundamental mantener la cadena de frío en todas las etapas implicadas, por lo que desde productores hasta distribuidores deben poner especial atención en mantenerla y así garantizar la calidad y seguridad de un alimento, desde su origen hasta su consumo. Sin embargo, en la actualidad en el caso específico de Cundinamarca pocos eslabones cuentan con sistemas de refrigeración que permitan la conservación de los alimentos, principalmente en la parte de los productores es algo poco habitual. Por esta razón se considera una asimetría bastante interesante a analizar, sobre todo por su conexión con las pérdidas de alimento y esta a su vez con la sostenibilidad en la dimensión social en relación con la disponibilidad de alimento.

Por esta razón tomando como punto de partida uno de los supuestos del modelo, algunos productores cuentan con sistemas de refrigeración y otros no, se plantean dos escenarios para la representación de esta asimetría, el primero enfocado en limitar el número de centrales de acopio refrigeradas a abrir mientras las centrales mayoristas pueden abrir con cualquiera de los dos sistemas, para esto se hace una variación incremental en el número de centrales a abrir. El segundo escenario funciona de manera similar, pero con relación a la variación de centrales mayoristas refrigeradas a abrir.

- **Asimetría en el tipo de empaque utilizado a nivel inter-eslabón**

La última asimetría de capacidades cualitativas que se aborda en la investigación es con relación a la variación de empaques que se utiliza a lo largo de la SC, es habitual ver que se utilicen empaques inadecuados para los productos y que a media que los alimentos van aguas abajo en la SC suelen pasar por diversos procesos de reempaque dado que no todos los eslabones tienen la misma disponibilidad. Para la representación de esta

asimetría se hace la priorización de empaques, con relación al costo que este tiene asociado, para esto se reduce en valor del empaque o empaques priorizados a comparación de los demás, para verificar si al ser más económico se busca homogenizar el tipo de empaque utilizado.

Con base a las asimetrías definidas anteriormente y a los escenarios establecidos para cada una de estas (cuando aplica) se prosiguió a definir las variaciones a realizar en el modelo inicial para la representación de estas, los resultados obtenidos de esta definición se presentan a continuación:

Tabla XXVII. Variaciones del modelo según asimetrías

	Asimetría	Tipo	Escenario	Descripción del escenario	Ecuación(es) a incluir
1	En capacidad de apertura para almacenamiento	Cuantitativa	Limitar número de centrales de acopio	Se limita la cantidad de centrales de acopio que pueden ser abiertas, reduciendo la capacidad de apertura de dicho eslabón. Se debe garantizar cumplir con de demanda mínima que tienen los clientes de este eslabón.	**Ecuación 7.1** $\sum_{j\in J}\sum_{s\in SO\{j\}}\sum_{n\in NOS\{j,s\}} X_{jsn} = n$ *n = número de centrales de acopio a abrir (varia incrementalmente)*
			Limitar número de centrales de mayoristas	Se limita la cantidad de centrales mayoristas que pueden ser abiertas, reduciendo la capacidad de apertura de dicho eslabón. Se debe garantizar cumplir con de demanda mínima que tienen los clientes de este eslabón.	**Ecuación 11.1** $\sum_{k\in K}\sum_{s\in SO\{k\}}\sum_{n\in NOS\{k,s\}} Y_{ksn} = n$ *n = número de centrales mayoristas a abrir (varia incrementalmente)*
2	En sistemas de refrigeración	Cualitativa	Limitar la apertura de centrales de acopio refrigeradas	Se limita la cantidad de centrales de acopio refrigeradas a abrir, mientras las centrales mayoristas podrán abrir con cualquiera de los dos sistemas.	**Ecuación 6sr.1** $\sum_{j\in J}\sum_{s\in SO\{j\}}^{s=1}\sum_{n\in NOS\{j,s\}}^{s=1} X_{jsn} = n$ *n = número de centrales de acopio refrigeradas a abrir (varia incrementalmente)*
			Limitar la apertura de centrales de mayoristas refrigeradas	Se limita la cantidad de centrales mayoristas refrigeradas a abrir, mientras las centrales de acopio podrán abrir con cualquiera de los dos sistemas.	**Ecuación 12sr.1** $\sum_{k\in K}\sum_{s\in SO\{k\}}^{s=1}\sum_{n\in NOS\{k,s\}}^{s=1} Y_{ksn} = n$ *n = número de centrales mayoristas refrigeradas a abrir (varia incrementalmente)*
5	En tipos de empaques	Cualitativa	Priorizar tipos de empaque	Se priorizan ciertos tipos de empaque para ser utilizados en la cadena, lo anterior se hace haciéndolos menos costos que los otros.	-Parámetro: $PE3_{\{o,d,f,e\}} = PE4_{\{o,d,f,e\}} * DELTA_{\{e\}}$

6 ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LA EXISTENCIA DE ASIMETRÍAS DE CAPACIDADES LOGÍSTICAS EN LA SOSTENIBILIDAD DE LA CADENA

Una vez se tuvieron todos los datos correspondientes al caso específico de la SC de frutas para Cundinamarca se estructuró la data de acuerdo con lo establecido en el modelo planteado en Capítulo 4 y se ejecutó, en este no se incluyó ninguna variación con relación a las asimetrías, es decir que los resultados obtenidos corresponden al escenario actual del caso de estudio. Posterior a esto se modelaron y ejecutaron los escenarios diseñados para cada una de las asimetrías planteadas en el capítulo anterior y a continuación se presentan los resultados obtenidos.

6.1 Análisis de asimetría en capacidad de almacenamiento a nivel inter-eslabón

Como se tienen tres funciones objetivo relacionadas con la sostenibilidad se hace el análisis individual de los resultados obtenidos para cada una de estas funciones, los resultados obtenidos son los siguientes:

- **Función Objetivo: Minimización de la huella hídrica de la SC**

Se hallaron las posibles combinaciones entre el número de CA y de CM a abrir de acuerdo con los resultados obtenidos en cada una de las corridas, los resultados se muestran en la Tabla XXVIII, allí se puede observar como el mejor comportamiento de esta medida de desempeño en particular se da cuando se tiene igualdad entre la cantidad de centrales de acopio y la cantidad de las centrales mayoristas, además se observa que a medida que aumenta la diferencia entre el número de CA y CM a abrir aumenta de manera paulatina la huella hídrica generada, sin embargo una vez el número de CM supera el número de CA se obtiene un incremento considerable en esta medida de desempeño obteniendo el peor comportamiento.

Lo anterior permite evidenciar que la huella hídrica si se ve influenciada por las asimetrías presentadas en el número de infraestructuras disponibles en los diferentes eslabones, además se puede observar que es mucho más sensible cuando el número de CM a abrir es mayor al de CA, ya que la variación en relación con el comportamiento cuando hay igualdad es superior al 3%, mientras cuando pasa en el sentido contrario a pesar de que la huella hídrica se incrementa lo hace en proporciones menores al 0.3%.

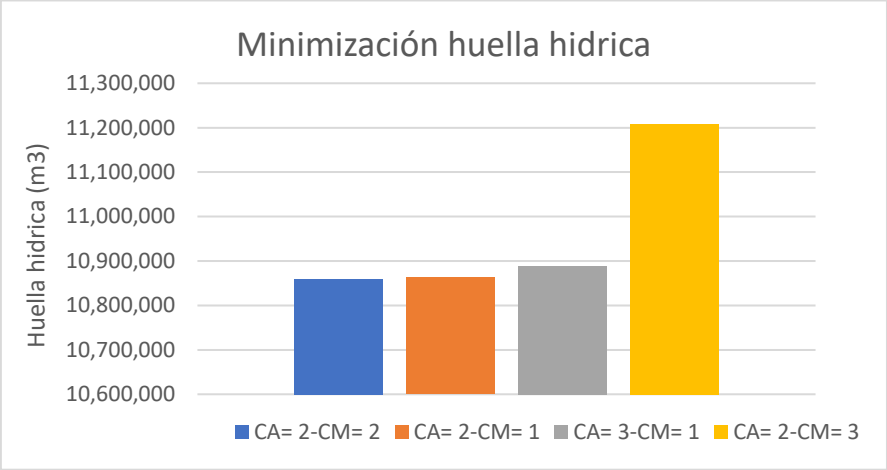
Tabla XXVIII. Asimetría 1 - FO: Minimizar huella hídrica

Id	No. CA	No. CM	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
CA= 2-CM= 2	2	2	0	CA=CM	10,858,8	$81,052,497,229. 0	9	0.00%	0.00%	0.00%
CA= 2-CM= 1	2	1	1	CA>=CM	10,863,2	$81,046,762,265.1	9	0.04%	-0.01%	0.00%
CA= 3-CM= 1	3	1	2	CA>=CM	10,888,9	$81,129,395,034.1	9	0.28%	0.09%	0.00%
CA= 2-CM= 3	2	3	1	CA=<CM	11,208,4	$82,823,554,868.7	10	3.12%	2.14%	10.00%

En la Ilustración 13 se observa el comportamiento descrito anteriormente de manera gráfica, es llamativo el incremento que se produce cuando hay 2 CA y 3 CM, caso representado por la columna amarilla, ya que a pesar

de solo haber 1 unidad de diferencia entre el número de instalaciones de CA y CM el incremento con relación al resultado de la columna gris es de 320 m^3.

Ilustración 13. Asimetría 1 - FO: minimizar huella hídrica



- **Función Objetivo: Maximización cliente atendidos en la SC**

Maximizar el número de clientes atendidos es la función objetivo que mayor número de combinaciones entre CA y CM genera, sin embargo, al analizar los resultados presentados en la siguiente tabla, se observa que el óptimo no varía, para cada una de las soluciones halladas el número de clientes se mantiene constante en 11. Dentro de las soluciones obtenidas se encuentran 2 soluciones de igualdad en el número de CA y de CM y 4 asimétricas, dentro de estas últimas predomina las que tienen solo 1 unidad de diferencia entre la cantidad de centrales de ambos tipos, de igual forma se evidencia que se tienen dos soluciones asimetrías en donde la cantidad de CM es mayor a la cantidad de CA y dos soluciones en las que la cantidad de CA es mayor

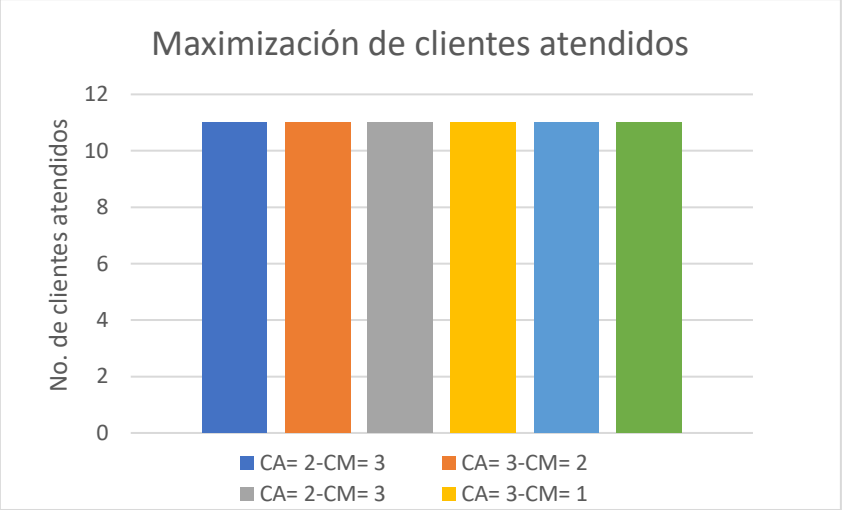
Tabla XXIX. Asimetría 1 - FO: maximizar número de clientes atendidos

Id	No. CA	No. CM	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
CA= 2-CM= 3	2	3	1	CA =<CM	13,996,3	$ 97,621,774,524.3	11	0.00%	0.00%	0.00%
CA= 3-CM= 2	3	2	1	CA >=CM	13,680,3	$ 96,030,187,587.3	11	-2.31%	-1.66%	0.00%
CA= 2-CM= 3	2	3	1	CA =<CM	14,031,0	$ 98,029,206,774.2	11	0.25%	0.42%	0.00%
CA= 3-CM= 1	3	1	2	CA >=CM	13,609,9	$ 94,253,863,909.8	11	-2.84%	-3.57%	0.00%
CA= 2-CM= 2	2	2	0	CA = CM	13,804,1	$ 96,131,386,593.6	11	-1.39%	-1.55%	0.00%
CA= 3-CM= 3	3	3	0	CA = CM	14,504,8	$ 99,727,067,218.1	11	3.51%	2.11%	0.00%

En la Ilustración 14 se muestran las 6 soluciones encontradas al optimizar la maximización de clientes atendidos, sin embargo, tal como se mencionó anteriormente de manera grafica también se puede observar que la menos

en esta medida de desempeño no hay variación del optimo, lo cual nos podría llevar a pensar que las asimetrías en el número de centrales a abrir no tiene mayor influencia en la cantidad de clientes que se atienden, se recomienda para futuras investigaciones realizar la verificación de esta hipótesis con un mayor número de centrales de acopio como mayoristas a abrir.

Ilustración 14. Asimetría 1 - FO: maximizar número de clientes atendidos



- **Función Objetivo: Minimización costos asociados a la SC**

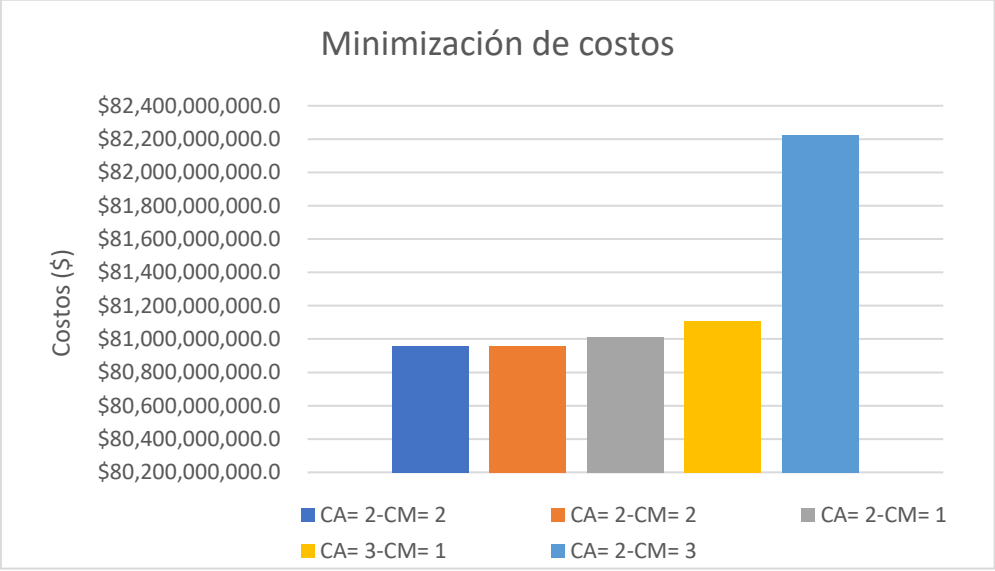
Al minimizar los costos asociados a la configuración de la cadena se logró evidenciar que de manera similar a los resultados obtenidos en la minimización de la huella hídrica los mejores resultados se obtienen cuando el número de centrales mayoristas es igual al número de centros de acopio, de igual forma a medida que aumenta la diferencia entre la cantidad de CA y la cantidad de CM se genera un aumento en los costos generados, sin embargo este aumento es inferior al 0.5% en comparación a cuando hay igualdad en los casos en los que se tiene mayor cantidad de CA, en caso contrario cuando el número de mayoristas excede el número de centrales de acopio aun cuando sigue siendo una unidad de diferencia los costos aumentan casi en un 2%, lo que permite pensar que de manera similar a la huella hídrica se es más sensible cuando el número de CM es mayor al de CA.

Tabla XXX. Asimetría 1 - FO: minimizar costos

Id	No. CA	No. CM	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
CA= 2-CM= 2	2	2	0	CA = CM	10,934,202.2	$80,958,789,508.7	9	0.00%	0.00%	0.00%
CA= 2-CM= 2	2	2	0	CA =CM	10,926,317.2	$80,958,789,508.7	9	-0.07%	0.00%	0.00%
CA= 2-CM= 1	2	1	1	CA >= CM	10,882,603.2	$81,011,981,726.2	9	-0.47%	0.07%	0.00%
CA= 3-CM= 1	3	1	2	CA >= CM	10,962,719.7	$81,108,335,922.2	9	0.26%	0.18%	0.00%
CA= 2-CM= 3	2	3	1	CA =< CM	11,347,983.5	$82,226,563,212.7	9	3.65%	1.54%	0.00%

En la Ilustración 15 se evidencia de manera grafica el comportamiento de los costos en relación a las asimetrías en el número de centrales entre dos eslabones (CA y CM), la columna azul oscuro representa la configuración con menores costos asociados y la azul claro la configuración con mayores costos, una con $80,958,789,508.7 y la otra con $82,226,563,212.7 respetivamente, resulta llamativo que la columna gris y la azul claro solo tengan una unidad de diferencia sin embargo en el primer caso hay más centrales de acopio que mayoristas y en el segundo sucede al contrario, con un aumento considerable en los costos asociados
Lo anterior nos podría llevar a concluir que tal como se esperaba la igualdad en el número de centrales de CA y las de CM tiene un efecto positivo con relación a los costos en los que incurre la cadena, de igual forma se evidencia que la existencia de asimetría generada por mayor número de CM que de CA generan efectos negativos frente a los costos, esto se da dado que los costos asociados a las centrales mayoristas son mayores a los costos asociados a las centrales de acopio.

Ilustración 15. Asimetría 1 - FO: minimizar costos



6.1.1 Análisis de dominancia para las soluciones

Luego de realizar el análisis detallado por cada una de las funciones objetivos establecidas se hizo un análisis de dominancia general, para esto se tomaron todas las diferentes configuraciones halladas con relación al número de CA y el numero CM y se realizó el respectivo análisis, para este se partió del principio de dominancia, el cual plantea que una solución domina a otra cuando:

- Es mejor o igual en cada una de las medidas de desempeño evaluadas.
- Es significativamente mejor al menos en una de las medidas de desempeño evaluadas.

De esta forma se comparó cada una de las soluciones frente a las demás y se encontró que para esta primera asimetría se tienen 6 soluciones dominantes. El análisis que se realizó se presenta en la Tabla XXXI.

Tabla XXXI. Asimetría 1 - Análisis de dominancia en las soluciones

No.	Id	Función objetivo	No. CA	No. CM	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Dominada por
1	CA= 2-CM= 2	Minimizar huella hídrica	2	2	0	CA=CM	10,858,806	$81,052,497,229.4	9	
2	CA= 2-CM= 1	Minimizar huella hídrica	2	1	1	CA>=CM	10,863,263	81,046,762,265.1	9	
3	CA= 2-CM= 1	Minimizar el costo	2	1	1	CA >= CM	10,882,603	$81,011,981,726.2	9	
4	CA= 3-CM= 1	Minimizar huella hídrica	3	1	2	CA>=CM	10,888,920	$81,129,395,034.1	9	1,2,3
5	CA= 2-CM= 2	Minimizar el costo	2	2	0	CA =CM	10,926,317	$80,958,789,508.7	9	
6	CA= 2-CM= 2	Minimizar el costo	2	2	0	CA = CM	10,934,202	$80,958,789,508.7	9	5
7	CA= 3-CM= 1	Minimizar el costo	3	1	2	CA >= CM	10,962,720	$81,108,335,922.2	9	1,2,3
8	CA= 2-CM= 3	Minimizar huella hídrica	2	3	1	CA=<CM	11,208,457	82,823,554,868.7	10	
9	CA= 2-CM= 3	Minimizar el costo	2	3	1	CA =< CM	11,347,984	$82,226,563,212.7	9	1,2,3,4,5,6,7
10	CA= 3-CM= 1	Maximizar clientes atendidos	3	1	2	CA >=CM	13,609,936	$94,253,863,909.8	11	
11	CA= 3-CM= 2	Maximizar clientes atendidos	3	2	1	CA >=CM	13,680,391	$96,030,187,587.3	11	10
12	CA= 2-CM= 2	Maximizar clientes atendidos	2	2	0	CA = CM	13,804,120	$96,131,386,593.6	11	10,11
13	CA= 2-CM= 3	Maximizar clientes atendidos	2	3	1	CA =<CM	13,996,376	$97,621,774,524.3	11	10,11,12
14	CA= 2-CM= 3	Maximizar clientes atendidos	2	3	1	CA =<CM	14,031,076	$98,029,206,774.2	11	10,11,12,13
15	CA= 3-CM= 3	Maximizar clientes atendidos	3	3	0	CA = CM	14,504,823	$99,727,067,218.1	11	10,11,12,13,14

6.1.2 Soluciones en frontera de pareto

Una vez encontradas las soluciones dominantes se define este como el conjunto de soluciones optimas donde ninguna de las medidas de desempeño puede ser mejorada sin empeorar al menos uno de los restantes, a este conjunto de soluciones de Pareto optimas se le denomina conjunto óptimo de Pareto.

Ahora se hace necesario analizar el conjunto óptimo de pareto con base a las características de las soluciones que lo conforman, por ejemplo, se encontró que dos soluciones tienen una diferencia de 0 unidades entre el número de CA y el número de CM, tres soluciones tienen una diferencia de una unidad y solo una solución tiene una diferencia de 2 unidades. Con relación a la comparación tres soluciones presentan condiciones de desigualdad dado un mayor número de centrales acopio frente al número de centrales mayoristas, dos soluciones presentan condiciones de igualdad y solo una solución muestra condición de desigualdad donde es mayor el número de centrales mayoristas. Finalmente, frente al número de respuestas del conjunto óptimo de pareto proporcionadas por cada una de las funciones objetivo, se encontró que tres soluciones provienen de la minimización de la huella hídrica, dos de la minimización de los costos y una de la maximización del número de clientes atendidos.

Tabla XXXII. Asimetría 1 - Conjunto óptimo de Pareto

No. Solución	Id	Función objetivo	No. CA	No. CM	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
1	CA= 2-CM= 2	Minimizar huella hídrica	2	2	0	CA=CM	10,858,806	$81,052,497,229.4	9
2	CA= 2-CM= 1	Minimizar huella hídrica	2	1	1	CA>=CM	10,863,263	$81,046,762,265.1	9
3	CA= 2-CM= 1	Minimizar el costo	2	1	1	CA >= CM	10,882,603	$81,011,981,726.2	9
5	CA= 2-CM= 2	Minimizar el costo	2	2	0	CA =CM	10,926,317	$80,958,789,508.7	9
8	CA= 2-CM= 3	Minimizar huella hídrica	2	3	1	CA=<CM	11,208,457	$82,823,554,868.7	10
10	CA= 3-CM= 1	Maximizar clientes atendidos	3	1	2	CA >=CM	13,609,936	$94,253,863,909.8	11

6.2 Análisis de asimetrías en la disponibilidad de sistemas de refrigeración a nivel inter-eslabón

Luego de definir la asimetría en relación a las capacidades logísticas cualitativas específicamente la relacionada con los sistemas de refrigeración que los eslabones pueden tener, se optó por representar dicha asimetría en dos de los eslabones intermedios de la cadena, para poder visualizar como la diferencia entre el número de centrales de acopio refrigeradas y el número de centrales mayoristas refrigeradas influenciaba en la sostenibilidad de la cadena, específicamente para las tres medidas de desempeño seleccionadas. De manera similar al análisis realizado para la asimetría abordada anteriormente, se realizó el análisis para la asimetría en cuestión, partiendo del análisis individual de los resultados halados para cada una de las medidas, luego haciendo un análisis de dominancia de las soluciones contradas y finalmente se hallaron las soluciones de la frontera de pareto. los resultados obtenidos se presentan a continuación:

- **Función Objetivo: Minimización de la huella hídrica de la SC**

Al correr el modelo sin modificaciones en relaciones a la representación de las asimetrías de capacidades se evidencia que la configuración optima de la cadena esta dada cuando se tienen 2 centrales de acopio refrigeradas y 2 centrales mayoristas refrigeradas, de igual forma en la Tabla XXXIII se observa que la menor huella hídrica se da cuando se tiene dicha configuración es decir que la cantidad de infraestructuras refrigeradas para ambos eslabones es la misma, de igual forma a medida la diferencia entre la cantidad de ambos tipos de centrales aumenta también aumenta la huella hídrica generada.

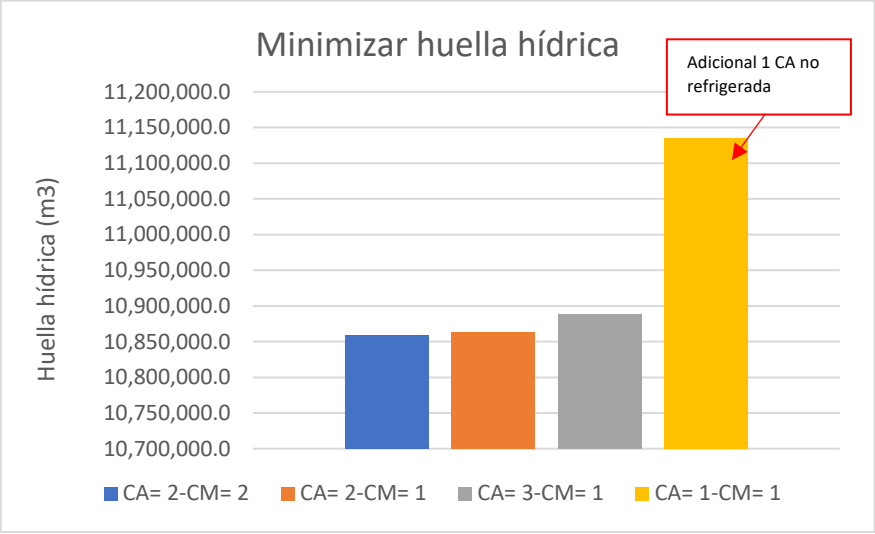
Tabla XXXIII. Asimetría 2 - FO: Minimizar huella hídrica

Id	No. CA refrigerada	No. CM refrigerado	No. CA no refrigerada	No. CM no refrigerado	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
CA= 2-CM= 2	2	2	0	0	0	CA =CM	10,858,806.4	$81,052,497,229.4	9	0.00%	0.00%	0.00%
CA= 2-CM= 1	2	1	0	0	1	CA> =CM	10,863,263.3	$81,046,762,265.1	9	0.04%	-0.01%	0.00%
CA= 3-CM= 1	3	1	0	0	2	CA> =CM	10,888,919.5	$81,129,395,034.1	9	0.28%	0.09%	0.00%
CA= 1-CM= 1	1	1	1	0	0	CA = CM	11,135,262.8	$82,262,562,844.1	9	2.48%	1.47%	0.00%

En la siguiente ilustración se puede observar de manera mas detallada lógica de relación entre el aumento de la diferencia de numero de CA y CM con el aumento en la huella hídrica que se planteó anteriormente, a excepción del último resultado que esta por fuera de dicha lógica, en este el número de centrales de CA y CM son iguales genera un aumento del 20% con relación al mejor resultado, esto se da porque el número de centrales de acopio está por

debajo de del optimo requerido por lo que se debe abrir una CA no refrigerada para suplir la demanda de capacidad y aunque en los otros resultados en número de CM está por debajo del optimo inicial se evidencia que el sistema es más sensible en relación a la capacidad requerida de las CA.

Ilustración 16. Asimetría 2 - FO: Minimizar huella hídrica



- **Función Objetivo: Maximización cliente atendidos en la SC**

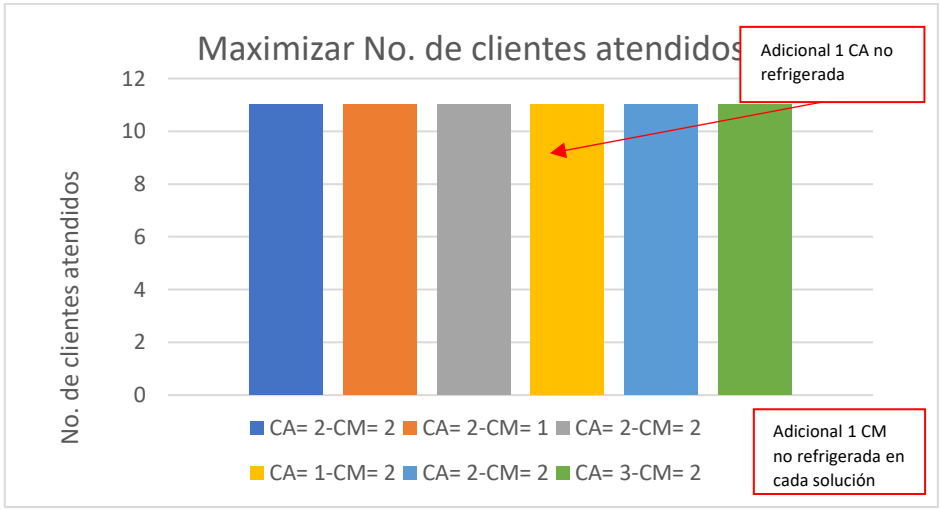
De manera similar a la asimetría anterior, de acuerdo a los resultados obtenidos se observa que el número de clientes atendidos no se ve influenciado por las asimetrías en capacidades logísticas, se podría llegar a pensar que al ser un escenario de déficit independiente del numero de CA y de CM el modelo prioriza la entrega de producto a los clientes finales, para lograr cumplir con la demanda mínima.

Tabla XXXIV. Asimetría 2 - FO: Maximizar número de clientes atendidos

Id	No. CA refrigerada	No. CM refrigerado	No. CA no refrigerada	No. CM no refrigerado	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
CA= 2-CM= 2	2	2	0	1	0	CA =CM	14,031,075.6	$98,029,206,774.2	11	7.6%	6.1%	0.0%
CA= 2-CM= 1	2	1	0	1	1	CA >= CM	12,958,553.8	$92,020,230,835.5	11	0.0%	0.0%	0.0%
CA= 2-CM= 2	2	2	0	1	0	CA =CM	13,995,414.3	$98,216,602,689.8	11	7.4%	6.3%	0.0%
CA= 1-CM= 2	1	2	1	1	1	CA =< CM	13,415,776.4	$94,397,059,657.7	11	3.4%	2.5%	0.0%
CA= 2-CM= 2	2	2	0	1	0	CA =CM	13,485,948.8	$94,566,578,521.8	11	3.9%	2.7%	0.0%
CA= 3-CM= 2	3	2	0	1	1	CA >= CM	13,721,417.4	$94,475,653,016.7	11	5.6%	2.6%	0.0%

En la Ilustración 17 se observa como en cada uno e los 6 resultados encontrados al maximizar el número de clientes atendidos, el valor se mantiene establece en 11 clientes, independientes si la diferencia entre el numero entre CA y CM es de 0 o de 1 unidad.

Ilustración 17. Asimetría 2 - FO: Maximizar número de clientes atendidos

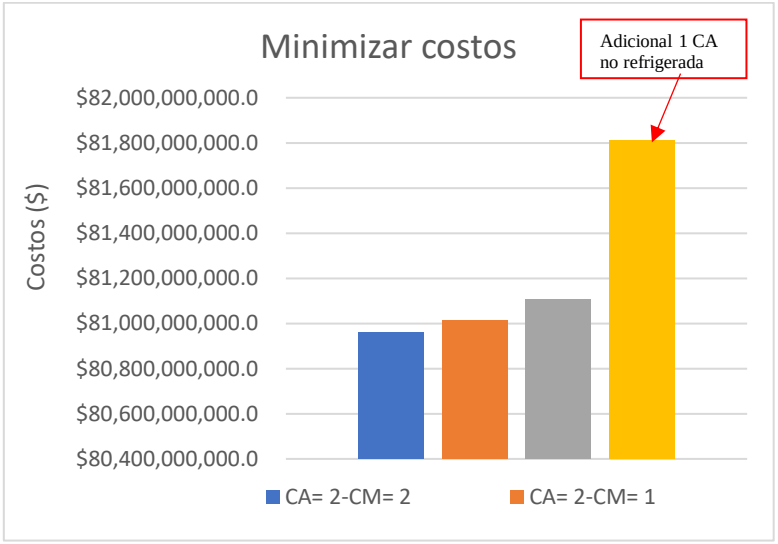


- **Función Objetivo: Minimización costos asociados a la SC**

Tabla XXXV. Asimetría 2 - FO: Minimizar costos asociados a la SC

Id	No. CA refrigerada	No. CM refrigerado	No. CA no refrigerada	No. CM no refrigerado	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
CA= 2-CM= 2	2	2	0	0	0	CA =CM	10,926,317.2	$80,958,789,508.7	9	0.0%	0.0%	0.0%
CA= 2-CM= 1	2	1	0	0	1	CA >= CM	10,882,603.2	$81,011,981,726.2	9	-0.4%	0.1%	0.0%
CA= 3-CM= 1	3	1	0	0	2	CA >= CM	10,962,719.7	$81,108,335,922.2	9	0.3%	0.2%	0.0%
CA= 1-CM= 1	1	1	1	0	0	CA =CM	11,276,432.3	$81,809,705,670.0	9	3.1%	1.0%	0.0%

Ilustración 18. Asimetría 2 - FO: Minimizar costos asociados a la SC



6.2.1 Análisis de dominancia para las soluciones

Para esta función objetivo se encontraron 14 posibles soluciones de estas la mitad corresponde a soluciones donde el numero de CA refrigeradas es igual al numero de CM refrigeradas, en 6 de las resaltantes se tiene mayor numero de CA que de CM y solo en una solución se da el caso contrario. Vale la pena resaltar que en varias soluciones de igualdad entre numero de instalaciones de CA y de CM no se obtienen los mejores resultados para la medida de desempeño en cuestión ya que suelen estar por debajo del número óptimo de CA hallados inicialmente, por lo que se debe tener en cuenta el análisis de dominancia para así poder seleccionar las soluciones que están en la Frontera de pareto.

Tabla XXXVI. Asimetría 2 - Análisis de dominancia en las soluciones

No. Solución	Id	Función objetivo	No. CA refrigerada	No. CM refrigerado	No. CA no refrigerada	No. CM no refrigerado	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Dominada por
1	CA= 2-CM= 2	Minimizar huella hidrica	2	2	0	0	2	CA =CM	10,858,806	$ 81,052,497,229.40	9	
2	CA= 2-CM= 1	Minimizar huella hidrica	2	1	0	0	2	CA> =CM	10,863,263	$ 81,046,762,265.10	9	
3	CA= 2-CM= 1	Minimizar el costo	2	1	0	0	2	CA >= CM	10,882,603	$ 81,011,981,726.20	9	
4	CA= 3-CM= 1	Minimizar huella hidrica	3	1	0	0	3	CA> =CM	10,888,920	$ 81,129,395,034.10	9	1,2,3
5	CA= 2-CM= 2	Minimizar el costo	2	2	0	0	2	CA =CM	10,926,317	$ 80,958,789,508.70	9	
6	CA= 3-CM= 1	Minimizar el costo	3	1	0	0	3	CA >= CM	10,962,720	$ 81,108,335,922.20	9	1,2,3,5
7	CA= 1-CM= 1	Minimizar huella hidrica	1	1	1	0	0	CA = CM	11,135,263	$ 82,262,562,844.10	9	1,2,3,4,5,6
8	CA= 1-CM= 1	Minimizar el costo	1	1	1	0	0	CA =CM	11,276,432	$ 81,809,705,670.00	9	1,2,3,4,5,6

9	CA= 2-CM= 1	Maximizar clientes atendidos	2	1	0	1	2	CA >= CM	12,958,554	$ 92,020,230,835.50	11	
10	CA= 1-CM= 2	Maximizar clientes atendidos	1	2	1	1	0	CA =< CM	13,415,776	$ 94,397,059,657.70	11	9
11	CA= 2-CM= 2	Maximizar clientes atendidos	2	2	0	1	2	CA =CM	13,485,949	$ 94,566,578,521.80	11	9,10
12	CA= 3-CM= 2	Maximizar clientes atendidos	3	2	0	1	3	CA >= CM	13,721,417	$ 94,475,653,016.70	11	9,10
13	CA= 2-CM= 2	Maximizar clientes atendidos	2	2	0	1	2	CA =CM	13,995,414	$ 98,216,602,689.80	11	9,10,11,12
14	CA= 2-CM= 2	Maximizar clientes atendidos	2	2	0	1	2	CA =CM	14,031,076	$ 98,029,206,774.20	11	9,10,11,13

6.2.2 Soluciones en frontera de pareto

Al realizar el respectivo análisis de dominancia se encontraron 5 soluciones en la frontera de pareto, se destaca que en tres de estas soluciones son del tipo CA> =CM en donde se cuenta con una central de acopio refrigerada mas que las que se tienen de mayoristas, esto se puede dar gracias a la necesidad de iniciar la cadena de frio por lo que tener una mayor capacidad de CA permite recibir una mayor cantidad de producto y posterior a esto enviar de manera directa parte de estos productos y la otra parte a las CM disponibles. Lo anterior permite cumplir con la demanda que tienen los clientes finales sobre las CA y además hacerlo con productos refrigerados lo que reduce las probabilidades de perdidas.

Tabla XXXVII. Asimetría 2 - Conjunto óptimo de Pareto

No. Solución	Id	Función objetivo	No. CA refrigerada	No. CM refrigerado	No. CA no refrigerada	No. CM no refrigerado	Diferencia |CA-CM|	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
1	CA= 2-CM= 2	Minimizar huella hídrica	2	2	0	0	0	CA =CM	10,858,806	$ 81,052,497,229.40	9
2	CA= 2-CM= 1	Minimizar huella hídrica	2	1	0	0	1	CA> =CM	10,863,263	$ 81,046,762,265.10	9
3	CA= 2-CM= 1	Minimizar el costo	2	1	0	0	1	CA >= CM	10,882,603	$ 81,011,981,726.20	9
5	CA= 2-CM= 2	Minimizar el costo	2	2	0	0	0	CA =CM	10,926,317	$ 80,958,789,508.70	9
9	CA= 2-CM= 1	Maximizar clientes atendidos	2	1	0	1	1	CA >= CM	12,958,554	$ 92,020,230,835.50	11

6.3 Análisis de asimetría en el tipo de empaque utilizado a nivel inter-eslabón

La asimetría planteada en relación a los empaques usados en la SC se plantea con relación a la disponibilidad o no disponibilidad de empaques en la cadena, desde el planteamiento inicial del modelo la data contempla que cada nodo tiene disponible cada uno de los empaques en los que se pueden transportar los productos que ofrece, de esta forma para una corrida base se corre el modelo con cada una de las funciones objetivo de manera libre, es decir sin priorizar ningún empaque, luego se hacen diferentes corridas penalizando ciertos tipos de empaques en relación a la perdida de alimentos asociadas a este (influye en el costo) y de esta forma se prioriza la disponibilidad de ciertos empaques en cada uno de los nodos que los manejan. Los resultados obtenidos se muestran continuación

- **Función Objetivo: Minimización de la huella hídrica de la SC**

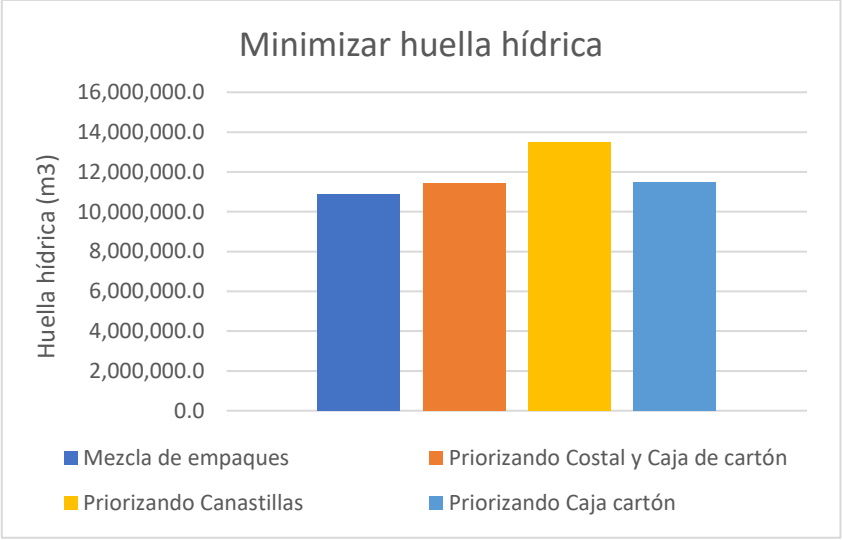
En la siguiente tabla se observa como el mejor resultado de huella hídrica se obtiene en un escenario libre en donde se cuenta con absoluta disponibilidad de empaques en el sistema, en este se opta por enviar producto en cada uno de los empaques disponibles, en mayor medida en el uso de canastilla y en menor medida en costal, las diferencias con los demás resultados es superior al 5% para esta medida de desempeño, sin embargo resulta relevante que se tenga un incrementó casi del 20% cuando se priorizan las canastillas aun cuando en el primer escenario el mayor flujo es de hecho en canastillas, la diferencia de un resultado a otro se da principalmente en que la cantidad de producto trasportada en cajas en el resultado 1 pasa prácticamente a trasportarse en canastilla en la solución 4, teniendo en cuenta que la canastilla fresera solo sirve para transportar mora y fresa se evidencia que es más sostenible a nivel de huella hídrica utilizar cajas que canastillas para estos productos, esto se puede deber a que dadas las capacidades de estas canastillas se requieren varias unidades y están deben ser lavadas después de cada uso, mientras las cajas tienen una mayor capacidad y adicional solo tiene asociado su huella hídrica de elaboración además tienen la opción de ser recicladas.

Tabla XXXVIII. Asimetría 3 - FO: Minimizar huella hídrica

	Id	Ton E1 (canastilla carullera)	Ton E2 (canastilla fresera)	Ton E3 (Costal)	Ton E4 (Caja)	Comparación empaques	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
1	Disponibilidad de empaques	51,162.9	15,519.8	218.8	10,311.8	E1>=E2>=E4>=E3	10,858,806.4	81,052,497,229.4	9	0.0%	0.0%	0.0%
2	Priorizando Costal y Caja de cartón	0.0	0.0	11,462.4	64,279.6	E4>=E3>=E2=E1	11,444,861.2	82,408,200,326.3	9	5.1%	1.6%	0.0%
3	Priorizando Caja cartón	131.8	0.0	0.0	75,313.6	E4>=E1>=E2=E3	11,490,521.6	82,401,215,635.5	9	5.5%	1.6%	0.0%
4	Priorizando Canastillas	46,057.6	25,423.4	272.3	0.0	E1>=E2>=E3>=E4	13,504,460.6	97,539,083,297.4	9	19.6%	16.9%	0.0%

En la Ilustración 19 se observa como la mayor huella hídrica corresponde a la priorización de canastillas, tanto carullera como fresera, de acuerdo a la tabla anterior se evidencia que la principal diferencia entre el mejor resultado y el peor es que la cantidad de productos empacados en caja una vez se priorizan las canastillas pasan a ser empacado en canastillas freseras, por lo que la diferencia se limita a la mor ay la fresa que son las frutas que utilizan este tipo de canastilla, se deberá realizar un análisis más exhaustivo para determinar si dado el volumen transportado de estos tipos de fruta y la capacidad especifica de este tipo de canastilla, resulta mas optimo empacar en cajas, aun cuando son de e un solo uso, que en canastillas que tiene una huella hídrica considerable en relación a su elaboración y que además requiere de un proceso de lavado, por ser de varios usos. Para las demás opciones de priorización se encontraron resultados similares al optimo con un aumento inferior al 6%.

Ilustración 19. Asimetría 3 - FO: Minimizar huella hídrica



- **Función Objetivo: Maximización cliente atendidos en la SC**

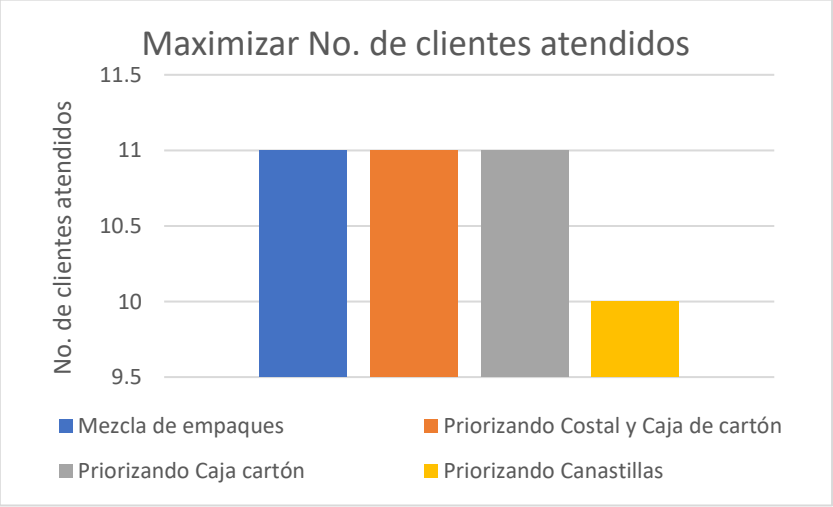
El numero de clientes atendidos permanece estable en 11 clientes para 4 de las soluciones halladas, en cada una de estas la canastilla fresera es el empaque donde se transporta menos producto, de acuerdo con la columna “Comparación empaques” cuando el empaque 2 se mueve de posición hacia los empaques con mayor numero toneladas asociadas, el numero d clientes atendidos se reduce a 10.

Tabla XXXIX. Asimetría 3 - FO: Maximizar número de clientes atendidos

Id	Ton E1 (canastilla carullera)	Ton E2 (canastilla fresera)	Ton E3 (Costal)	Ton E4 (Caja)	Comparación empaques	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
Disponibilidad de empaques	28,638.2	7,036.6	17,832.5	21,640.0	E1>=E4>=E3>=E2	14,031,075.6	98,029,206,774.2	11	0.0%	0.0%	0.0%
Priorizando Costal y Caja de cartón	3,615.4	82.2	12,940.7	40,980.0	E4>=E3>=E1>=E2	25,901,118.4	163,442,395,015.4	11	45.8%	40.0%	0.0%
Priorizando Caja cartón	1,359.5	33.3	737.2	56,927.4	E4>=E1>=E3>=E2	25,445,935.3	160,165,484,276.1	11	44.9%	38.8%	0.0%
Priorizando Canastillas	30,082.6	23,317.4	1,568.3	242.1	E1>=E2>=E3>=E4	26,285,558.6	166,955,495,371.0	10	46.6%	41.3%	-10.0%

En la siguiente ilustración se observa una diferencia considerable en el humero de clientes atendidos cuando se priorizan las canastillas, mientras que en las demás corridas, el numero de clientes se mantiene estable en 11 clientes, resultado similar al hallado en las simetrías anteriores para esta medida de desempeño.

Ilustración 20. Asimetría 3 - FO: Maximizar número de clientes atendidos



- **Función Objetivo: Minimización costos asociados a la SC**

Una vez más los mejores resultados con relación a los costos en los que incurre la SC se dan cuando se tiene disponibilidad de los empaques requeridos para cada tipo de fruta, los aumentos en los otros resultados son alrededor de un 2%, sin embargo en el caso del resultado obtenido al priorizar el uso de canastillas nuevamente es alrededor de un 20%, al analizar de manera macro (ton de producto por empaque en cada corrida) se evidencia que esta es producida nuevamente por el cambio de empaque de caja de cartón a canastilla fresera principalmente. Este comportamiento resulta similar en cada una de las medidas de desempeño.

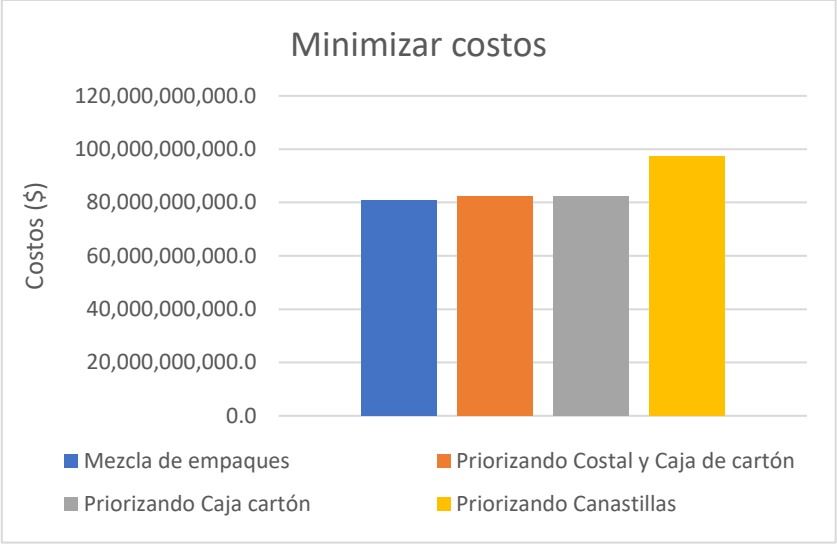
En cuanto a costos no existe diferencia en priorizar únicamente caja de cartón o caja y costal, ya que el sistema en ambos casos opta por transportar todo el producto en la caja, por lo que se considera que este es el mejor empaque y el costal el peor a nivel de costos.

Tabla XL. Asimetría 3 - FO: Minimizar costos asociados a la SC

Id	Ton E1 (canastilla carullera)	Ton E2 (canastilla fresera)	Ton E3 (Costal)	Ton E4 (Caja)	Comparación empaques	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
Disponibilidad de empaques	43,564.0	15,472.1	0.0	22,587.9	E1>=E4>=E2>=E3	10,926,317.2	80,958,789,508.7	9	0.0%	0.0%	0.0%
Priorizando Costal y Caja de cartón	0.0	0.0	0.0	81,200.9	E4>=E1=E2=E3	11,538,451.8	82,325,470,829.7	9	5.3%	1.7%	0.0%
Priorizando Caja cartón	0.0	0.0	0.0	81,200.9	E4>=E1=E2=E3	11,538,451.8	82,325,470,829.7	9	5.3%	1.7%	0.0%
Priorizando Canastillas	61,333.4	25,276.7	142.2	229.8	E1>=E2>=E4>=E3	13,536,936.8	97,354,872,340.9	9	19.3%	16.8%	0.0%

En la siguiente ilustración se puede observar de manera grafica el comportamiento de los costos en los que incurre la SC a medida que se priorizan ciertos tipos de empaques.

Ilustración 21. Asimetría 3 - FO: Minimizar costos asociados a la SC



6.3.1 Análisis de dominancia para las soluciones

Para esta asimetría se encontraron 12 posibles soluciones, al analizarlas en conjunto se observa que los empaques en los que se transporta menos cantidad de producto, es decir menos utilizados son en primera medida el costal y luego la canastilla fresera, con base en el primero se considera que es poco llamativo dada el número de pérdidas que se generan al utilizarlo, puesto que es el empaque con menor capacidad de resistencia al apilamiento o la compresión. Por otro lado, los empaques mas utilizados en las 12 respuestas encontradas, en la misma medida (6 resultados para cada empaque) son la caja de cartón y la canastilla carullera, la primera dado que es el único empaque que se considera puede ser utilizado para todos los productos.

Tabla XLI. Asimetría 3 - Análisis de dominancia en las soluciones

No.	Id	Función objetivo	Ton E1 (canastilla carullera)	Ton E2 (canastilla fresera)	Ton E3 (Costal)	Ton E4 (Caja)	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos	Dominada por
1	Disponibilidad de empaques	Minimización de huella hídrica	51,162.9	15,519.8	218.8	10,311.8	E1>=E2>=E4>=E3	10,858,806.4	81,052,497,229.4	9	
2	Disponibilidad de empaques	Minimización costos	43,564.0	15,472.1	0.0	22,587.9	E1>=E4>=E2>=E3	10,926,317.2	80,958,789,508.7	9	
3	Priorizando Costal y Caja de cartón	Minimización de huella hídrica	0.0	0.0	11,462.4	64,279.6	E4>=E3>=E1=E2	11,444,861.2	82,408,200,326.3	9	1,2
4	Priorizando Caja cartón	Minimización de huella hídrica	131.8	0.0	0.0	75,313.6	E4>=E1>=E2=E3	11,490,521.6	82,401,215,635.5	9	1,2
5	Priorizando Costal y Caja de cartón	Minimización costos	0.0	0.0	0.0	81,200.9	E4>=E1=E2=E3	11,538,451.8	82,325,470,829.7	9	1,2
6	Priorizando Caja cartón	Minimización costos	0.0	0.0	0.0	81,200.9	E4>=E1=E2=E3	11,538,451.8	82,325,470,829.7	9	1,2
7	Priorizando Canastillas	Minimización de huella hídrica	46,057.6	25,423.4	272.3	0.0	E1>=E2>=E3>=E4	13,504,460.6	97,539,083,297.4	9	1,2,3,4,5,6
8	Priorizando Canastillas	Minimización costos	61,333.4	25,276.7	142.2	229.8	E1>=E2>=E4>=E3	13,536,936.8	97,354,872,340.9	9	1,2,3,4,5,6
9	Disponibilidad de empaques	Maximización clientes atendidos	28,638.2	7,036.6	17,832.5	21,640.0	E1>=E4>=E3>=E2	14,031,075.6	98,029,206,774.2	11	
10	Priorizando Caja cartón	Maximización clientes atendidos	1,359.5	33.3	737.2	56,927.4	E4>=E1>=E3>=E2	25,445,935.3	160,165,484,276.1	11	9
11	Priorizando Costal y Caja de cartón	Maximización clientes atendidos	3,615.4	82.2	12,940.7	40,980.0	E4>=E3>=E1>=E2	25,901,118.4	163,442,395,015.4	11	9,10
12	Priorizando Canastillas	Maximización clientes atendidos	30,082.6	23,317.4	1,568.3	242.1	E1>=E2>=E3>=E4	26,285,558.6	166,955,495,371.0	10	9,10,11

6.3.2 Soluciones en frontera de pareto

Ala realizar el análisis de dominancia se hallaron 3 soluciones dentro de la frontera de pareto, dichas respuesta corresponden a los escenarios donde no se cuenta con ningún tipo de penalización para ningún tipo de empaque, es decir que se cuenta con total disponibilidad de empaques en cada uno de los orígenes. Si consideramos que cada producto tiene características especiales y por ende necesidades de preservación y cuidado diferentes, es evidente que cada producto va tener un empaque optimo que reduce las probabilidad de daño y por ende de perdida, por consiguiente resulta coherente que sean estas respuestas las que conformen el conjunto optimo de pareto, ya que en cada origen se debe poder tener la opción de seleccionar el tiempo de empaque de acuerdo al tipo de e producto que se tenga.

Tabla XLII. Asimetría 3 - Conjunto óptimo de Pareto

No.	Id	Función objetivo	Ton E1 (canastilla carullera)	Ton E2 (canastila fresera)	Ton E3 (Costal)	Ton E4 (Caja)	Comparación (No. CA y CM)	Huella hídrica	Costos	Clientes atendidos
1	Disponibilidad de empaques	Minimización de huella hídrica	51,162.9	15,519.8	218.8	10,311.8	E1>=E2>=E4>=E3	10,858,806.4	81,052,497,229.4	9
2	Disponibilidad de empaques	Minimización costos	43,564.0	15,472.1	0.0	22,587.9	E1>=E4>=E2>=E3	10,926,317.2	80,958,789,508.7	9
9	Disponibilidad de empaques	Maximización clientes atendidos	28,638.2	7,036.6	17,832.5	21,640.0	E1>=E4>=E3>=E2	14,031,075.6	98,029,206,774.2	11

7 CONCLUSIONES GENERALES

- La configuración de la cadena de suministro SCM determina el número óptimo y la ubicación de las instalaciones, así como la asignación de capacidad (capacidades cuantitativas) y requisitos tecnológicos a dichas instalaciones (capacidades cualitativas: sistema de refrigeración y empaques); el tener asimetrías en dichas capacidades influye en la sostenibilidad de la cadena principalmente mediante las pérdidas de alimentos que se generan, ya que a mayor número de perdidas mayor huella hídrica, menor cantidad de alimentos disponibles y mayores costos generados.
- El modelo planteado logra conectar la configuración de la SC con la sostenibilidad de esta, mediante la definición de capacidades logísticas cuantitativas y cualitativas de dos de los eslabones intermedios de la SC, para esto aborda tres medidas de desempeño (huella hídrica, número de clientes atendidos y costos) y busca determinar la ubicación, capacidad y tecnología disponible en cada una de las instalaciones (centros de acopio y centrales mayoristas) junto con flujos que se deben dar entre cada uno de los nodos considerados. La posterior modificación del modelo base permite representar cada una de las asimetrías que se desea evaluar.
- Las medidas de desempeño de huella hídrica y de costos en los que incurre la SC se ven influenciados por la existencia tanto de asimetrías de capacidades cuantitativas como de asimetrías de capacidades cualitativas.
- Las asimetrías en capacidad cuantitativa y en capacidad cualitativa a nivel de sistemas de refrigeración parece no tener influencia en el número de clientes atendidos, de acuerdo con el modelo planteado.
- La asimetría en disponibilidad de empaques adecuados para cada producto influye en la sostenibilidad de la SC desde las tres medidas de desempeño abordadas.

8 APORTES

- El presente trabajo da respuesta al planteamiento realizado por (Eskandarpour et al., 2015) (Zhu et al., 2018) sobre la necesidad de desarrollar modelos que aborden un equilibrio sostenible a través del triple resultado final junto con la necesidad de enfoques más amplios frente a los aspectos sociales y ambientales, por lo que se considera relevante el abordar la huella hídrica generada por la configuración de la cadena, ya que no es un enfoque frecuentemente utilizado, pero sí de gran relevancia teniendo en cuenta que este es un recurso cada vez más escaso.
- Se resalta el hecho de incluir en la configuración de la cadena la selección no solo de capacidades cuantitativas sino también de las cualitativas, siendo este último un aspecto poco abordado desde que (Große-Brockhoff, Marlies Klumpp & Krome, 2011) lo planteo. Esta parte se considera relevante ya que se logró corroborar la relación entre el uso de sistemas de refrigeración y la sostenibilidad de la cadena, ya que el uso de estos sistemas logra preservar las condiciones de los alimentos disminuyendo las pérdidas de alimentos lo cual influye en la disminución de los costos que se generan en la configuración de la cadena, en la reducción de la huella hídrica de la cadena y el aumento de la cantidad de alimentos disponibles lo que contribuye a la seguridad alimentaria de determinada población , sobre todo en contextos de déficit como en el que se desarrolla el modelo.
- El abordar las tres temáticas principales de la investigación se da respuesta al desafío planteado por (Seuring, 2013) sobre la necesidad de llenar los vacíos existentes en la intersección aún emergente de la sostenibilidad y la gestión de la cadena de suministro. Desde la investigación desarrollada se aborda la configuración de la cadena desde el aspecto de asimetrías de capacidades logísticas y su relación con las tres dimensiones de la sostenibilidad, además luego de analizar el caso de estudio planteado se evidencia que la definición adecuada de dichas capacidades garantiza un mejor funcionamiento de la cadena, ya que contar con las capacidades de almacenamiento correctas (espacio, sistemas de refrigeración y empaques).

9 RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

- Aunque el modelo de optimización propuesto proporciona resultados adecuados, el transporte fue abordado de manera implícita mediante la definición de flujos, la estandarización de tipos de camiones de acuerdo con cada arco y la cantidad de fruta que podía ser transportada en cada uno de estos, por lo que se sugiere abordar las asimetrías de capacidades logísticas en transporte de manera detallada,

mediante un enfoque explícito de ruteo en el que se identifique tipo de camiones (capacidad cuantitativa y cualitativa) y el número de estos que se requieren para cada arco.

- Con base en la inclusión de un enfoque de ruteo en una ampliación del modelo propuesto, se sugiere considerar las condiciones de las carreteras durante el transporte, ya que estas influyen en el tiempo estimado de distribución, las perdidas en transporte y el consumo de agua en la limpieza de los vehículos, y ´por ende pueden incluir en los efectos que tienen las asimetrías de capacidades logísticas en el transporte principalmente a nivel ambiental y económico.
- Se resalta la necesidad de desarrollar casos de estudio similares al abordado, pero en los que se incluyan un mayor número de posibles centrales de acopio y mayoristas a ser abiertas, para de esta forma corroborar los efectos de asimetrías de capacidades logísticas en la sostenibilidad encontradas en la investigación.
- El modelo planteado solo fue desarrollado en un escenario de déficit donde la preservación de los alimentos disponibles es indispensable, sin embargo, se recomienda desarrollar el modelo en un contexto de superávit para verificar si las asimetrías de capacidades logísticas tienen los mismos efectos en las tres medidas de desempeño abordadas.
- Se recomienda hacer un mayor énfasis en los costos asociados en la implementación y funcionamiento de sistemas de refrigeración ya que estos fueron abordados de manera general en la presente investigación.

10. BIBLIOGRAFÍA

Abbas, S., Chiang Hsieh, L. H., & Techato, K. (2021). Supply chain integrated decision model in order to synergize the energy system of textile industry from its resource waste. *Energy*, *229*, 120754. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120754

Adland, R., Jia, H., & Strandenes, S. P. (2018). The determinants of vessel capacity utilization: The case of Brazilian iron ore exports. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *110*, 191–201.

https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.11.023

Ahi, P., & Searcy, C. (2013). A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, *52*, 329–341. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.018

Alvarez, A., Morábito, J. A., & Schilardi, C. (2016). Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (Zea mayz) en provincias del centro y noreste Argentino. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, *48*(1), 161–177.

Ariza Arevalo, D. A. (2015). *Establecimiento De Un Modelo De Gestión De La Cadena De Frio En Una Industria De Alimentos*. 19.

Baghizadeh, K., Cheikhrouhou, N., Govindan, K., & Ziyarati, M. (2021). Sustainable agriculture supply chain network design considering water-energy-food nexus using queuing system: A hybrid robust possibilistic programming. *Natural Resource Modeling*, *February*. https://doi.org/10.1111/nrm.12337

BARON MENDEZ, J. E., & JULIAN, L. G. (2014). FORMULACIÓN DE UN PLAN DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA PLAZA DE MERCADO LAS FLORES. *UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA FACULTAD*, *39*(1), 1–24. http://dx.doi.org/10.1016/j.biochi.2015.03.025%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/nature10402%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/nature21059%0Ahttp://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127%0Ahttp://dx.doi.org/10.1038/nrmicro2577%0Ahttp://

Barragan, M., & Siachoque, R. (2017). Evaluación de La huella hídrica de los sistemas de producción agrícola y pecuario predominantes en la microcuenca la plata (Ibagué, Tolima). *Universidad Del Tolima Facultad De Ingeniería Forestal Ingeniería Forestal*, *53*(9), 116.

Bowersox, D., Closs, D., & Cooper, M. (2010). *Administración y logística en la cadena de suministro* (McGraw-Hil (ed.)).

Busse, C., Schleper, M. C., Weilenmann, J., & Wagner, S. M. (2017). Extending the supply chain visibility boundary. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *47*(1), 18–40. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2015-0043

C. Autry, Goldsby, T., J. Bell, M. M., Munson, C., Watson, M., Lewis, S., Cacioppi, P., & Jayaraman, J. (2013). *The Definitive Guide to Modern Supply Chain Management* (U. S. River (ed.)). Pearson Education.

Canning, P., Ainsley, C., Huang, S., Polenske, K. R., & Waters, A. (2010). Energy use in the U.S. food system. *Economic Research Report*, *94*(4134), 307–316. https://doi.org/10.1126/science.184.4134.307

Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, *38*(5), 360–387. https://doi.org/10.1108/09600030810882816

Chacón Vargas, J. R., Moreno Mantilla, C. E., & de Sousa Jabbour, A. B. L. (2018). Enablers of sustainable supply chain management and its effect on competitive advantage in the Colombian context. *Resources, Conservation and Recycling*, *139*, 237–250. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.018

Chopra, V. S., & Meindl, P. (2003). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operations* (Prentice Hall (ed.); 3rd ed). Upper Saddle River.

Closs, D. J., Speier, C., & Meacham, N. (2011). Sustainability to support end-to-end value chains: the role of supply chain management. *Journal of the Academy of Marketing Science*, *39*(1), 101–116. https://doi.org/10.1007/s11747-010-0207-4

Crainic, T. G., Gobbato, L., Perboli, G., Rei, W., Watson, J.-P., & Woodruff, D. L. (2014). Bin Packing Problems

with Uncertainty on Item Characteristics: An Application to Capacity Planning in Logistics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *111*, 654–662. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.099

Darbari, J. D., Kannan, D., Agarwal, V., & Jha, P. C. (2019). Fuzzy criteria programming approach for optimising the TBL performance of closed loop supply chain network design problem. *Annals of Operations Research*, *273*(1–2), 693–738. https://doi.org/10.1007/s10479-017-2701-2

Day, G. S. (1994). The Capabilities of Market-Driven Organizations. *Journal of Marketing*, *58*(4), 37. https://doi.org/10.2307/1251915

Department for Environment, F. and R. A. (DEFRA). (2006). *Food Industry Sustainability Strategy*. www.defra.gov.uk/farm/policy/sustain/fiss/index.htm

Dobbs, R., Oppenheim, J., Thompson, F., Brinkman, M., & Zornes, M. (2011). Resource Revolution : Meeting the world ' s energy, materials, food and water needs. *McKinsey Global Institute McKinsey Sustainability & Resource Productivity Practice*, *November*, 209.

Elkington, J. (1998). *Cannibals With Forks: the Triple Bottom Line of 21st century business*.

Eskandarpour, M., Dejax, P., Miemczyk, J., & Péton, O. (2015). Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review. *Omega (United Kingdom)*, *54*, 11–32. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006

Esper, T. L., Fugate, B. S., & Davis-Sramek, B. (2007). Logistics Learning Capability: Sustaining the Competitive Advantage Gained Through Logistics Leverage. *Journal of Business Logistics*, *28*(2), 57–82. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2007.tb00058.x

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1996). *The State of Food and Agriculture*. http://www.fao.org/3/w1358e/w1358e00.htm (

FAO. (2014). *Building a Common Vision for Sustainable Food and Agriculture: Principles and Approaches*.

Feitó Cespón, M., Castro, R. C., & Rubio Rodríguez, M. A. (2016). Modelos de optimización para el diseño sostenible de cadenas de suministros de reciclaje de múltiples productos Optimization model to sustainable design of multiple-products recycling supply chain. *Revista Chilena de Ingeniería*, *24*(1), 135–148.

Frankel, R., Keller, S. B., Keller, B. C., Gibson, B. J., Hanna, J. B., Defee, C. C., & Moon, M. A. (2004). *Definitive Guides for Supply Chain Management Professionals* (McGraw-Hill (ed.)).

Gamboa Bernal, J. P., Orjuela Castro, J. A., & Moreno Mantilla, C. E. (2020). The Sustainable Supply Chain: Concepts, Optimization and Simulation Models, and Trends. *Ingeniería*, *25*(3), 355–377. https://doi.org/10.14483/23448393.16926

Garnett, T. (2011). Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy*, *36*(SUPPL. 1), S23–S32. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.10.010

Georgiadis, P., Vlachos, D., & Iakovou, E. (2005). A system dynamics modeling framework for the strategic supply chain management of food chains. *Journal of Food Engineering*, *70*(3), 351–364. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.06.030

Giraldo Perdomo, Y. F., & Torres Rubio, J. E. (2018). *EVALUACIÓN TÉCNICA DE LA CADENA DE FRÍO EN LA PRODUCCIÓN DE FRUTAS Y VERDURAS EN COLOMBIA, PARA ACAIRE*.

Gligor, D. M., & Holcomb, M. (2013). The road to supply chain agility : an RBV perspective on the role of

logistics capabilities. *International Journal of Logistics Management*, *25*(1), 160–179. https://doi.org/10.1108/IJLM-07-2012-0062

Global Reporting Initiative. (2013). *Guía para la elaboración de memorias de sostenibilidad. G4*. 93. https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/Spanish-G4-Part-One.pdf

Goetschalckx, M., Vidal, C. J., & Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, *143*(1), 1–18. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00142-X

Gómez, C. R. (2004). *Fresa variedad Chandler.pdf* (p. 148). http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/828/16/Fresa variedad Chandler.pdf

Gómez P, C. R. (2014). Mora de Castilla (Rubus glaucus Benth). In *Caracterización de los productos hortifrutícolas colombianos y establecimiento de las normas técnicas de calidad* (pp. 44–49). http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/828/7/Mora de Castilla.pdf

Gou, J., Shen, G., & Chai, R. (2013). Model of service-oriented catering supply chain performance evaluation Abstract : Purpose : The aim of this paper is constructing a performance evaluation model for. *Journal of Industrial Engineering and Management*, *6*(1), 215–226.

Große-Brockhoff, Marlies Klumpp, M., & Krome, D. (2011). Logistics capacity management – A theoretical review and applications to outbound logistics. *Ild Schriftenreihe Logistikforschung*, *21*.

Guiné, R. de P. F., Pato, M. L. de J., da Costa, C. A., da Costa, D. de V. T. A., da Silva, P. B. C., & Martinho, V. J. P. D. (2021). Food security and sustainability: Discussing the four pillars to encompass other dimensions. *Foods*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/foods10112732

Gustavsson, J., & Stage, J. (2011). Retail waste of horticultural products in Sweden. *Resources, Conservation and Recycling*, *55*(5), 554–556. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.01.007

Hafeez, K., Zhang, Y. B., & Malak, N. (2002). Determining key capabilities of a firm using analytic hierarchy process. *International Journal of Production Economics*, *76*(1), 39–51. https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00141-4

Haial, A., Berrado, A., & Benabbou, L. (2020). Redesigning a transportation network: The case of a pharmaceutical supply chain. *International Journal of Logistics Systems and Management*, *35*(1), 90–118. https://doi.org/10.1504/IJLSM.2020.103866

Herrera-Ramírez, M. M., & Orjuela Castro, J. A. (2014). Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de frutas: un enfoque desde la din´amica de sistemas. *Ingeniería*, *28*(3), 236–247. https://doi.org/10.1108/IJLM-07-2012-0062

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, And, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. In *Social and Environmental Accountability Journal* (Vol. 31, Issue 2). https://doi.org/10.1080/0969160x.2011.593864

Hosseini-Fashami, F., Motevali, A., Nabavi-Pelesaraei, A., Hashemi, S. J., & Chau, K. (2019). Energy-Life cycle assessment on applying solar technologies for greenhouse strawberry production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *116*, 109411. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109411

ICONTEC. (2007). Frutas y hortalizas frescas. In *Ntc 3634-1* (Vol. 64, Issue 4).

Jaehn, F. (2016). Sustainable Operations. *European Journal of Operational Research*, *253*(2), 243–264. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.02.046

Jakubovskis, A. (2017). Flexible production resources and capacity utilization rates: A robust optimization perspective. *International Journal of Production Economics*, *189*, 77–85. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.011

Joshi, S. (2022). A review on sustainable supply chain network design: Dimensions, paradigms, concepts, framework and future directions. *Sustainable Operations and Computers*, *3*(July 2021), 136–148. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.01.001

Kalenatic, D. (2005). Modelo de medición, análisis, planeación y programación de capacidades en un contexto de múltiples criterios de decisión. *Ingeniería*, *10*(2), 57–66. https://doi.org/10.14483/23448393.2718

Khan, S. A. R., Yu, Z., Golpira, H., Sharif, A., & Mardani, A. (2021). A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions. *Journal of Cleaner Production*, *278*, 123357. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123357

Kilcast, D., & Subramaniam, P. (2000). *The stability and shelf-life of food* (Cambridge).

Kim, J., Realff, M. J., Lee, J. H., Whittaker, C., & Furtner, L. (2011). Design of biomass processing network for biofuel production using an MILP model. *Biomass and Bioenergy*, *35*(2), 853–871. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.008

Krishnan, R., Agarwal, R., Bajada, C., & Arshinder, K. (2020). Redesigning a food supply chain for environmental sustainability – An analysis of resource use and recovery. *Journal of Cleaner Production*, *242*, 118374. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118374

La Scalia, G., Micale, R., Miglietta, P. P., & Toma, P. (2019). Reducing waste and ecological impacts through a sustainable and efficient management of perishable food based on the Monte Carlo simulation. *Ecological Indicators*, *97*(June 2018), 363–371. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.041

Laari, S., Wetzel, P., Töyli, J., & Solakivi, T. (2022). Leveraging supply chain networks for sustainability beyond corporate boundaries: Explorative structural network analysis. *Journal of Cleaner Production*, *377*(September). https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134475

Laura Xu, X. X., Roland, L., & Wang, Y. F. (2009). Re-designing a distribution network in a supply Chain: - A case study. *IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, *2*, 729–733. https://doi.org/10.1109/INDIN.2009.5195893

LIMPIA, C. N. D. P. M. (2016). *Lavadero de Camiones*. 40. http://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gestión ambiental/Producción y Consumo Sostenible/Manuales_GIRH/Lavadero_Camiones.pdf

Lis, A., Sudolska, A., & Tomanek, M. (2020). Mapping research on sustainable supply-chain management. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(10). https://doi.org/10.3390/SU12103987

Liu, J., Zehnder, A. J. B., & Yang, H. (2009). Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water. *Water Resources Research*, *45*(5). https://doi.org/10.1029/2007WR006051

Liu, Z., & Nagurney, A. (2012). Multiperiod competitive supply chain networks with inventorying and a transportation network equilibrium reformulation. *Optimization and Engineering*, *13*(3), 471–503. https://doi.org/10.1007/s11081-011-9170-2

López Fernández, R. (2010). *Logistica comercial* (Paraninfo (ed.); 2a ed).

Lovaglio, D., & Susana, B. (2016). *Huella de agua : un punto de partida para plantear la reducción de agua en un*

Empaque de frutillas. Universidad Nacional de Tucumán.

Lu, C. S., & Yang, C. C. (2007). An evaluation of the investment environment in international logistics zones: A Taiwanese manufacturer's perspective. *International Journal of Production Economics*, *107*(1), 279–300. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.09.007

Martin, C. (1992). Logistics & Supply Chain Management: Strategies for Reducing Cost and Improving Service improving services. *Financial Times/Pitman Publishing*. https://doi.org/10.1057/jors.1994.209

Martins, C. L., Melo, M. T., & Pato, M. V. (2019). Redesigning a food bank supply chain network in a triple bottom line context. *International Journal of Production Economics*, *214*, 234–247. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.11.011

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*(5), 1577–1600. https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011

Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha Da Gama, F. S. (2006). Dynamic multi-commodity capacitated facility location: A mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers and Operations Research*, *33*(1), 181–208. https://doi.org/10.1016/j.cor.2004.07.005

Miles, R. E., Snow, C. C., Meyer, A. D., & Coleman, H. J. (1978). Organizational strategy, structure, and process. *Academy of Management Review. Academy of Management*, *3*(3), 546–562. https://doi.org/10.5465/AMR.1978.4305755

Mohammed, A., & Wang, Q. (2017). The fuzzy multi-objective distribution planner for a green meat supply chain. *International Journal of Production Economics*, *184*(November 2016), 47–58. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.11.016

Mohebalizadehgashti, F., Zolfagharinia, H., & Amin, S. H. (2020). Designing a green meat supply chain network: A multi-objective approach. *International Journal of Production Economics*, *219*(January 2019), 312–327. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.007

Navazi, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., Sazvar, Z., & Memari, P. (2019). *Sustainable Design for a Bi-level Transportation-Location-Vehicle Routing Scheduling Problem in a Perishable Product Supply Chain* (Issue December 2018). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03003-2

Nikolopoulou, A., & Ierapetritou, M. G. (2012). Optimal design of sustainable chemical processes and supply chains: A review. *Computers and Chemical Engineering*, *44*, 94–103. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.05.006

Nourbakhsh, S. M., Bai, Y., Maia, G. D. N., Ouyang, Y., & Rodriguez, L. (2016). Grain supply chain network design and logistics planning for reducing post-harvest loss. *Biosystems Engineering*, *151*, 105–115. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.011

Orjuela-Castro, J. A., Batero Manso, D., & Orejuela-Cabrera, J. P. (2018). Logistics IRP Model for the Supply Chain of Perishable Food. *WEA 2018*, *1*, 40,52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00353-1

Orjuela-Castro, J. A., Herrera-Ramírez, M. M., & Adarme-Jaimes, W. (2017). Warehousing and transportation logistics of mango in Colombia: A system dynamics model. *Revista Facultad de Ingeniería*, *26*(44), 71. https://doi.org/10.19053/01211129.v26.n44.2017.5773

Orjuela-Castro, J. A., Sanabria-Coronado, L. A., & Peralta-Lozano, A. M. (2017). Coupling facility location models in the supply chain of perishable fruits. *Research in Transportation Business and Management*, *24*(November 2016), 73–80. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.08.002

Orjuela Castro, J. A. (2018). *Incidencia del diseño de la cadena de suministro alimentaria en el equilibrio de flujos logísticos* [Universidad Nacional de Colombia]. http://bdigital.unal.edu.co/69976/

Orjuela Castro, J. A., Diaz Gamez, G. L., & Bernal Celemín, M. P. (2017). Model for Logistics Capacity in the Perishable Food Supply Chain. *Communications in Computer and Information Science*, *742*, III–IV. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66963-2

Panigrahi, S. S., Bahinipati, B., & Jain, V. (2019). Sustainable supply chain management: A review of literature and implications for future research. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, *30*(5), 1001–1049. https://doi.org/10.1108/MEQ-01-2018-0003

Parfitt, J., Barthel, M., & MacNaughton, S. (2010). Food waste within food supply chains: Quantification and potential for change to 2050. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *365*(1554), 3065–3081. https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0126

Procolombia - Exportaciones turismo marca país. (2015). Logistica de perecederos y cadena de frio en colombia. *Cartilla Cadena de Frío*, 112. http://www.procolombia.co/sites/all/modules/custom/mccann/mccann_ruta_exportadora/files/06-cartilla-cadena-frio.pdf

PROEXPORT. (2012). Cartilla De Empaque Y Embalaje Para La Exportacio. In *Saudi Med J* (Vol. 33).

Ramezanian, R., Vali-Siar, M. M., & Jalalian, M. (2019). Green permutation flowshop scheduling problem with sequence-dependent setup times: a case study. *International Journal of Production Research*, *57*(10), 3311–3333. https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1581955

Razmi, J., Zahedi-Anaraki, A. H., & Zakerinia, M. S. (2013). A bi-objective stochastic optimization model for reliable warehouse network redesign. *Mathematical and Computer Modelling*, *58*(11–12), 1804–1813. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2013.03.009

Rebs, T., Brandenburg, M., & Seuring, S. (2019). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, *208*, 1265–1280. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.100

Roy, V., Schoenherr, T., & Charan, P. (2018). The thematic landscape of literature in sustainable supply chain management (SSCM): A review of the principal facets in SSCM development. *International Journal of Operations and Production Management*, *38*(4), 1091–1124. https://doi.org/10.1108/IJOPM-05-2017-0260

Rudolf Plank. (2004). *El empleo del frio en la industria de la alimentación* (Reverté).

S.Gaviria, L.Mejia, M.Castro, E.Gómez, F. C. (2016). Pérdida y Desperdicio de alimentos en Colombia. *Departamento Nacional de Planeación*, *39*, 116.

Sanabria Coronado, L. A., Peralta Lozano, A. M., & Orjuela, J. A. (2017). Modelos de Localización para Cadenas Agroalimentarias Perecederas: una Revisión al Estado del Arte. *Ingeniería*, *22*(1), 65. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a04

Sandberg, E., & Abrahamsson, M. (2011). Logistics capabilities for sustainable competitive advantage. *International Journal of Logistics Research and Applications*, *14*(1), 61–75. https://doi.org/10.1080/13675567.2010.551110

Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, *54*(4), 1513–1520. https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053

Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, *16*(15), 1699–1710. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020

Silvestre, B. S. (2015). Sustainable supply chain management in emerging economies: Environmental turbulence, institutional voids and sustainability trajectories. *International Journal of Production Economics*, *167*, 156–169. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.025

Sodhi, M. S., & Tang, C. S. (2014). Supply-chain research opportunities with the poor as suppliers or distributors in developing countries. *Production and Operations Management*, *23*(9), 1483–1494. https://doi.org/10.1111/poms.12161

Soto-Silva, W. E., González-Araya, M. C., Oliva-Fernández, M. A., & Plà-Aragonés, L. M. (2017). Optimizing fresh food logistics for processing: Application for a large Chilean apple supply chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, *136*, 42–57. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.020

Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Van Der Vorst, J. G. A. J. (2014). Modelling food logistics networks with emission considerations: The case of an international beef supply chain. *International Journal of Production Economics*, *152*, 57–70. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.012

Touboulic, A., Chicksand, D., & Walker, H. (2014). Managing Imbalanced Supply Chain Relationships for Sustainability: A Power Perspective. *Decision Sciences*, *45*(4), 577–619. https://doi.org/10.1111/deci.12087

Turker, D., & Altuntas, C. (2014). Sustainable supply chain management in the fast fashion industry: An analysis of corporate reports. *European Management Journal*, *32*(5), 837–849. https://doi.org/10.1016/j.emj.2014.02.001

Unibague. (2013). *Logihfrutic*. https://logihfrutic.unibague.edu.co/

Universitat Politècnica de Catalunya. (2017). *Càtedra UNESCO de sostenibilitat*. https://tecnologiaisostenibilitat.cus.upc.edu/continguts/materials/4.-materials-polimers

Urrego, C. (2018). Diagnóstico de la cadena de frío en Colombia. *Questionar Investigación Específica*, *6*, 37–53.

Van der Vorst, J. G. A. J., Beulens, A. J. M., & Van Beek, P. (2000). Modelling and simulating multi-echelon food systems. *European Journal of Operational Research*, *122*, 354–366. https://doi.org/10.1145/1735813.1735818

Van Der Vorst, J. G. A. J., Tromp, S. O., & Van Der Zee, D. J. (2009). Simulation modelling for food supply chain redesign; Integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*, *47*(23), 6611–6631. https://doi.org/10.1080/00207540802356747

Van Mieghem, J. A. (2003). Capacity Management, Investment, and Hedging: Review and Recent Developments. *Manufacturing and Service Operations Management*, *5*(4), 269–302. https://doi.org/10.1287/msom.5.4.269.24882

Varsei, M., & Polyakovskiy, S. (2017). Sustainable supply chain network design: A case of the wine industry in Australia. *Omega (United Kingdom)*, *66*, 236–247. https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.11.009

Villalba-Campos, L., Herrera-Arévalo, A. O., & Orduz-Rodríguez, J. O. (2014). Parámetros de calidad en la etapa de desarrollo y maduración en frutos de dos variedades y un cultivar de mandarina (Citrus reticulata Blanco) TT - Parameters regarding quality during development and maturation stages in fruit from two varieties of a man. *Orinoquia*, *18*(1), 21–34. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-

37092014000100003&lang=es%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/rori/v18n1/v18n1a03.pdf

Winter, M., & Knemeyer, A. M. (2013). Exploring the integration of sustainability and supply chain management: Current state and opportunities for future inquiry. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, *43*(1), 18–38. https://doi.org/10.1108/09600031311293237

Wu, F., Yeniyurt, S., Kim, D., & Cavusgil, S. T. (2006). The impact of information technology on supply chain capabilities and firm performance: A resource-based view. *Industrial Marketing Management*, *35*(4), 493–504. https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2005.05.003

Yadav, V. S., Singh, A. R., Gunasekaran, A., Raut, R. D., & Narkhede, B. E. (2022). A systematic literature review of the agro-food supply chain: Challenges, network design, and performance measurement perspectives. *Sustainable Production and Consumption*, *29*, 685–704. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.11.019

Zhu, Z., Chu, F., Dolgui, A., Chu, C., Zhou, W., & Piramuthu, S. (2018). Recent advances and opportunities in sustainable food supply chain: a model-oriented review. *International Journal of Production Research*, *56*(17), 5700–5722. https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1425014