



**Optimización de la cadena de suministro postcosecha de cacao en las  
cooperativas Coomprocar y Coopcacao**

Davinson Fabián Olarte López

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento

Bogotá D.C., Colombia

18/07/2024

**Optimización de la cadena de suministro postcosecha de cacao en las cooperativas  
Coomprocar y Coopcacao.**

Davinson Fabián Olarte López

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magíster en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento

Director:

Ing. Luz Maribel Guevara Ortega, PhD

Co-Director(a):

PhD. Layanis Mesa Garriga

Modalidad:

Trabajo Dirigido

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Maestría en Gerencia de la Cadena de Abastecimiento

Bogotá D.C., Colombia

18/07/2024

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

## **Agradecimientos**

En primera instancia agradecer a la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) y la Federación Nacional de Cacaoteros (Fedecacao) quienes a través del proyecto “Implementación de estrategias agroforestales y vinculación de avances en el manejo agronómico y postcosecha de nuevos clones, para mejorar la productividad y calidad del cacao en el Departamento de Arauca” financiado por el Órgano Colegiado de Administración y Decisión del Fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sistema General de Regalías – SGR del departamento de Arauca, se desarrolló la propuesta de optimización de la cadena de suministro de cacao en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao. Valorar el apoyo prestado por la Cooperativa Multiactiva de Producción y Comercialización Agropecuaria de Arauquita (Coomprocar), la Cooperativa Multiactiva Agropecuaria de Cacaocultores del Departamento de Arauca (Coopcacao) y productores de cacao del departamento de Arauca.

Reconocer la constancia, apoyo y asesoramiento del equipo investigador que hizo parte del presente proyecto. La Ph.D Layanis Mesa Garriga codirectora y principal apoyo en la ejecución del proyecto de tesis, Ph.D Gabriela Corsano quien realizo aportes sustanciales para el desarrollo del proyecto, Ph.D Luz Maribel Guevara codirectora de tesis, Ph.D Sebastián Escobar Parra, MSc. Karla Parra y Esperanza Briceño por su acompañamiento metodológico. Agradecimiento a Karen Marín y Dabinson Amado, gerentes de las cooperativas Coomprocar y Coopcacao quienes aportaron información para la adecuada ejecución del presente proyecto. Agradecimiento al equipo técnico y de campo, Jhonny Carmona, Ángel Contreras, Shirley Torres García, Reinel Bothía Amaya, Aurora Gutiérrez Ortiz, Duván Alexis Corzo Silva, Ruth Evelin Melo Buitrago, Leidy Tatiana Gelves Amaya y Andrés Camilo Méndez Otero.

## Resumen

La cadena agroalimentaria de cacao en el departamento de Arauca presenta deficiencias en los procesos de abastecimiento y producción que impiden minimizar costos y tiempos de recolección en la transformación de materias primas, la obtención de productos de alta calidad, la comercialización en mercados de alto valor y la mejora en los márgenes de beneficio de productos que impactan en la competitividad de las organizaciones comercializadoras de cacao en grano seco. El presente trabajo optimiza la cadena de suministro postcosecha de cacao con denominación de origen en dos cooperativas, a través de la evaluación económica, social y ambiental de cuatro escenarios de operación, considerando la temporada de cosecha (alta y baja) y el aprovisionamiento de materia prima (frutos de cacao y semillas de cacao), apoyado de indicadores de sostenibilidad y un modelo de programación lineal entero mixto de dos etapas, adaptable a los cambios de cosecha en 180 fincas productoras con potencial de generación de cacao en grano con denominación de origen. Los escenarios de operación de adquisición de frutos de cacao evidencian un beneficio económico para las cooperativas desde un 110 % y 4 % de ingresos adicionales a los productores de cacao con respecto a los escenarios de adquisición de semillas de cacao, a expensas de mayores emisiones de gases de efecto invernadero (0.457 tonCO<sub>2</sub>) que pueden ser compensadas fácilmente por el sistema agroforestal cacao dispuesto en las fincas. Además, los escenarios de operación donde se adquieren frutos de cacao facilitan centralización de las operaciones y el tratamiento de subproductos como cacota de cacao y mucilago de cacao, favoreciendo la generación de ingresos adicionales.

**Palabras clave:** Cacao, cadena de suministro, optimización, denominación de origen, sostenibilidad, transformación postcosecha.

### **Abstract**

The cocoa agri-food chain in the department of Arauca exhibits deficiencies in the supply and production processes, which hinder the minimization of costs and collection times in the transformation of raw materials, the production of high-quality products, the commercialization in high-value markets, and the improvement of profit margins for products that impact the competitiveness of dry cocoa bean trading organizations. This study optimizes the post-harvest supply chain of origin-designated cocoa in two cooperatives by evaluating the economic, social, and environmental aspects of four operational scenarios. These scenarios consider the harvest season (high and low) and the procurement of raw materials (cocoa fruits and cocoa seeds), supported by sustainability indicators and a two-stage mixed-integer linear programming model adaptable to harvest changes in 180 producing farms with the potential to generate origin-designated cocoa beans. The operational scenarios involving the acquisition of cocoa fruits demonstrate an economic benefit for the cooperatives, ranging from 110 % and 4 % additional income for cocoa producers compared to the scenarios of cocoa seed acquisition, at the expense of higher greenhouse gas emissions that can be easily offset by the agroforestry cocoa system established in the farms. Moreover, the operational scenarios where cocoa fruits are acquired facilitate the centralization of operations and the treatment of by-products such as cocoa shell and cocoa mucilage, favoring the generation of additional income.

**Keywords:** Cocoa, supply chain, optimization, denomination of origin, sustainability, post-harvest transformation.

## Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>16</b>
1.1	<i>Antecedentes del Problema .....</i>	16
1.2	<i>Descripción del Problema.....</i>	18
1.3	<i>Pregunta de Investigación.....</i>	19
<b>2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>20</b>
2.1	<i>Objetivo General .....</i>	20
2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	20
<b>3</b>	<b>Justificación .....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>Marco Institucional.....</b>	<b>24</b>
4.1	<i>Presentación de la Empresa .....</i>	24
4.1.1	<i>Coomprocar.....</i>	24
4.1.2	<i>Coopcacao .....</i>	25
4.2	<i>Referentes Estratégicos .....</i>	25
4.2.1	<i>Misión Cooperativa Coomprocar.....</i>	25
4.2.2	<i>Visión Cooperativa Coomprocar .....</i>	26
4.2.3	<i>Misión Cooperativa Coopcacao .....</i>	26
4.2.4	<i>Visión Cooperativa Coopcacao.....</i>	26
4.3	<i>Estructura Organizacional .....</i>	27
4.4	<i>Productos o Servicios Ofertados.....</i>	29
4.5	<i>Origen y Características Generales del Cacao.....</i>	29

4.5.1	Cacao en Colombia .....	30
4.5.2	Mercado Internacional .....	32
4.5.3	Mercado del Cacao Colombiano .....	33
4.5.4	Cacao en Arauca .....	34
<b>5</b>	<b>Marco de Referencia .....</b>	<b>37</b>
5.1	<i>Cadenas de Suministro .....</i>	<i>37</i>
5.1.1	Cadena de Suministro de Cacao. ....	38
5.2	<i>Modelos de Optimización .....</i>	<i>40</i>
5.2.1	Modelos de Ruteo Vehicular .....	41
5.2.2	Planificación Integrada De La Cadena de Suministro .....	51
5.2.3	Herramientas de Modelación y Optimización .....	55
5.3	<i>Cacao.....</i>	<i>55</i>
5.3.1	Transformación Postcosecha de Cacao .....	56
5.4	<i>Estado del Arte.....</i>	<i>62</i>
<b>6</b>	<b>Diseño Metodológico .....</b>	<b>67</b>
6.1	<i>Tipo de Investigación .....</i>	<i>67</i>
6.2	<i>Población, Muestra y Ficha Técnica.....</i>	<i>67</i>
6.3	<i>Identificación de Variables.....</i>	<i>68</i>
6.4	<i>Definición Conceptual .....</i>	<i>68</i>
6.5	<i>Instrumentos de Medición .....</i>	<i>70</i>
6.6	<i>Modelo de Optimización.....</i>	<i>71</i>

6.7	<i>Análisis de Escenarios</i> .....	72
6.8	<i>Modelo de Funcionamiento Operacional</i> .....	72
<b>Diagnóstico Organizacional</b> .....		<b>74</b>
6.9	<i>Análisis de Funcionamiento Operativo Actual</i> .....	74
6.9.1	Identificación de Características de Funcionamiento Actuales.....	74
6.9.2	Previsión de Producción, Materias Primas y Productos .....	77
6.9.3	Gestión de Proveedores .....	79
6.9.4	Abastecimiento de Materias Primas.....	80
6.9.5	Recolección y Transporte de Materias Primas.....	83
6.9.6	Producción (Tiempos, Capacidad y Costos) .....	85
<b>7</b>	<b>Resultados y Discusión</b> .....	<b>88</b>
7.1	<i>Condiciones de Suministro</i> .....	88
7.2	<i>Zonificación</i> .....	91
7.2.1	Asignación de Zonas a Plantas.....	92
7.3	<i>Propuesta Modelo de Optimización</i> .....	94
7.3.1	Nomenclatura Modelo de Optimización .....	94
7.3.2	Subproblema de Asignación Zona – Día.....	96
7.3.3	Subproblema de Ruteo Vehicular. ....	99
7.4	<i>Evaluación Modelo de Optimización</i> .....	104
7.5	<i>Indicadores de Sostenibilidad</i> .....	104
7.5.1	Análisis de Escenarios.....	107

7.5.2	Resultado Subproblema de Asignación Zona-Día.....	109
7.5.3	Resultados Subproblema de Ruteo .....	117
7.5.4	Resultados Consolidados de Escenarios .....	123
7.5.5	Evaluación de Sostenibilidad .....	125
<b>8</b>	<b>Plan de Intervención .....</b>	<b>140</b>
8.1	<i>Propuesta de Funcionamiento Operacional.....</i>	<i>140</i>
8.1.1	Nivel 1: Proceso de Gestión de la Cadena de Suministro (SCM).....	140
8.1.2	Nivel 2 - Procesos Primarios.....	143
8.1.3	Nivel 3 - Elementos y Procesos .....	144
8.1.4	Cronograma de Ejecución Plan de Intervención .....	150
<b>9</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>153</b>
<b>10</b>	<b>Referencias.....</b>	<b>155</b>
<b>11</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>174</b>
11.1	<i>Anexo A .....</i>	<i>174</i>
11.2	<i>Anexo B .....</i>	<i>180</i>

## Lista de Figuras

Figura 1	<i>Organigrama cooperativo Coomprocar</i> .....	27
Figura 2	<i>Organigrama cooperativo Coopcacao</i> .....	28
Figura 3	<i>Producción, exportación e importación de cacao en Colombia</i> .....	31
Figura 4	<i>Precios de cacao según categoría</i> .....	32
Figura 5	<i>Modelo de funcionamiento actual para transformación postcosecha</i> .....	35
Figura 6	<i>Cadena de suministro de cacao en Colombia</i> .....	39
Figura 7	<i>Ilustración TSP (Traveling Salesman Problem)</i> .....	42
Figura 8	<i>Esquematación del problema de ruteo vehicular (VRP)</i> .....	43
Figura 9	<i>Variantes del VRP (Vehicle Routing Problem)</i> .....	45
Figura 10	<i>Clasificación de los métodos de solución VRP</i> .....	47
Figura 11	<i>Clasificación de métodos de solución exactos de VRP</i> .....	48
Figura 12	<i>Clasificación métodos heurísticos del VRP</i> .....	49
Figura 13	<i>Clasificación métodos metaheurísticos del VRP</i> .....	51
Figura 14	<i>Clasificación Problemas de Planificación Integrada</i> .....	52
Figura 15	<i>Procesos de transformación postcosecha de cacao</i> .....	56
Figura 16	<i>Descripción modelo de optimización cadena de suministro</i> .....	89
Figura 17	<i>Mapeo de zonas climáticas en el departamento de Arauca</i> .....	92
Figura 18	<i>Producción de cacao en las fincas productoras en las semanas seleccionadas.</i> .....	108
Figura 19	<i>Ejemplo de ruteo vehicular AC-Wz7t2- Wz7t5- Wz7t6</i> .....	118
Figura 20	<i>Ejemplo de ruteo vehicular BC-Wz7t6</i> .....	120
Figura 21	<i>Beneficio neto de las cooperativas de transformación postcosecha</i> .....	127
Figura 22	<i>Potencial de obtención de materias primas, productos y subproductos.</i> .....	132
Figura 23	<i>Beneficio neto fincas de producción de cacao</i> .....	133

Figura 24 <i>Emisiones de GEI en los escenarios de operación</i> .....	135
Figura 25 <i>Representación cadena de suministro postcosecha de caca bajo modelo SCOR</i> .....	142
Figura 26 <i>Propuesta flujo de materiales e información en operaciones estratégicas</i> ....	143
Figura 27 <i>Propuesta de flujograma de plan de aprovisionamiento</i> .....	145
Figura 28 <i>Propuesta de flujograma de plan de transformación</i> .....	146
Figura 29 <i>Propuesta de flujograma de plan de distribución</i> .....	147
Figura 30 <i>Propuesta de flujograma de plan de retorno</i> .....	148
Figura 31 <i>Propuesta flujograma de procesos operacionales</i> .....	149

### Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de factores y variables</i> .....	69
Tabla 2 <i>Diseño de análisis de escenarios</i> .....	72
Tabla 3 <i>Características de productos y materias primas</i> .....	75
Tabla 4 <i>Resultados previsión de producción, materias primas y productos</i> .....	77
Tabla 5 <i>Resultados gestión de proveedores</i> .....	79
Tabla 6 <i>Resultados abastecimiento materias primas</i> .....	81
Tabla 7 <i>Resultados recolección y transporte de materias primas</i> .....	83
Tabla 8 <i>Resultados producción (tiempos, capacidad y costos)</i> .....	86
Tabla 9 <i>Mapeo de asignación de zonas a plantas</i> .....	93
Tabla 10 <i>Matriz de distancia zona a planta</i> .....	99
Tabla 11 <i>Características de vehículos para ruteo</i> .....	106
Tabla 12 <i>Condiciones de abastecimiento de las plantas de transformación.</i> .....	108
Tabla 13 <i>Consolidado de resultados de subproblema asignación zona-día</i> .....	109
Tabla 14 <i>Determinación de materia prima a recolectar zona-día escenario SC-AC (kg)</i> 112	
Tabla 15 <i>Determinación de materia prima a recolectar zona-día escenario FC-AC (kg)</i> 113	
Tabla 16 <i>Determinación de materia prima a recolectar zona-día escenario SC-BC (kg)</i> 115	
Tabla 17 <i>Determinación de materia prima a recolectar zona-día escenario SC-BC (kg)</i> 116	
Tabla 18 <i>Resultados consolidados subproblema de ruteo</i> .....	123
Tabla 19 <i>Resultados costo de ruteo</i> .....	126
Tabla 20 <i>Punto de equilibrio según escenario de materia prima</i> .....	129
Tabla 21 <i>Obtención de productos y subproductos</i> .....	131
Tabla 22 <i>Estimaciones potencial de captura de CO2 para cacao en Colombia</i> .....	137
Tabla 23 <i>Relación emisiones y potencial de compensación de gases de efecto invernadero</i> .....	139

Tabla 24 *Cronograma plan de intervención* .....152

## **1 Introducción**

A continuación, se presenta la problemática a solucionar en el presente trabajo desde una perspectiva de la cadena de suministro postcosecha de cacao.

### **1.1 Antecedentes del Problema**

El departamento de Arauca es el segundo productor de cacao a nivel nacional para el año 2022 con un 16,9 % de participación traducida en una producción de 10.520 ton de cacao seco, con un rendimiento de producción de 0,66 ton/ha., superior a la media nacional de 0,45 ton/ha. Los productores son el primer eslabón de la cadena de suministro del cacao siendo de gran importancia, ya que el sector se caracteriza por ser de economía familiar contando con predios entre 3 a 5 hectáreas que ocasionan condiciones particulares de cultivo, cosecha y postcosecha en cada predio, entre los factores que más importantes se encuentran: múltiples variedades genéticas, densidad de siembra diferenciada, condiciones climáticas, ubicación, mano de obra, nivel de producción, entre otros, que pueden generar múltiples características en los productos finales (Federación Nacional de Cacaoteros [Fedecacao], 2023a; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2021).

De acuerdo con las decisiones de cada productor se pueden seguir dos modelos de entrega y procesamiento de cacao: 1. Realizar el desgrane de los frutos de cacao y entregar su producción de cacao fresco (en baba) a un centro de transformación postcosecha; 2. Realizar los procesos postcosecha (Desgrane, fermentación y secado) en sus fincas bajo sus condiciones, presentando situaciones adicionales que impactan sobre el cacao procesado, entre ellas: bajo nivel tecnológico, al no contar con instalaciones, herramientas y utensilios de trabajo idóneos para la transformación postcosecha del cacao, condiciones climáticas como lluvias que dificultan el proceso de secado efectivo de los

granos de cacao. Sumado a ello, se presentan variables de proceso como: tiempos y frecuencia de volteo diferentes en el proceso fermentación, causando múltiples características entre lotes obtenidos y ausencia de herramientas para cuantificar la humedad de los granos de cacao para la entrega de grano seco de forma efectiva a los centros de acopio ubicados en la región (Cardona, Rodríguez-Sandoval, & Cadena, 2016; Contreras, 2017; Montoya M. , 2019; AGROBIZ, 2020; Perea, 2019; Dubon, 2016).

El transporte de cacao presenta limitaciones según su nivel de procesamiento, como puede ser: el tiempo, para dar inicio a los procesos postcosecha sin alterar las propiedades del cacao; cantidad de cacao cosechado, definido por el nivel de producción en cada uno de los predios que a su vez se ve alterado por los periodos de cosecha y la extensión de siembra; además, se deben cumplir condiciones de calidad específicas conforme a su nivel de procesamiento sean, frutos de cacao, granos de cacao fresco (en baba), o granos de cacao secos que aseguren que la materia prima no sufra contaminación (Afoakwa, 2014; Aguilar, 2017; Santander, Rogriguez, Vaillant, & Escobar, 2020). Lo anterior, provoca la existencia de múltiples métodos de transporte y aprovisionamiento de materias primas para los centros de acopio y beneficio poscosecha de la región que dificultan la estandarización de sus procesos y productos.

Los diversos centros de acopio y transformación postcosecha de cacao presentes en el departamento de Arauca se ven afectados por los distintos métodos de aprovisionamiento y producción descritos, ya que deben considerar las múltiples características obtenidas en las materias primas que ingresan a sus centros de acopio, dificultando la estandarización de procesos de transformación, evidenciando un modelo de funcionamiento poco efectivo que dificulta la obtención de granos de cacao óptimos para su comercialización en altos volúmenes a mercados con mayor valoración económica,

impactando el potencial de rentabilidad para la organización y sus asociados, demostrando así, la existencia de una brecha importante en el desarrollo industrial de estas organizaciones y la región (Contreras, 2017).

## **1.2 Descripción del Problema**

La cadena de suministro postcosecha de cacao aplicada actualmente en la Cooperativa Multiactiva de Producción y Comercialización Agropecuaria de Arauquita (Coomprocar, 2023) y la Cooperativa Multiactiva de Cacaoteros del Departamento de Arauca (Coopcacao) ubicadas en los municipios de Arauquita y Tame presentan procesos de abastecimiento de materias primas deficientes, evidenciados en el acopio de materias primas en diferentes fases de procesamiento, numerosos tipos de recolección de materias primas, incertidumbre en la adquisición de materias primas y procesos de transformación poscosecha diferenciados generados por las características diferenciadas de las materias primas entrantes que generan ineficiencias en toda la cadena de suministro y pérdidas en el potencial de calidad de las materias primas y por consiguiente en los productos obtenidos (Cardona Velásquez et al., 2016; Dubón, 2016; Perea Villamil, 2019). Considerando que el cacao es catalogado como un producto perecedero donde procesos ineficientes o con largos periodos de tiempo, disminuyen su calidad y valor, la ausencia de decisiones de adquisición y producción integradas en los procesos de transformación postcosecha afectan la consecución de productos de alta calidad y la optimización de los costos (Hashemi-Amiri et al., 2023); Díaz-Madroñero et al., 2015; Giallombardo et al., 2021) que impactan negativamente la competitividad y la rentabilidad de las empresas y productores de cacao del departamento de Arauca, demostrando así la existencia de una brecha en el desarrollo industrial de la región (Abbott et al., 2019; Escobar et al., 2020).

### **1.3 Pregunta de Investigación**

¿Una propuesta de optimización de la cadena de suministro de cacao puede aumentar la rentabilidad en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao?

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Optimizar la cadena de suministro postcosecha de cacao en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las condiciones de suministro de materias primas desde los predios productores hacia las plantas de beneficio postcosecha bajo condiciones favorables de costos y calidad.
- Desarrollar un modelo de optimización para la transformación postcosecha de cacao en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao.
- Evaluar escenarios de operación para la transformación postcosecha de cacao bajo el modelo de optimización propuesto, considerando indicadores de sostenibilidad económica, ambiental y social.

### **3 Justificación**

El sector cacaotero del departamento de Arauca se ha enfrentado en los últimos años a los mercados de comercialización de cacao corriente siendo un cacao sin características especiales o diferenciadas en el mercado internacional porque cumple con las especificaciones mínimas de calidad para su comercialización, contando con precios sujetos a la oferta y demanda que son definidos en la bolsa de valores de New York y Londres con precios que oscilan entre los USD\$3.000 y USD\$3.500 por ton, siendo estos menos competitivos al mercado diferenciado de cacaos de “fino sabor y aroma” que oscilan entre los USD\$3.500 y USD\$10.000 por ton (Abbott et al., 2019; Escobar et al., 2020; Mejía, 2015). Efectivamente, el departamento de Arauca presenta un alto potencial de producción de cacao fino aroma caracterizado por un perfil sensorial complejo con una composición genética determinada, condiciones de cultivo favorables en un entorno determinado, técnicas específicas de manejo de cultivos, cosecha, postcosecha composición fisicoquímica estable e integridad del grano (International Cocoa Organization [ICCO], 2024). Sin embargo, para poder llegar a conquistar estos mercados el sector debe mejorar de forma sustancial los modelos de abastecimiento de materias primas y transformación postcosecha, buscando escenarios de operación que permitan comercializar los productos demandados por los mercados diferenciados de manera óptima (Duarte Roa, 2018; ICCO, 2023).

Por consiguiente, la conquista y consolidación en el mercado de cacao de fino aroma que representa mayor valoración comercial en comparación a los cacaos a granel requiere del establecimiento de procesos que no solo garanticen los requisitos estándar de calidad del cacao, sino que además gestionen la composición genética, el entorno territorial, la cosecha y los procesos postcosecha, para la obtención de cacao de fino aroma

en altos volúmenes con características homogéneas. Sumado a esto, se debe asegurar la sostenibilidad de la cadena de suministro desde sus tres perspectivas, estableciendo mecanismos de seguimiento que aseguren el beneficio económico, social y ambiental en los procesos de transformación. Esto se puede lograr mediante la centralización de los procesos de abastecimiento y transformación postcosecha de cacao en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao quienes deben establecer procesos de transporte, adquisición y transformación postcosecha (fermentación y secado) estándar que permitan la gestión de los factores desarrolladores de cacaos de fino aroma, optimizando tiempos y costos de procesamiento, permitiendo la consecución de mercados de alto valor que impacten a los eslabones de la cadena de suministro postcosecha de cacao del departamento de Arauca.

Como una de las vías que contribuye a mejorar la sostenibilidad de los procesos, este trabajo se enfoca en la evaluación de una propuesta de optimización para la cadena de suministro de transformación postcosecha de cacao centralizando los procesos de adquisición, recolección y transformación de materias primas como semillas de cacao (en baba) o frutos de cacao, buscando aumentar el beneficio neto en la cadena de suministro. Dado que se han desarrollado procesos de optimización similares, donde Mujica Mota et al. (2019) evaluaron la cadena de suministro postcosecha de cacao en Costa de Marfil bajo un modelo de simulación, encontrando que la reducción de puntos de control de legalidad y la inversión en infraestructura vial pueden aumentar la productividad y el valor en el puerto, mientras que la mejora en la infraestructura vial menos desarrollada puede contribuir a la reducción de la contaminación, los autores subrayan la necesidad de considerar diferentes políticas y escenarios para optimizar la eficiencia y rentabilidad de la cadena de suministro de cacao, para mejorar las condiciones de vida de los agricultores y la población involucrada en esta industria. Sana et al. (2017) observaron un aumento significativo en los beneficios totales de los participantes de la cadena cuando se fomenta

la colaboración a través de un modelo de optimización bi-nivel. Los autores destacan la importancia de la planificación colaborativa en la optimización de recursos y beneficios en las cadenas de suministro, demostrando que la implementación de modelos económicos y programación matemática es efectiva para maximizar los beneficios en la cadena de suministro de cacao.

La optimización propuesta busca ofrecer una solución a la cadena de suministro de cacao desde las fincas productoras para llevar a cabo los procesos de adquisición de materias primas y la producción postcosecha en las plantas, gestionando el flujo de información y materiales entre proveedores y las cooperativas. Usando un modelo de optimización para suministrar cacao a las plantas de transformación postcosecha ubicadas en el municipio de Arauquita y Tame para obtener productos de alta calidad con denominación de origen. Alineando la cadena de suministro postcosecha de cacao de las cooperativas con mercados interesados en la adquisición de granos de cacao de alta calidad. Para ello, es necesario considerar entre otros factores, los periodos de baja y alta cosecha, las distancias entre las fincas y plantas, costos de producción, recolección, compra y los tiempos de recolección de materia prima con características perecederas que afectan la frescura y calidad por tiempos de procesamiento prolongados que impactan en la calidad, valor y márgenes de beneficio de los productos entregados (Hashemi-Amiri et al., 2023; Pretal et al., 2022).

## **4 Marco Institucional**

### **4.1 Presentación de la Empresa**

A continuación, se presentan las características más importantes de las organizaciones intervenidas en este proyecto de investigación buscando conocer su contexto para facilitar la implementación de un modelo de optimización que se adapte a las necesidades reales para la cadena de suministro.

#### **4.1.1 Coomprocar**

La cooperativa Coomprocar es una empresa que pertenece al sector solidario que nace a partir de la unión de productores de cacao del municipio de Arauquita con el fin de mejorar su calidad de vida, por ello se dedica al acopio, transformación y comercialización de cacao, especialmente en los procesos de beneficio postcosecha de cacao y la comercialización de cacao en grano, agrupando un total de 114 asociados, llegando a comprar cacao fresco y seco a más 1.000 productores en los municipios de Arauca y Arauquita. La cooperativa cuenta con un centro de acopio y beneficio de cacao ubicado en el municipio de Arauquita en el centro poblado El Troncal desde el 1999, siendo catalogada como una pyme que cuenta con 10 empleados en periodos de cosecha baja de cacao y duplicando este número en temporadas de alta cosecha (K. Marín, comunicación personal, 6 de septiembre de 2022).

Coomprocar comercializa anualmente 600 ton de cacao en grano seco obteniendo de esta manera por su comercialización ingresos anuales aproximados de (\$ 4.500.000.000) cuatro mil quinientos millones de pesos. Por otro lado, lleva a cabo procesos de transformación de cacao en chocolatinas y chocolates de mesa a través de la tercerización de estos procesos en empresas como Ítalo y Chocolates La Delicia (K. Marín, comunicación personal, 6 de septiembre de 2022).

#### **4.1.2 Coopcacao**

La cooperativa Coopcacao es una empresa que pertenece al sector solidario, fundada en el año 2006 por productores de cacao del municipio de Saravena, su sede principal se encuentra ubicada en el municipio de Saravena contando con una planta piloto de transformación postcosecha de cacao en el municipio de Tame. Sin embargo, llevan a cabo procesos de compra de cacao en grano seco en los municipios cacaoteros del departamento de Arauca que son: Arauca, Arauquita, Saravena, Tame y Fortul. Coopcacao comercializa anualmente un promedio de 800 ton de cacao en grano seco, obteniendo así una facturación anual promedio de (\$ 6.000.000.000) seis mil millones de pesos. Adicionalmente, lleva a cabo procesos de tercerización de procesos de transformación de cacao en productos como chocolates de mesa en alianza con la cooperativa Cooprocar la Delicia del municipio de Arauquita (D. Amado, comunicación personal, 9 de septiembre de 2022).

#### **4.2 Referentes Estratégicos**

Mediante la ejecución de entrevistas e información documental suministrada por los directivos de las cooperativas Coomprocar y Coopcacao se identificaron como referentes estratégicos la misión y visión.

##### **4.2.1 Misión Cooperativa Coomprocar**

Según Coomprocar (2023) nos indica que su misión es:

“Somos una organización cooperativa que agrupa productores de cacao, desarrollamos acciones para el mejoramiento de la productividad y competitividad en las etapas del cultivo, beneficio, transformación y comercialización del grano de cacao, contribuyendo al desarrollo económico, social, ambiental y la conservación de la paz en el campo araucano.”

#### **4.2.2 Visión Cooperativa Coomprocar**

Asimismo, Coomprocar (2023) su visión es:

“Para el 2028, ser una de las organizaciones más reconocidas del sector a nivel nacional e internacionales, autosostenible, ambientalmente responsables, líderes en la producción, procesamiento y comercialización de cacao y otros productos, con capacidad de ofrecer servicios que permitan contribuir al desarrollo integral de los asociados y de la región.”

#### **4.2.3 Misión Cooperativa Coopcacao**

En entrevista con el gerente de la cooperativa Coopcacao (D. Amado, comunicación personal, 9 de septiembre de 2022) indicó que la misión de la organización es:

“Mejorar el mercado de los productores agropecuarios del departamento de Arauca, específicamente el cacao, de acuerdo a la norma lcontec 1252, bajo altos estándares de calidad acorde con un óptimo manejo postcosecha, para satisfacer las necesidades económicas, sociales, política, culturales y laborales de todos nuestros cooperados, y clientes potenciales a fin de cumplir con el objetivo de presentar un producto araucano de calidad, asegurando un posicionamiento en los mercados nacional e internacional.”

#### **4.2.4 Visión Cooperativa Coopcacao**

Asimismo, en dicha entrevista el gerente (D. Amado, comunicación personal, 9 de septiembre de 2022) indicó que la visión de la organización es:

“Posicionar a COOPCACAOLTD, al año 2025 como la empresa comercializadora de productos agropecuarios del departamento de Arauca, en un proceso dinámico

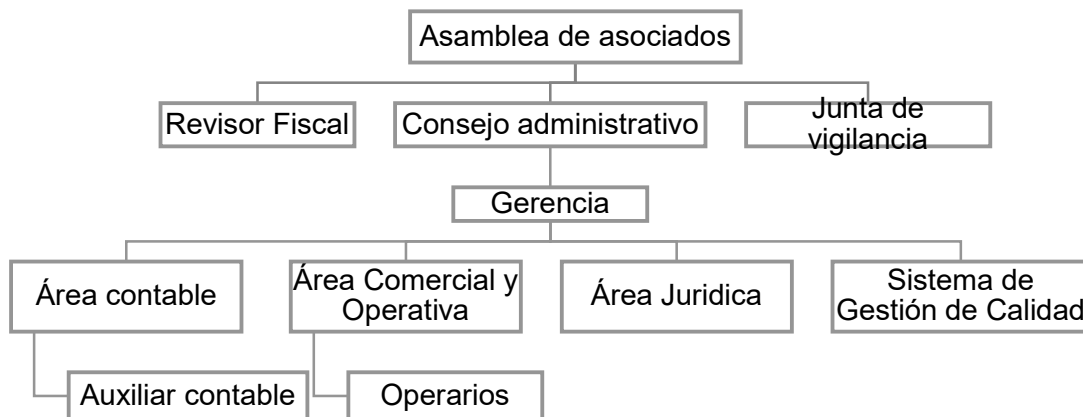
del desarrollo del agro araucano, respondiendo a la problemática de comercialización en el marco de la globalización de mercados especializados.”

### 4.3 Estructura Organizacional

La cooperativa Coomprocar presenta un organigrama lineal descrito en la Figura 1 donde las funciones estratégicas son llevadas a cabo por la asamblea de asociados, la junta de vigilancia y consejo administrativo quien posteriormente designa el gerente, quien debe llevar a cabo la implementación de dichas estrategias (Godoy, 2016).

**Figura 1**

#### ***Organigrama cooperativo Coomprocar***



*Nota.* Adaptado a partir de información suministrada por (K. Marín, comunicación personal, 6 de septiembre de 2022).

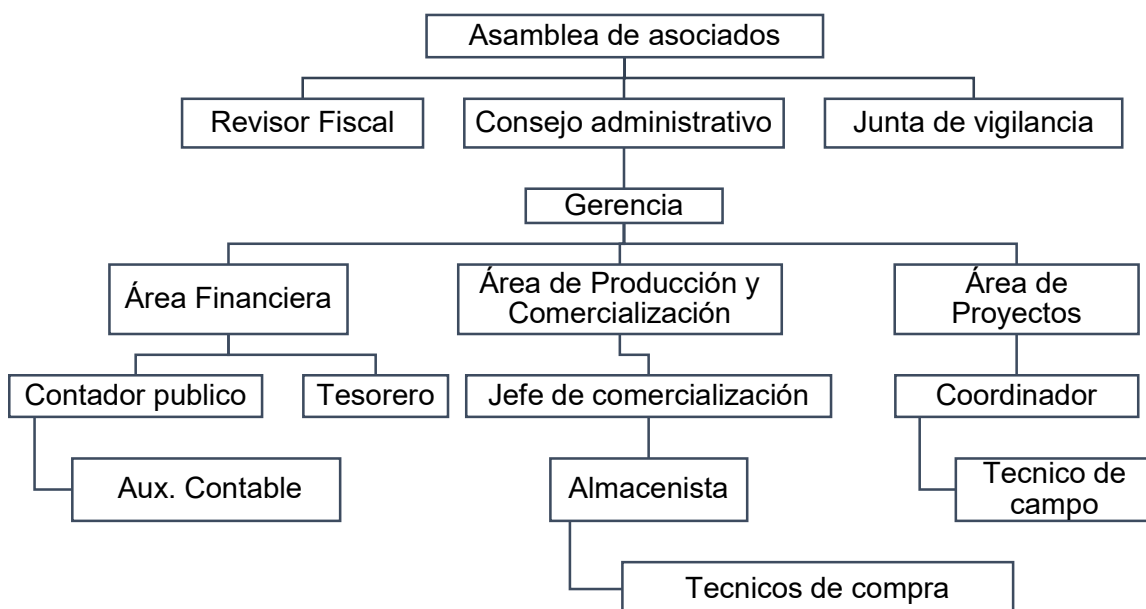
Asimismo, la gerencia delega funciones a las áreas de trabajo en la cooperativa son: el área contable, área de comercialización y operativa que en este caso son llevadas a cabo en un mismo departamento, área jurídica que busca proteger y gestionar las actividades legales y de cartera en la organización, y por último se encuentra el área de sistema de gestión de calidad que es la más reciente en la organización y nace en la

búsqueda de lograr la certificación en ISO 9001-2015 (K. Marín, comunicación personal, 6 de septiembre de 2022).

La Figura 2 presenta el organigrama de la cooperativa Coopcacao que también presenta un tipo de organización lineal donde el mayor nivel jerárquico funciones este asignado a la asamblea de asociados y los distintos consejos y juntas que son nombrados por la asamblea de asociados. El consejo administrativo es el encargado de llevar cabo la implementación de los objetivos estratégicos de la organización y para ello nombra y vigila al gerente de la organización quien debe planear, implementar y verificar el alcance de los objetivos propuestos para la organización, en este sentido la gerencia define las áreas operativas que son: financiera, producción y comercialización y por último el área de proyectos que a su vez describe cada uno de los cargos derivados del mismo (D. Amado, comunicación personal, 9 de septiembre de 2022).

**Figura 2**

**Organigrama cooperativo Coopcacao**



*Nota.* Adaptado a partir de información suministrada por (D. Amado, comunicación personal, 9 de septiembre de 2022)

#### **4.4 Productos o Servicios Ofertados**

Las cooperativas Coomprocar y Coopcacao presentan un portafolio de productos similares, comercializando principalmente cacao en grano seco en sacos de 50 a 60 kg. Adicionalmente, comercializa productos derivados de cacao como chocolates de mesa, chocolatinas y otros. Por otro lado, las cooperativas prestan servicios de asistencia técnica a sus asociados con el fin de mejorar sus niveles de producción y préstamos a los productores como mecanismo de fidelización de clientes (D. Amado, comunicación personal, 9 de septiembre de 2022; Coomprocar, 2023; K. Marin, comunicación personal, 6 de septiembre de 2022).

#### **4.5 Origen y Características Generales del Cacao**

Estudios recientes indican que el origen del cacao se dio en la zona alta de la Amazonia y gracias al comercio entre grupos étnicos indígenas se presentó una migración de sus semillas y árboles de cacao hasta América central (Fins, L et al., 2013). En la Amazonia se usaban las semillas para el consumo humano fresco (en baba) sin grado de transformación considerable, en contraste con los procesos de transformación fisicoquímicos que se dieron en la zona conocida como Mesoamérica donde se llevaban a cabo la fermentación, secado y tostado de los granos de cacao para obtener el “*tchocolatl*” conocido como chocolate (Caso Barrera, 2016; Hernández Triviño, 2013; Viers, 1953). Posteriormente, el cacao fue introducido al viejo continente por los países ibéricos, extendiendo sus cultivos a zonas tropicales en África donde se masificó la producción gracias a la intervención de países como Inglaterra y Francia (Fins, L et al., 2013).

Debido al proceso histórico relatado anteriormente, el continente africano es el principal productor de cacao a nivel mundial, con una participación cercana al 75 %, siendo Costa de Marfil el principal productor a nivel mundial seguido de Ghana. Asimismo, a nivel mundial la producción de cacao es llevada a cabo por pequeños productores con un 90 % de participación que cuentan con extensiones de tierra entre 2 a 5 hectáreas y es a la vez estos pequeños productores el eslabón más débil de la cadena, ya que se evidencian bajas condiciones de vida e indicadores sociales. Por ello, se buscan mecanismos que garanticen mejoras sustanciales en el nivel de vida de los productores en el mundo buscando mejorar los procesos de transformación postcosecha del cacao con el fin de obtener granos de cacao de alta calidad (ICCO, 2023).

#### **4.5.1 Cacao en Colombia**

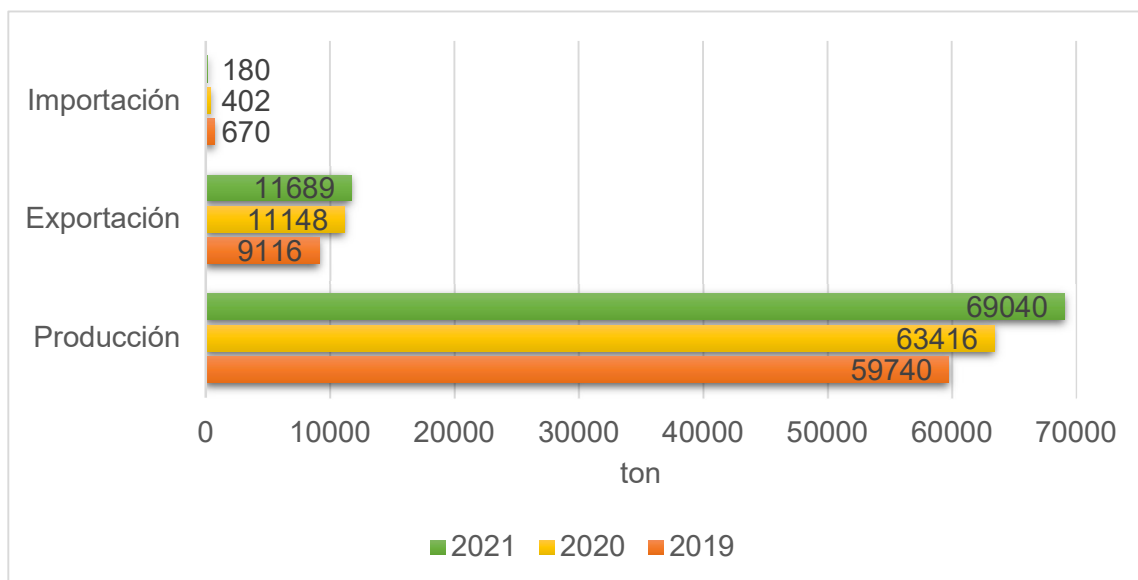
Se estima que en Colombia hay 65.341 familias cacaoteras presentes en 422 municipios de Colombia. El subsector generó 167.00 empleos directos e indirectos con 188.000 hectáreas de tierra destinadas a la producción de cacao para el año 2020 (MADR, 2021). En los últimos años el cultivo de cacao ha realizado grandes aportes al establecimiento de la paz en Colombia mediante la restitución de cultivos ilícitos y el impulso económico en las regiones más apartadas y afectadas por el conflicto, gracias a acuerdos como "Cacao, Bosques y Paz". Asimismo, el sistema agroforestal de cacao presenta un alto potencial de captura de emisiones de gases de efecto invernadero, calculando un potencial de remoción de 76.03 kg CO<sub>2</sub>eq/ha/año, por cada kilogramo de cacao producido (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria [UPRA], 2023), demostrando una alta capacidad de reducir las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>. Las características descritas anteriormente dan cuenta de la importancia del cacao, generando

beneficios ambientales, sociales y económicas para las partes que componen la cadena de suministro de cacao a nivel nacional.

Como se puede observar en la Figura 3, Colombia produjo para el año 2021, 69.040 ton de cacao en grano exportando un total de 11.689 ton, mostrando un aumento de estos dos aspectos en comparación con los años 2019 siendo de 9.116 y 2020 con 11.148, las importaciones, por el contrario, han sufrido un decrecimiento en los últimos años pasando de 670 ton importadas en el año 2019 a 180 ton importadas para el año 2021, presentando una balanza comercial positiva y evidenciando que el 83 % del cacao producido se consume en el país (ICCO, 2023; MADR, 2021).

**Figura 3**

*Producción, exportación e importación de cacao en Colombia*



*Nota.* Adaptado a partir de MADR (2021) y Fedecacao (2022)

Según el MADR (s. f.) citado por (Pabón, 2016) sugiere que el cultivo de cacao presenta un arraigo cultural y familiar en algunos departamentos como Santander, siendo uno de los ejes fundamentales para la subsistencia económica de los campesinos (p. 286)

presentando características de economía campesina, donde la mano de obra en muchos casos es suministrada por la familia y los pequeños y medianos productores son mayoría (Abbot et al., 2019).

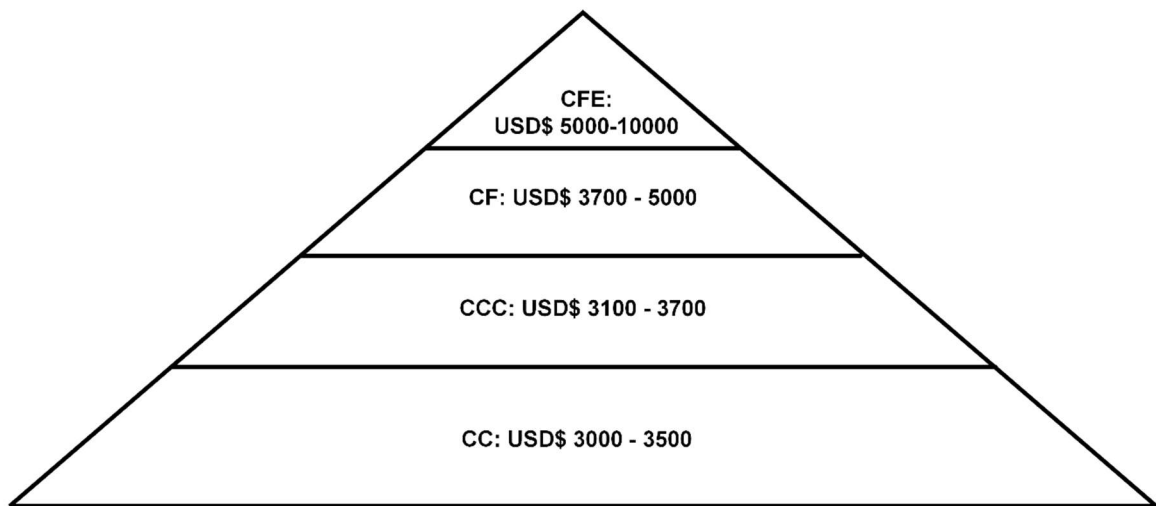
Asimismo, el MADR (2021) indica que en Colombia cada productor cuenta con 3 hectáreas de terreno destinadas a la producción de cacao, por lo que se podría catalogar que esta se encuentra dominada por pequeños productores que suministran estas materias primas a nacional. Por otro lado, la cadena agrícola del cacao presenta entre sus retos más importantes la implementación de modelos de beneficio de cacao a nivel colectivo e individual que busque incrementar las exportaciones de cacao y disminuir la intermediación con los productores (MADR, 2021).

#### **4.5.2 Mercado Internacional**

El precio del cacao se da bajo dos grandes clasificaciones: el primero, es el cacao corriente que su precio es definido en la bolsa de Nueva York, ya que es considerado un commodity con precios entre los USD\$2.092 – USD\$3.500 ton, por otro lado, encontramos mercados diferenciados de comercialización de granos de cacao catalogados de “fino sabor y aroma” que representan entre el 6 % y 12 % del mercado mundial, con una alta valoración reflejada en precios que oscilan entre los USD\$3.500 y USD\$10.000 por ton y como se ilustra en la Figura 4 existen a su vez clasificaciones a cada uno de los tipos de cacao mencionados anteriormente (Abbott et al., 2019; Escobar et al., 2020).

#### **Figura 4**

*Precios de cacao según categoría*



*Nota.* Adaptado de Abbot et al (2019). Abreviaciones. **CFE**: Cacao Fino Especial; **CF**: Cacao Fino; **CCC**: Cacao Corriente de Calidad; **CC**: Cacao Corriente.

#### **4.5.3 Mercado del Cacao Colombiano**

El mercado de cacao colombiano se encuentra dominado por Nutresa bajo la subsidiaria Compañía Nacional de Chocolates que cuenta con una participación del 49 %, por otro lado, la empresa Casa Luker con una participación del 44 %, por últimos los pequeños productores de cacao Colombia cuenta con una participación restante del 7 %. De esta manera, se puede indicar que el mercado colombiano presenta características de oligopsonio, ya que existen pocos compradores para el sector cacao de Colombia. Sin embargo, los precios de cacaos catalogados de fino sabor y aroma presentan precios de comercialización diferenciados a los presentes en el mercado corriente, como se puede observar en la Figura 3 (Abbott et al., 2019; Encinas-Ferrer, 2014; Escobar et al., 2020).

En un estudio de alineación estratégica para el sector cacao colombiano determinaron que Colombia presenta un gran potencial para exportar cacao a países como Suiza, Japón, Canada, Francia, Holanda y Estados Unidos teniendo en cuenta los niveles de importación de dichos países y el nivel de participación de Colombia en los mismos. Adicionalmente,

se determinó que Colombia podría aumentar su potencial de exportación mediante la certificación internacional de sus productos en agricultura sostenible y cacao orgánico (Escobar et al., 2020).

#### **4.5.4 Cacao en Arauca**

El departamento de Arauca es el segundo productor de cacao a nivel nacional con un 16.9 % de participación que se traduce en una producción de 10.520 ton de cacao para el año 2022 solo por detrás de Santander, con una producción de 22.899 ton (Fedecacao, 2023a). Sin embargo, es importante aclarar que el departamento de Arauca presenta un rendimiento de producción de 0,66 ton/ha., que es superior a otros departamentos con una media nacional de 0,45 ton/ha., lo anterior demuestra altos niveles de tecnificación del sector cacaotero y de cultura cacaotera en el departamento de Arauca (MADR, 2021).

Los cultivos de cacao en el departamento de Arauca son muy diversos, por lo que se pueden encontrar plantaciones con múltiples variedades genéticas, entre las principales mencionadas por Cardona et al. (2016) se encuentran: FEAR-5 (Federación Arauquita – 5), CAU 39 (Caucasia -39), FSA-11 (Federación Saravena – 11), FSA-12 (Federación Saravena – 12), FTA-2, FTA-4 (Federación Tame – 4). Sin embargo, se pueden llegar a encontrar plantaciones híbridas y otras variedades clonales, por ejemplo el CCN-51, esto demuestra las múltiples características genotípicas presentes en la región (Cardona Velásquez et al., 2016).

Además, se han efectuado estudios que muestran las principales brechas presentes en el departamento de Arauca, sintetizadas en la Figura 5. Comenzando en el punto 1, donde se lleva a cabo la producción agrícola del cacao en cada una de las fincas para posteriormente en el punto 2, llevar a cabo la recolección, desgrane y cosecha de los granos de cacao, seguidamente en el punto 3 el productor puede llevar a cabo el proceso

de postcosecha de cacao entre los que se encuentran la fermentación y el secado para a continuación transportar el cacao seco al centro de acopio; en caso de no llevar a cabo el proceso postcosecha, productor entrega el cacao a un centro de acopio, en este caso el cacao se entrega fresco (en baba), por lo tanto, el centro de acopio deberá realizar los procesos de fermentación y secado. Adicionalmente, el centro de acopio lleva a cabo el proceso de almacenamiento y comercialización del producto obtenido a las empresas transformadoras, donde la mayoría del cacao es entregado a las empresas Nutresa y Casa Luker para la obtención de productos como chocolate de semo y chocolatinas comerciales (Cardona Velásquez et al., 2016; Contreras Pedraza, 2017; Escobar et al., 2020).

**Figura 5**

*Modelo de funcionamiento actual para transformación postcosecha*



*Nota.* Adaptado de (Abbott et al., 2019; Cardona Velásquez et al., 2016; Contreras Pedraza, 2017; Escobar et al., 2020)

En el modelo descrito anteriormente cada productor lleva a cabo los procesos de forma individual y en los diagnósticos realizados se han encontrado falencias en los

procesos de beneficio postcosecha por parte de los productores que afectan la calidad final de los granos de cacao sumado a la recepción de materias primas en múltiples procesos y calidad, impactan y afectan en la homogeneidad y calidad de los granos de cacao comercializados a precios dependientes de los mercados de oferta y demanda a nivel mundial que son precios bajos en comparación con los mercados de cacao de fino sabor y aroma, por los centros de acopio y en este caso de estudio las cooperativas intervenidas representando a los productores perciben bajos valores de compra y venta de sus productos.

## 5 Marco de Referencia

Con el fin de presentar las concepciones teóricas más importante para la investigación, se integran cada uno de ellos a continuación.

### 5.1 Cadenas de Suministro

La gestión de la cadena de suministro se encuentra definida por múltiples autores, entre las definiciones más importantes se encuentran las de Mentzer et al., (2001) y Stock & Boyer (2009) que buscaron brindar una concepción clara de lo que es una cadena de suministro a partir de las concepciones dadas por los principales autores de dicho momento (Cooper and Ellram 1993; La Londe and Masters 1994; Lambert, Stock, and Ellram 1998). Como parte de su publicación Mentzer et al. (2001) definió la cadena de suministro como; “un conjunto de tres o más entidades (organizaciones o personas) directamente involucradas en los flujos ascendentes y descendentes de productos, servicios, finanzas y/o información desde una fuente hasta un cliente” (p. 4). Asimismo, otra definición como la brindada por Fahimnia et al. (2013) puede entregar información adicional que facilite su concepción o interpretación, en este sentido los autores definen la cadena de suministro como un sistema integrado que sincroniza una serie de procesos empresariales interrelacionados para: (1) adquirir materias primas y piezas (suministro), (2) transformar estas materias primas y piezas en productos terminados (producción), y (3) distribuir estos productos a minoristas o clientes (Distribución). Se debe hacer claridad en que esta red se encuentra presente en las organizaciones, independiente de si se encuentra caracterizada y gestionada o no, por lo que todas las empresas hacen parte de una red de suministro, ya sea como proveedor, operador, cliente o consumidor.

Cooper et al. (1997) indican que la gestión de la cadena de suministro es mucho más que solo logística, entendiendo que la cadena de suministro es una red amplia de

empresa en donde todas las partes de la organización deben involucrarse para incorporar procesos adicionales a los concebidos en la logística. Asimismo, los miembros de *The Global Supply Chain Forum* establecen que:

La gestión de la cadena de suministro es la gestión de las relaciones en la red de organizaciones, desde los clientes finales hasta los proveedores originales, utilizando procesos comerciales inter funcionales clave para crear valor para los clientes y otras partes interesadas (Lambert, 2014).

Siendo una concepción que muchas veces es confundida con otros conceptos inmersos en la administración de la organización. La gestión de la cadena de suministro busca mejorar las relaciones en las redes de valor, buscando integrar los procesos de planeación, suministro, manufactura y distribución, relación con proveedores y clientes.

#### **5.1.1 Cadena de Suministro de Cacao.**

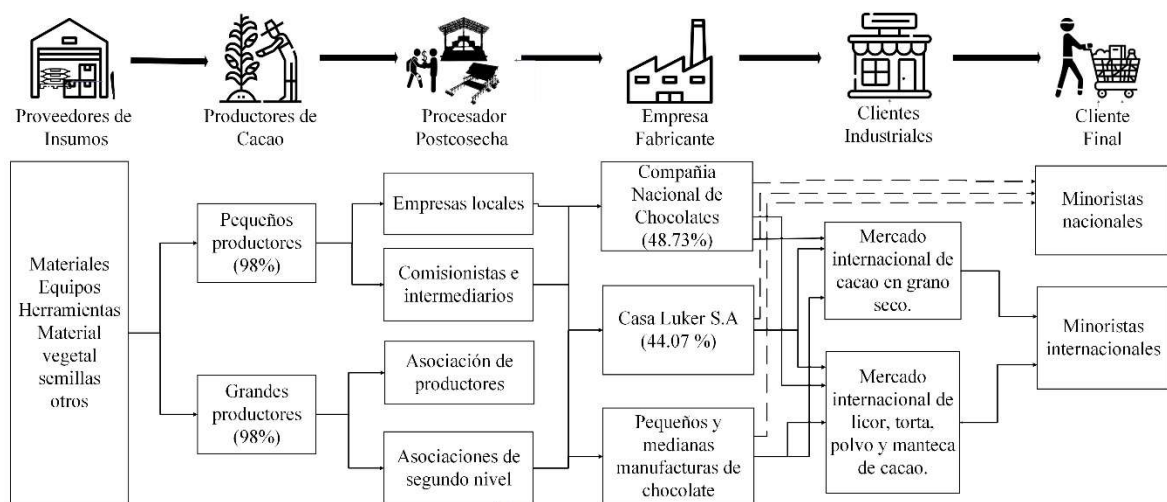
La cadena de suministro de cacao a nivel mundial es larga, conteniendo a agricultores, comerciantes, procesadores, fabricantes, minoristas y consumidores (Nur et al., 2023). A continuación, se profundiza en cada uno de los eslabones y procesos de la cadena de suministro de cacao.

En la Figura 6 se puede observar una síntesis de las partes de una cadena de suministro de cacao en Colombia. Los proveedores de insumos y herramientas abastecen a los productores de cacao con el fin de cumplir las actividades propias de manejo de cultivo y cosecha del cacao. En el segundo eslabón se encuentran los productores de cacao con una caracterización principal de pequeños productores (98 %) con un promedio de 3 hectáreas (Abbott et al., 2019; MADR, 2021). Los procesadores postcosecha que desarrollan principalmente los procesos de compra a los productores y la transformación postcosecha de cacao son el siguiente eslabón, como se puede observar en la **¡Error! No**

se encuentra el origen de la referencia., este proceso se lleva a cabo mediante empresas locales, intermediarios o comisionistas y por asociaciones de productores y asociaciones de cuarto nivel que buscan aumentar su poder de negociación en la compraventa de cacao en grano seco (Escobar et al., 2020).

Figura 6

*Cadena de suministro de cacao en Colombia*



Nota. Adaptado de (Escobar et al., 2020; Nur et al., 2023; zu Ermgassen et al., 2022)

En la cadena de suministro de cacao (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) continúan las empresas fabricantes quienes llevan a cabo los procesos de transformación de cacao en grano seco a productos como licor de cacao, chocolate de mesa, confituras, chocolatinas y subproductos como manteca de cacao, cacao en polvo, cascarilla y otros. En Colombia existen dos grandes compañías que controlan el mercado de cacao, por lo que es reconocido como un oligopsonio. Aun así, existen pequeñas y medianas empresas que comercializan este tipo de productos, siendo una alternativa comercial para los productores de cacao. Los clientes industriales que adquieren principalmente los subproductos generados por las grandes empresas fabricantes para

llevar a cabo procesos adicionales de transformación para la industria chocolatera o farmacéutica y por último se encuentran los minoristas quienes realizan los procesos de comercialización de productos a los clientes finales (Escobar et al., 2020).

Los procesos de abastecimiento en el cacao son catalogados como indirectos debido a la presencia de comercializadores o intermediarios que conectan a los productores de cacao con las empresas fabricantes, esto se da por la presencia de pequeños productores de cacao con bajos volúmenes de producción que dificultan los procesos de negociación directa con las empresas fabricantes, donde las últimas recurren a intermediarios que acopien y entreguen grandes volúmenes de producción. Las cooperativas son un mecanismo de agrupación de los pequeños productores que permiten mejorar el poder de negociación con las empresas fabricantes, generando mayores beneficios, económicos, sociales y ambientales a sus cooperantes. Además de facilitar los procesos de trazabilidad del cacao (Adams & Carodenuto, 2023; zu Ermgassen et al., 2022).

## **5.2 Modelos de Optimización**

Un modelo de optimización es la representación o ilustración matemática del funcionamiento de un sistema real, y se construye para resolver problemas de decisión buscando minimizar o maximizar una función objetivo para identificar y encontrar una solución óptima a un problema administrativo u operativo en las organizaciones, por lo que se convierte en una herramienta importante para la toma de decisiones asertivas por parte de los gerentes. Para la construcción de un modelo de optimización se cuentan con un conjunto de tres variables: 1) variables de decisión, que son determinadas por los tomadores de decisiones, por ejemplo, la cantidad de productos a transformar; 2) las variables de resultados que son descritas como funciones objetivo, minimizar o maximizar,

para el sistema a modelar, y 3) las variables incontrolables que son determinadas como las restricciones del modelo, ya que no pueden ser controladas por los tomadores de decisiones, por ejemplo los requisitos de calidad, tiempo, capacidad, entre otros. Asimismo, existen modelos de optimización para logística de compras, producción, distribución, entre otros, usando programación lineal, no lineal, multiobjetivo, de juegos, de enjambre, entre otros (Manerba, 2015; Pérez Peña, 2019; Rardin, 2015; Zhang et al., 2015).

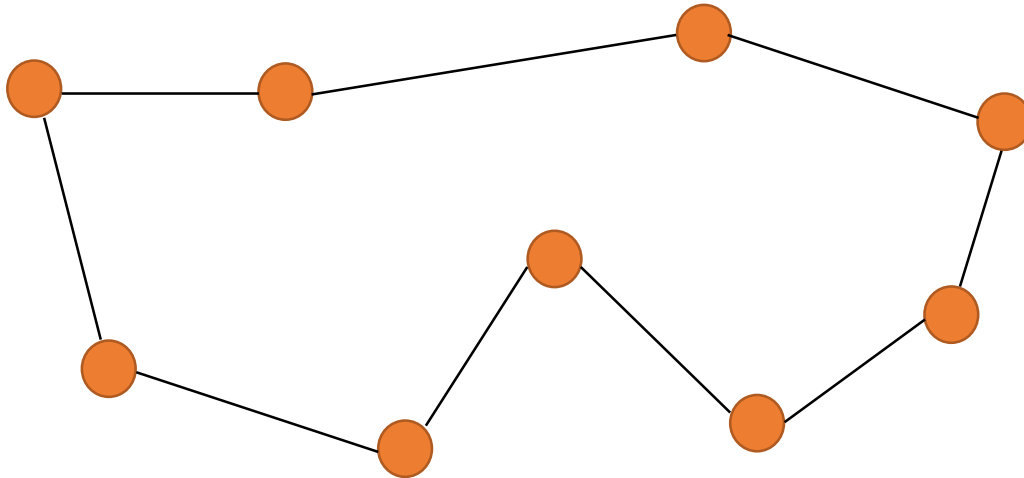
### **5.2.1 Modelos de Ruteo Vehicular**

Los modelos de ruteo vehicular son problemas de optimización combinatoria o programación matemática conocidos ampliamente, podemos encontrar el TSP (*Traveling Salesman Problem*) y el VRP (*Vehicle Routing Problem*) junto con sus variaciones. A través del tiempo se han desarrollado múltiples modelos de optimización vehicular que responden a la necesidad de solucionar problemas en las operaciones de entrega de materias primas y distribución de productos por parte de proveedores, plantas de producción, operadores logísticos, minoristas y clientes finales con el fin de tomar decisiones asertivas que optimicen el uso de recursos y la obtención de ganancias (Braekers et al., 2016; Corona-Gutiérrez et al., 2022; Koç & Laporte, 2018; Paredes-Belmar et al., 2022; Rocha-Medina et al., 2011).

**Problema del Vendedor Viajero (TSP-Traveling Salesman Problem).** El problema del vendedor viajero (TSP, por sus siglas en inglés) propuesto por Flood (1956) detallado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es un grafo que contiene un determinado número de nodos (puntos) conectados por arcos (recta) que determinan el recorrido que debe realizar el agente viajero.

### Figura 7

*Ilustración TSP (Traveling Salesman Problem)*



*Nota.* Adaptado de autor a partir de información de Flood (1956)

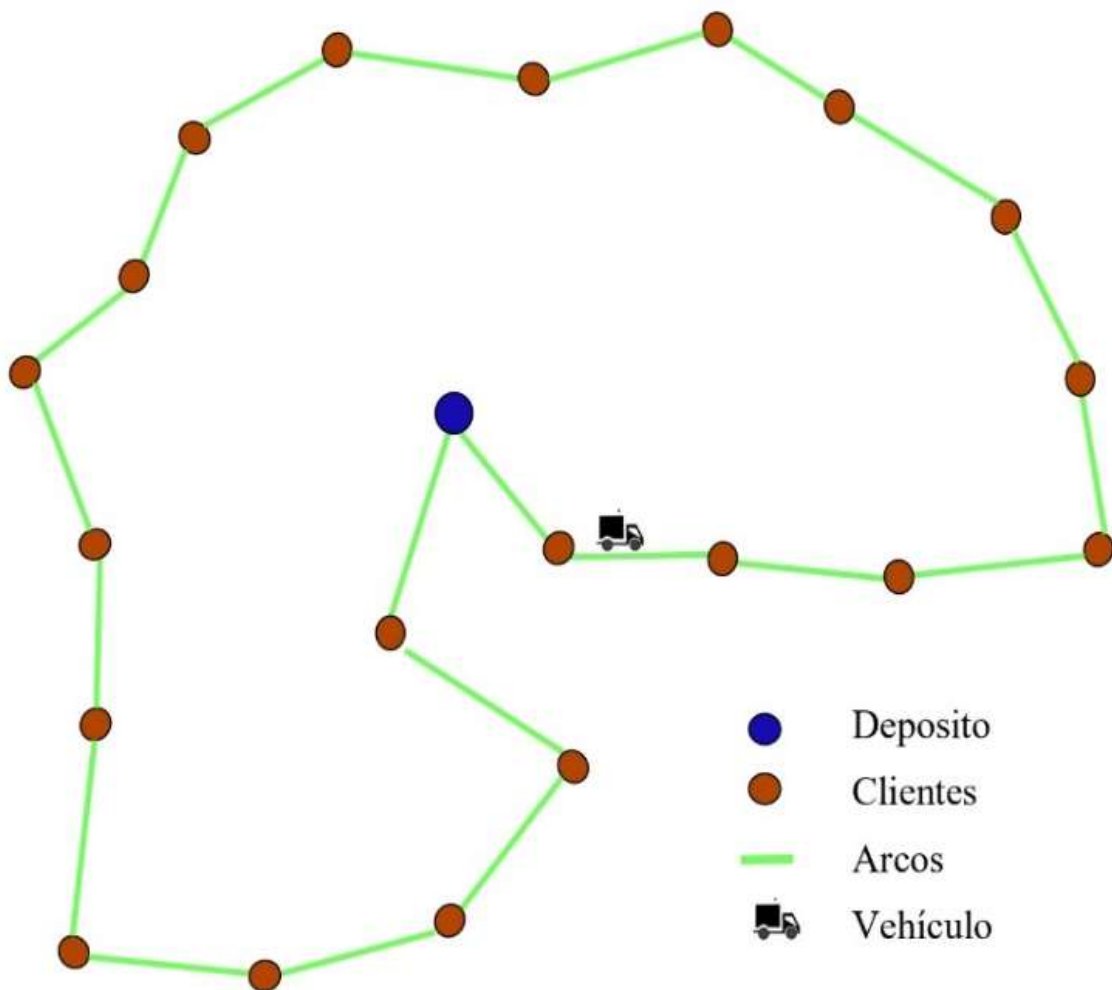
El problema del vendedor viajero (TSP por sus siglas en inglés) busca la generación de una ruta para un viajero que desea visitar una determinada cantidad de ciudades o puntos, iniciando y terminando su viaje en el punto de origen, el objetivo de este problema es minimizar la distancia total recorrida por el agente viajero, visitando una vez todas las ciudades. A medida que se amplía el número de puntos a visitar, el problema es más complejo, llegando al uso de métodos de solución que busquen encontrar una solución cercana a la óptima (Rocha-Medina et al., 2011).

**Problema de Ruteo Vehicular.** El problema de ruteo vehicular propuesto por Dantzig & Ramser (1959) nace a partir del problema del agente viajero (TSP) incorporando concepciones como un depósito donde debe salir e ingresar el vehículo, recolectando y transportando elementos entre los nodos, por ello la capacidad de los vehículos se convierte en una restricción importante que aumenta la complejidad del problema y asimismo la solución (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), para este caso como lo describe Computers & Industrial Engineering (2016) “El objetivo del VRP es

encontrar un conjunto de rutas de vehículos de menor costo, de modo que cada cliente sea visitado exactamente una vez por un vehículo, cada vehículo comience y termine su ruta en el depósito y no se exceda la capacidad de los vehículos”.

**Figura 8**

*Esquematización del problema de ruteo vehicular (VRP)*



*Nota.* Adaptado de (Computers & Industrial Engineering, 2016)

El Problema de Ruteo Vehicular (VRP) descrito en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se representa como un grafo dirigido  $G(N, A)$  donde  $N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$

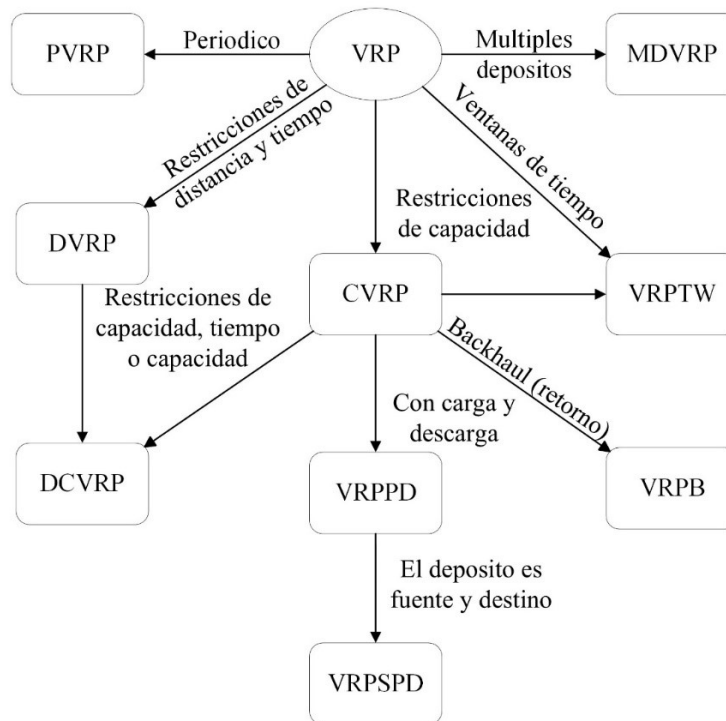
3..., n} representa el conjunto de nodos entre los que se encuentran el depósito y los clientes y A es el conjunto de Arcos, siendo el depósito el nodo 0 y los clientes {1,2, 3..., n} cada uno con demanda, cada arco representa una ruta entre el nodo i, al nodo j por donde viajan los vehículos con una capacidad restrictiva contando un costo (Cij) por usar el arco que viaja desde el nodo hasta el nodo j.

**Variantes del VRP (Vehicle Routing Problem).** El problema de ruteo vehicular se ha actualizado a lo largo de los años, generando múltiples variantes que representan sistemas que buscan adaptarse a las necesidades de las organizaciones, las variantes del VRP se presentan en la Figura 9. Rocha-Medina et al., (2011), Montoya-Torres et al., (2015), Braekers et al., (2016) y Toth & Vigo, (2002) detallan en su trabajo las distintas variaciones de los modelos de ruteo vehicular. El problema de enrutamiento periódico (PVRP) fue descrito en primera medida por Beltrami & Bodin, (1974) mediante un problema de recolección de residuos y es una extensión de VRP, donde las rutas de entrega se establecen durante varios días y cada cliente puede ser visitado más de un día en un horizonte de planificación (Campbell & Wilson, 2014).

**DVRP (Distance Vehicle Routing Problem).** Las restricciones de capacidad son reemplazadas por las restricciones de máxima longitud, no pudiendo exceder una distancia máxima, de allí se desglosa el modelo DCVRP (*Distance and Capacited*) donde se mantienen las restricciones de capacidad y distancia. El problema de ruteo con ventanas de tiempo (VRPTW) trabaja bajo ventajas de tiempo para abastecer cada nodo, considerando los tiempos de servicio en cada nodo y los tiempos de recorrido en cada arco, visitando todos los nodos cumpliendo con las distintas restricciones de tiempo (Montoya-Torres et al., 2015; Rocha-Medina et al., 2011).

**Figura 9**

*Variantes del VRP (Vehicle Routing Problem)*



*Nota.* PVRP: Problema de Ruteo Vehicular Periódico; MDVRP: Problema de Ruteo Vehicular Multi Depósito; DVRP: Problema de Ruteo Vehicular de Distancia; CVRP: Problema de Ruteo Vehicular Capacitado; VRPTW: Problema de Ruteo Vehicular con Ventanas de Tiempo; DCVRP: Problema de Ruteo Vehicular con Distancia y Capacidad; VRPB: Problema de Ruteo Vehicular con Retornos; VRPPD: Problema de Ruteo Vehicular con Carga y Descarga; VRPSPD: Problema de Ruteo Vehicular con Depósito y Fuente como Destino. Adaptado de Montoya-Torres et al. (2015).

La primera formulación de PVRP es presentada por Christofides & Beasley (1984) estableciendo entre los supuestos más importantes, el diseño de un conjunto de rutas para cada día de un periodo de planificación, cumpliendo con una frecuencia de visita para los clientes que pueden ser 1 o mayor, hay disponibilidad de vehículos para cada día,

cumpliendo con las restricciones de capacidad de la flota de vehículos, iniciando y finalizando las rutas en un único depósito, el objetivo de PVRP es minimizar el tiempo total de ruteo considerando un conjunto de recorridos para cada vehículo, satisfaciendo las restricciones de capacidad de vehículos, requisitos de visita y las demás restricciones clásicas de VRP. Es importante resaltar que entre las variables a considerar en esta variante se encuentra la incorporación de la variable  $A_{sd}$  que denota un conjunto de todos los horarios indexados en  $S$  y de días  $D$  a visitar, por ello, el PVRP selecciona un cronograma de un conjunto de cronogramas (horarios) candidatos para cada nodo cliente a visitar (Francis et al., 2008). En las publicaciones de Adewumi & Adeleke (2018); Christofides & Beasley (1984); Cordeau et al. (1997); Francis et al. (2008); Mor & Speranza, (2022) se pueden encontrar de forma más detallada las características y formulaciones matemáticas de PVRP.

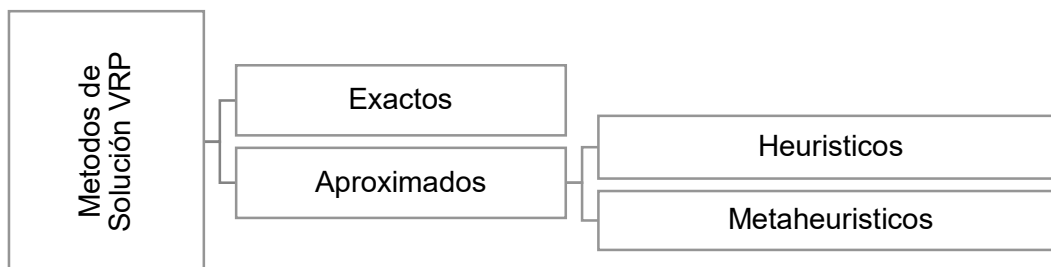
***Problema de Ruteo Vehicular con Múltiples Depósitos (MDVRP).*** Se caracteriza por contar con múltiples depósitos y con un horizonte planificación de un día, asignando cada cliente a un depósito, construyendo rutas para cada depósito, donde los vehículos salen e ingresan del mismo depósito (Cordeau & Maischberger, 2012), en el problema de ruteo con retornos (*VRPB Backhauls*) se cuentan con clientes de entrega y recolección considerando que una ruta puede servir a ambos clientes, siendo que los clientes de entrega deben ser atendidos antes que los clientes de recolección sin exceder la capacidad de los vehículos (Rocha-Medina et al., 2011). Asimismo, existen otras clasificaciones del problema de ruteo como: con flota homogénea donde la capacidad de los vehículos es la misma, flota heterogénea donde se cuenta con distintas capacidades en cada vehículo, estocásticos (SVRP) donde uno o varios componentes de la formulación son aleatorios, problema Multi-Trip VRP donde cada vehículo puede llevar a cabo varias rutas en el mismo periodo de planeación, problema con múltiples objetivo (MOVPRP) donde

se presentan distintos objetivos que generalmente son opuestos (Rocha-Medina et al., 2011).

**Métodos de Solución de VRP.** Los métodos de solución del problema de ruteo vehicular se pueden clasificar en métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos como se puede observar en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..* Estos métodos de solución han evolucionado durante los años debido a la complejidad del problema VRP, siendo NP-Completo que aumentan el tiempo de procesamiento de CPU, entregando nuevos y mejores enfoques de solución año a año (Caro, 2017; Rocha-Medina et al., 2011).

**Figura 10**

*Clasificación de los métodos de solución VRP*



*Nota.* Adaptado de Rocha-Medina et al., (2011) y (Caro, 2017)

**Métodos Exactos.** Los métodos de solución exactos son algoritmos que proporcionan una solución óptima para el problema de ruteo. Sin embargo, estos métodos de solución son eficientes en pequeñas instancias debido a la complejidad del VRP, el aumento del procesamiento en cómputo y el gran número de soluciones posibles, no es práctico utilizar este enfoque de solución en problemas reales considerados instancias de gran tamaño (Braekers et al., 2016; Daza et al., 2009; Lahyani et al., 2015). Los métodos exactos de solución se para el VRP se pueden clasificar como se observa en la *¡Error! No*

**se encuentra el origen de la referencia.** en: programación lineal o entera, programación dinámica y búsqueda directa de árbol.

### Figura 11

Clasificación de métodos de solución exactos de VRP



*Nota.* Adaptado de (Rocha-Medina et al., 2011)

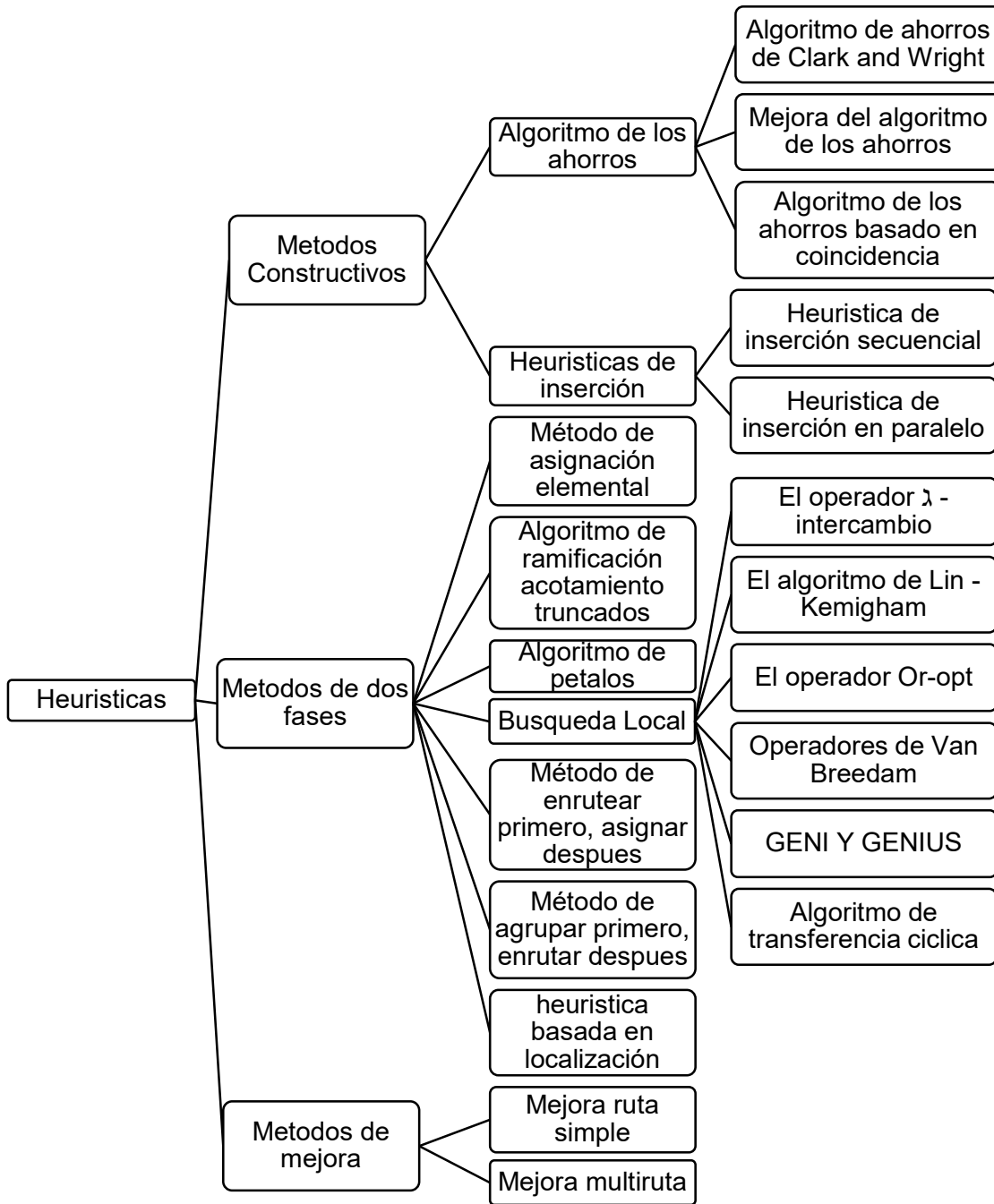
La búsqueda directa de árbol que busca explorar todas las soluciones posibles a través de la construcción de un árbol de búsqueda que representa todas las posibles soluciones, determinando cuál es la mejor en términos de distancia recorrida. La programación dinámica. Programación dinámica divide el problema en subproblemas más pequeños, encontrando la ruta optimiza para cada uno de ellos, se crea una tabla de soluciones óptimas de cada subproblema y posteriormente se soluciona el problema iniciando desde los subproblemas pequeños hasta los más grandes. La programación lineal entera se puede modelar bajos dos o tres índices, siendo el  $X_{ij}$  la representación del arco utilizado que conecta al nodo  $i$  con el nodo  $j$  y  $X_{ijv}$  siendo  $(i,j)$  el arco que conectados unidos al índice que representa el vehículo. Como se mencionó anteriormente, estos métodos de solución son eficientes para pequeñas instancias, debido al alto costo de procesamiento y tiempo en instancias más grandes (Rocha-Medina et al., 2011).

**Métodos Heurísticos.** Los métodos heurísticos se definen como procedimientos de solución convencional basados en el conocimiento disponible de un problema buscando buenas soluciones, cercanas al óptimo a un costo de procesamiento racional (Daza et al.,

2009). En los métodos constructivos, tipos y clasificaciones de los métodos heurísticos más utilizados se pueden encontrar en los trabajos de Pino Díez et al. (2011), Rocha-Medina et al. (2011) sintetizados en la Figura 12.

**Figura 12**

*Clasificación métodos heurísticos del VRP*



Nota. Adaptado de (Caro, 2017; Rocha-Medina et al., 2011)

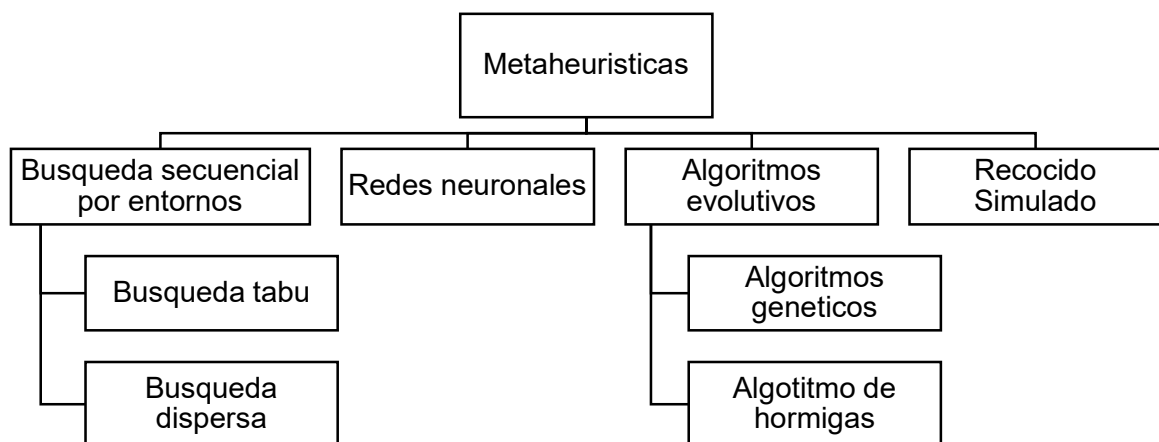
Las heurísticas se subclasifican en métodos constructivos, de mejora y de dos fases, estos últimos se pueden subdividir en: 1) métodos de agrupar primero, enrutar

después o 2) enrutar primero, agrupar después. Las heurísticas no garantizan encontrar la solución óptima. Sin embargo, se pueden adaptar de forma sencilla a los problemas reales y de gran instancia, proporcionando soluciones aceptables para la industria.

**Métodos Metaheurísticos.** Las metaheurísticas son denominadas también como técnicas de optimización local inteligente y se diferencian a las heurísticas, en que llevan a cabo una búsqueda para encontrar soluciones de calidad aceptable, mediante el uso de operadores que mejoran una solución inicial factible, evadiendo óptimos locales. Siendo técnicas de alto nivel en los procesos de optimización (Ver clasificación en Figura 13)

**Figura 13**

*Clasificación métodos metaheurísticos del VRP*



*Nota.* Adaptado de (Daza et al., 2009; Rocha-Medina et al., 2011)

### **5.2.2 Planificación Integrada De La Cadena de Suministro**

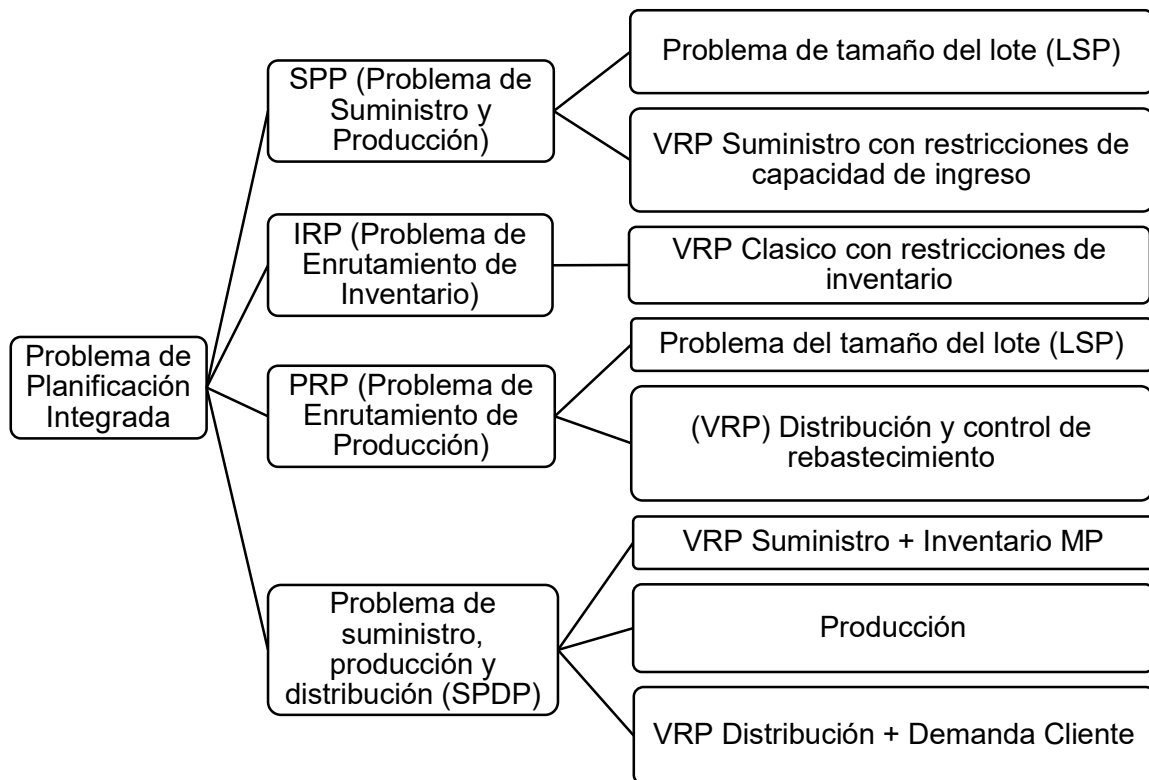
Considerando a la cadena de suministro como una red de organizaciones, personas y actividades que requieren fabricar, distribuir y entregar un producto. Esta se planifica como una red secuencial de procesos de enrutamiento, producción, inventario y distribución. Por lo tanto, las decisiones en las cadenas de suministro se llevan a cabo

también de forma secuencial, optimizando los procesos bajo un enfoque jerárquico, desde la producción hasta el consumo, sin que la información se transmita en la cadena (Manousakis et al., 2023).

En este sentido, (Hrabec et al., 2022) indica que la planificación integrada consiste en optimizar los procesos pertenecientes a una cadena de suministro en forma conjunta y no de forma secuencial, ya que estos pueden traer beneficios económicos de ahorro en costos por la integración estimados en un 11,08 %. (Hein & Almeder, 2016) indican que la planificación integrada de la cadena de suministro bajo un enfoque aguas arriba, que conecta proveedores con plantas ofrecen notables ventajas en costes, más aún cuando las empresas trabajan bajo un enfoque *just in time*, pudiendo esperar ganancias mucho mejores a la planificación secuencial. (Kumari et al., 2023) indica que la integración de la cadena de suministro es una estrategia de toma de decisiones que ha mostrado ser más rentable que la toma de decisiones secuenciales, rompiendo con la norma de enfoques secuenciales y centrándose en los últimos años en la toma de decisiones integradas para optimizar las cadenas de suministro. Por otra parte, (Sawik, 2016) define esta integración desde una perspectiva de programación conjunta como una herramienta fundamental, donde la coordinación de los procesos componentes de la red, puede presentar gran utilidad para las cadenas de suministro, especialmente para mitigar sus riesgos, buscando a su vez alcanzar objetivos contradictorios como la reducción del costo total y el aumento del nivel de servicio. En la Figura 14, se presentan los problemas más representativos en la integración de la cadena de suministro, encontrando problemas que buscan adaptarse a las distintas características de las redes de suministro y asimismo a las organizaciones.

#### **Figura 14**

*Clasificación Problemas de Planificación Integrada*



*Nota.* Adaptado de Adulyasak et al. (2015); Deng et al. (2023); Gheisariha et al. (2023); Hein & Almeder, (2016); Hrabec et al. (2022); Lee et al. (2022) y Sawik, (2016).

**Problema de Enrutamiento de Inventarios.** (IRP por sus siglas en inglés: *Inventory Routing Problem*) Se da cuando se incluyen los aspectos de enrutamiento en una cadena de suministro sin llevar a cabo procesos de producción consecuentes, donde el punto de partida es un nodo donde no se integra la producción, buscando entregar productos según la demanda del cliente en los distintos periodos de tiempo. Por ello, en este tipo de problemas se usa un VRP generalizado donde se incorporan las demandas de los clientes en los distintos periodos de tiempo (Adulyasak et al., 2015).

**Problema de Suministro y Producción.** SPP por sus siglas en inglés: *Supply and Production Problem*, busca conectar las decisiones de suministro de materias primas con el sistema de producción de una o más plantas, este problema es similar al problema de

enrutamiento de la producción (PRP). Sin embargo, considerando la diferencia en la posición de la planta de producción en la cadena de suministro y que los planes de producción están sujetos a la disponibilidad de materias primas y, por lo tanto, al problema de enrutamiento, modelos de solución del tipo PRP no se pueden transferir directamente a los problemas de suministro-producción (SPP). Tal como se observa en la Figura 14, el SPP se basa en dos submodelos de programación conocidos como Problema de Tamaño del Lote (LSP) y VRP de suministro con restricciones de capacidad de ingreso a planta, también conocido como IRP inverso (Hein & Almeder, 2016).

**Problema de Enrutamiento de Producción.** PRP por sus siglas en inglés: *Production Routing Problem*, también conocido como problema de enrutamiento de producción, inventario y distribución (PIDRP, por sus siglas en inglés), problema de enrutamiento producción-inventario (PIRP), toma decisiones de producción, inventario y entrega; fabricando productos en planta sin superar la capacidad de producción, considera el inventario de productos disponible en los minoristas, la demanda del cliente y el enrutamiento en el proceso de entrega de los productos finales, por lo que no toma decisiones de suministro. Este modelo se basa en un LSP que decide la producción y un VRP de distribución y reabastecimiento del producto a almacenes o clientes y un buen ejemplo del mismo es una cadena de suministro, donde el proveedor gestiona el inventario de los minoristas o clientes, estableciendo sus políticas de reabastecimiento (Adulyasak et al., 2015; Lee et al., 2022).

**Problema de Suministro, Producción y Distribución.** SPDP por sus siglas en inglés: *Supply, Production and Distribution Problem*, puede ser interpretado como el problema que integra de manera holística la cadena de suministro, tomando decisiones en los macroprocesos de suministro, producción y distribución, considerando a su vez los

niveles de inventario en proveedores como clientes y el enrutamiento (VRP) para los procesos de recolección de materias primas y entrega de productos terminados (Gheisariha et al., 2023; Hashemi-Amiri et al., 2023).

Los problemas de planificación integrada son problemas de optimización combinatoria que presentan las mismas características de complejidad que el VRP, siendo NP-Complejos, por lo que existe la misma clasificación de exactos, heurísticos y metaheurísticos en sus métodos de solución. Sin embargo, consideran que estos problemas ya integran decisiones de enrutamiento pueden llegar a ser mucho más complejos de resolver, por lo que los métodos exactos solo son efectivos en instancias pequeñas, siendo fundamental el uso de métodos heurísticos y metaheurísticos para instancia de mediano y gran tamaño que representen problemas reales (Adulyasak et al., 2015; Hein & Almeder, 2016; Hrabec et al., 2022).

### **5.2.3 Herramientas de Modelación y Optimización**

Los lenguajes de modelización para la optimización de procesos se han convertido en herramientas funcionales, pudiendo ser ejecutados en ordenadores personales, entre las herramientas digitales de optimización más utilizadas se encuentran; Gurobi, lindo, GAMS. A través de la recolección de información realizada en las bases de datos se pudo evidenciar el alto uso del lenguaje de programación y software de optimización GAMS debido a sus características de facilidad y adaptación de manera sencilla y práctica (Vanzetti et al., 2019).

## **5.3 Cacao**

A través de la historia del cacao se han desarrollado distintos genotipos de cacao. Actualmente, las variedades más conocidas son la forastera, criollo y trinitarios, estas variedades genotípicas pueden presentar características de sabor y aroma diferenciados

al cacao a granel (Santander Muñoz et al., 2020), que se denominan cacao de fino aroma, estas características se logran a partir de procesos de transformación postcosecha adecuados que conservan y exaltan las propiedades de sabor y aroma desarrolladas en el cultivo (Escobar et al., 2021). Además de las variedades genéticas y los procesos de transformación postcosecha se han desarrollado investigaciones que evalúan la zonificación climática para la obtención de productos con denominación de origen (González-Orozco et al., 2024), presentándose como un nuevo factor a considerar para la obtención de cacao de fino aroma (ICCO, 2024).

### **5.3.1 Transformación Postcosecha de Cacao**

El proceso de transformación postcosecha ha sufrido mejoras desde que se conocieron los primeros procesos de transformación llevados a cabo por los grupos indígenas de Mesoamérica, manteniendo los procesos de base como fermentación, secado y tostado. En los últimos años, se han llevado a cabo investigaciones que explican el comportamiento en cada uno de los procesos postcosecha en el cacao donde se pueden encontrar como un proceso operativo secuencial descrito en la Figura 15, donde se realiza la cosecha, pre-acondicionamiento de la pulpa, desgrane, fermentación, secado, empaque, almacenamiento y transporte (Dubón, 2016; Escobar et al., 2020, 2021; ICCO, 2023; Perea Villamil, 2019; Santander Muñoz et al., 2020) por ello se detalla a continuación cada uno de estos procesos.

#### **Figura 15**

*Procesos de transformación postcosecha de cacao*



*Nota.* Adaptado de (Afoakwa, 2014; Santander Muñoz et al., 2020)

### 5.3.1.1 Cosecha y Desgrane

Se da mediante la recolección de los frutos de cacao que presentan coloraciones rojizas y naranja dependiendo de la variedad del cacao, sea criollo o forastero. Este procedimiento se realiza con herramientas que facilitan el proceso de recolección de los frutos, para una vez recolectados, son almacenados o desgranados según las características particulares del proceso de beneficio que el productor desee llevar a cabo. Se recomienda la programación de la cosecha en periodos de 15 días para de esta manera evitar la sobre maduración de los frutos, debido a que pueda generar afectaciones de tipo organoléptico en el producto final (Perea Villamil, 2019).

### 5.3.1.2 Pre-acondicionamiento de la Pulpa.

El proceso de pre-acondicionamiento de la pulpa de cacao es un proceso de transformación alternativo donde se elimina parcialmente la pulpa del cacao, conocida popularmente como mucilago, buscando minimizar la generación de compuestos ácidos y alcoholes en el proceso de fermentación, existiendo distintos procesos de pre-acondicionamiento de la pulpa del cacao entre las que podemos encontrar el almacenamiento de los frutos por varios días antes de realizar el desgrane, el despulpado

mecánico y el pre-secado de los granos de cacao (Afoakwa, 2014; Santander Muñoz et al., 2020). Asimismo, en Colombia, se lleva a cabo el proceso de pre-acondicionamiento de la pulpa de cacao para la variedad clonal CCN-51, sin embargo, no se encuentra información bibliográfica que corrobore la efectividad del proceso (Perea Villamil, 2019).

### **5.3.1.3 Fermentación.**

La fermentación se considera el proceso central en el beneficio postcosecha del cacao, donde se disponen los granos de cacao con o sin pre-acondicionamiento de la pulpa para llevar a reacciones fisicoquímicas que les otorgan coloración, aroma y sabor a los granos de cacao. Las reacciones bioquímicas comienzan en la pulpa que rodea las semillas del cacao, donde las levaduras actúan sobre los azúcares dispuestos en la pulpa convirtiéndolo en alcohol y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Además, se pueden llegar a dar fermentaciones ácido-lácticas gracias a la presencia de este tipo de bacterias, causando reacciones bioquímicas que ayudan a la degradación de la pulpa de cacao, transformándola en un lixiviado. Asimismo, la presencia de enzimas pectolíticas y glucosidasas intervienen para llevar a cabo la degradación de los polisacáridos presentes en la pulpa y las semillas de cacao, una vez transcurrido el primer día de fermentación se da paso a la oxidación del alcohol en ácido acético, el pH se torna más ácido pasando de 6,5 a 4,5 y debido a las transformaciones bioquímicas, la masa fermentativa aumenta su temperatura que da como resultado la muerte del embrión, estas reacciones se traducen finalmente en la disminución de la astringencia y amargura de los granos de cacao, acompañados de la coloración marrón característica de los granos de cacao (Afoakwa, 2014; Belitz et al., 2004; ICCO, 2023).

Entre las variables a controlar en el proceso de fermentación se listan entre otras: temperatura, pH, presencia e inoculación de microorganismos, tipos de fermentadores,

lecho o masa de fermentación, frecuencia de volteo y procedimiento de volteo. Asimismo, existen distintos tipos de fermentadores, entre los que podemos encontrar; cajones, costales, bandejas, montones, tambor rotatorio, entre otros. La interacción entre las variables identificadas anteriormente y el tipo de fermentador utilizado presenta efectos significativos en el proceso de fermentación de los granos de cacao (Dubón, 2016; Perea Villamil, 2019; Santander Muñoz et al., 2020; Teneda Llerena, 2017).

#### **5.3.1.4 Secado.**

El secado del cacao tiene como finalidad bajar drásticamente el contenido de agua del grano de cacao de un 60 % a valores inferiores al 8 % para de esta manera evitar el desarrollo de microorganismos como mohos que contaminen los granos y cambien drásticamente las características organolépticas y de la calidad de los granos de cacao, además de que es crucial para poder almacenar los granos de cacao sin perder las características de calidad. Este proceso ayuda a desarrollar y culminar las reacciones bioquímicas iniciadas en el proceso de fermentación, disminuyendo la astringencia, amargor y mejorando la coloración marrón de los granos de cacao (Afoakwa, 2014; Belitz et al., 2004).

El secado se lleva a cabo mediante la disposición de los granos de cacao sobre una superficie separada del suelo que permite la aireación de los granos de cacao y a su vez la disposición de estos al agente deshidratador. El secado del cacao en las primeras horas del proceso se debe realizar en horas de baja luminosidad y poco tiempo de exposición, ya que al realizarlo de forma rápida y con alta luminosidad, se pueden generar alteraciones en las características sensoriales del grano de cacao percibidas en niveles altos de acidez debido a la presencia de ácido acético en los granos de cacao, por ello se recomienda comenzar con el proceso fermentativo en horas tempranas de la mañana y

forma pausada (Dubón, 2016; ICCO, 2023; Perea Villamil, 2019). Adicionalmente, se deben hacer remociones periódicas durante todo el proceso de secado y como lo recomienda Dubon (2016), en los primeros tres (3) días los granos de cacao se debe remover cada treinta (30) minutos y una vez pasados los tres (3) días se realizan remociones cada sesenta (60) minutos.

Los métodos de secado del cacao se clasifican primordialmente en dos; secado natural y secado artificial, el secado natural se lleva a cabo mediante la exposición de los granos de cacao en horas de luminosidad solar y una vez terminadas estas horas sol los granos de cacao son protegidos del “sereno” o la humedad relativa nocturna (Afoakwa, 2014; Dubón, 2016). El sistema de secado natural debe asegurar la protección de los granos de cacao de agentes externos como: precipitaciones, polvo, animales y otros (Perea Villamil, 2019). Por otro lado, en el secado artificial, existen múltiples subtipos de secadores, entre los que se pueden encontrar secadores eléctricos, secador Samoa, por convección, entre otros. En muchos casos estos secadores presentan como fuente energética la combustión y la energía solar (Dubón, 2016; Perea Villamil, 2019) como variable importante a controlar para cualquier método de secado artificial es importante establecer como límite de control temperaturas inferiores a 60 °C para obtener las mejores características en los granos de cacao (Contreras Pedraza, 2017; Patrimonio Natural, 2020). Como mecanismo para determinar la culminación del secado se utiliza un medidor digital de humedad que indica si el proceso culmino de forma correcta (Dubón, 2016).

#### **5.3.1.5 Empaque y Almacenamiento.**

El empaque de los granos de cacao se da en sacos o costales de uso exclusivo para cacao, una vez se ha llegado a una humedad del grano inferior al 8 % y se eliminan las impurezas, cascarilla o materiales externos que pudieron ingresar a los granos de

cacao, posteriormente se debe hacer una clasificación de los granos en cumplimiento a las normas o requisitos para la clasificación de los mismos (Afoakwa, 2014; Perea Villamil, 2019), en Colombia esta clasificación es realizada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC] mediante la NTC (Norma Técnica Colombiana) 1252 que establece los requisitos de calidad para la comercialización de los granos de cacao. El almacenamiento se debe realizar en un espacio con baja humedad relativa <65 %, control de temperatura, ventilado y con protección para evitar el ingreso de aguas lluvias, polvo y animales (Dubón, 2016; Patrimonio Natural, 2020).

#### **5.3.1.6 Transporte.**

El transporte de cacao se lleva a cabo de dos maneras; 1. Cuando se realiza el proceso de compra y venta de cacao fresco (en baba), este tipo de transporte debe realizarse con recipientes limpios, de uso exclusivo para el empaque y transporte de cacao en baba y cerrados que mantengan la calidad del producto y sin la presencia de otro tipo de insumos o materiales que puedan contaminar, se debe tener en cuenta no sobrepasar el peso de 50 kg para el empaque del cacao, en este caso la entrega del cacao en baba debe ser inferior a 6 horas después de haber desgranado los frutos de cacao. Por otro lado, se presenta el transporte 2. Que se realiza en la compra y venta del cacao en grano seco, en este caso los vehículos presentar condiciones de alta limpieza, cerrados y evitar la presencia y uso de estos vehículos para transportar materiales que puedan generar contaminación como: estiércol, combustibles y otros productos químicos. Asimismo, el vehículo debe evitar la condensación del agua por cambios de temperatura (Aguilar, 2017).

#### **5.4 Estado del Arte**

A continuación, se presentan modelos de optimización realizados en los últimos años en la bibliografía mundial y que pueden retroalimentar el presente proceso de investigación.

Guarnaschelli et al. (2020) proponen un modelo de optimización estocástico para la planificación integrada de la producción y distribución en la cadena de suministro de queso, yogur, leche en polvo y productos UHT buscando integrar los departamentos de abastecimiento, producción y logística a través del flujo físico de productos, para la programación de operaciones. Este modelo presenta dos componentes, un modelo de planificación agregada, tomando decisiones de campaña de producción, perecebilidad de materias primas y productos, limitaciones de producción, inventario de materia prima en curso, envío de productos, vida útil, tipo de camiones y capacidad de envíos, lotes a exportar; y como segundo componente, un modelo de planificación detallado que desagrega la demanda y establece la cantidad de producción por cada producto, los camiones requeridos, balance de inventarios, centros de distribución. Para reducir los escenarios de planificación agregada y detallada se usa un algoritmo (clustering) de reducción de escenarios para la demanda. Finalmente, se obtiene un beneficio neto de 21.1 % en comparación al modelo de planeación de la demanda por valor medio utilizado anteriormente. Es importante aclarar que, si bien existe un componente de suministro, este se encuentra tercerizado en el caso de estudio, por lo que no se establece un modelo de ruteo vehicular de materias primas.

Vanzetti et al. (2019) proponen un modelo de optimización de programación lineal de enteros mixtos con el fin mejorar el suministro de troncos para el plan de producción en la industria forestal. Optimizando el nivel de decisiones de cada proveedor, compras de

MP, cantidad de troncos por tipo (diámetro y longitud) a cortar, nivel de stock de MP, stock de productos, maximizando el beneficio neto. Para ello, 1) se definen las restricciones de operaciones de bucking, 2) se definen las restricciones de inventario de troncos en el aserradero, 3) se definen las restricciones para la transformación de troncos y producción de madera, 4) se definen las restricciones de inventarios de tablero y cumplimiento de la demanda, para finalmente definir la función objetivo de beneficio neto. Posteriormente, realiza una comparación del modelo, 1) con el *bucking* y producción integrada y 2) con los modelos separados, obteniendo que el modelo integrado presenta un beneficio neto 7 % superior al modelo sin integrar, por lo que se recomienda la integración del modelo para no aumentar los costos, ya que, si bien en el modelo por etapas los ingresos son superiores, los costos también se elevan afectando directamente el beneficio neto. Si bien, el modelo gestiona el flujo de entrada de materias primas (troncos), no determina un método de transporte.

Paredes-Belmar et al., (2022) presentan un modelo de ruteo para maximizar el beneficio neto en la empresa de estudio mediante la diferencia de ingresos y costos, para la modelización de rutas para de recolección de leche teniendo en cuenta el número de células somáticas presentes en la leche al momento de la compra y clasificándola según el grado (A, B y C) y realizando mezclas de la leche obtenida, haciendo medición de las células somáticas al momento de la compra, abordando condiciones de flota heterogénea de camiones. Posteriormente, se implementó un algoritmo de bifurcación y corte para resolver el problema en instancias pequeñas 75-100 nodos y para las instancias más grandes se realizó una metaheurística de búsqueda local iterada con el fin de minimizar los costos de transporte en un estudio de caso en Chile. El problema se solucionó mediante la aplicación de los algoritmos relacionados anteriormente y el solucionador CPLEX

obteniendo como resultado se obtuvo una mejora en el beneficio neto correspondiente al 30 %.

Cóccola et al., (2022) presentan un modelo optimización de flujo de materiales y recursos en un estudio de caso para la industria láctea integrando la recolección, abastecimiento, producción en una cadena de suministro con horizonte de tiempo de 1 a 2 semanas. Para ello, se trabajan 2 etapas, en la primera etapa se lleva a cabo la asignación de rutas de recolección de materia prima y rutas de entrega de productos terminados, desacoplando las decisiones de enrutamiento, del problema de optimización restante, en la búsqueda de relajar el problema de optimización, generando así un conjunto de rutas de recolección y entrega para la organización que minimice los costos de suministro, determinando las rutas de recolección de forma heurística; en la segunda etapa se diseña un modelo de optimización de enteros mixtos integrado, que es alimentado por la información de rutas de recolección de materias primas y entrega de productos, buscando optimizar las decisiones de adquisición, inventario, producción, y distribución, maximizando el beneficio neto de la empresa que fabrica, obteniendo como resultado una mejora sustancial para la toma de decisiones en la industria láctea a través del modelo planteado.

Mujica Mota et al. (2019) evaluaron la cadena de suministro de cacao en Costa de Marfil utilizando un modelo de simulación contado con indicadores de productividad, desempeño para el transporte y comercialización de cacao y manteca de cacao. Los hallazgos indican que reducir los puntos de control en un 50 % podría aumentar la productividad en un 30 % y el valor del cacao en el puerto en un 5 %. Además, se observó que mejorar la infraestructura vial y el transporte hacia el puerto tendría un impacto significativo en la eficiencia de la cadena de suministro. Los autores resaltan la importancia

de evaluar la cadena logística desde perspectivas económicas, ambientales y sociales, considerando diferentes políticas y aspectos logísticos para aumentar la productividad y el valor en el puerto, mejorando así la rentabilidad y sostenibilidad del sector.

Sana et al., (2017) proponen un modelo de optimización bi-nivel colaborativo para la agroindustria del cacao en el departamento de Bolívar-Colombia, llevando a cabo dos metodologías de optimización donde: la metodología 1) define dos tipos de roles, el líder y el de soporte, buscando definir las funciones objetivo y restricciones para las dos partes; la metodología 2) forma coaliciones o grupos de proveedores (productores de cacao) y se integran al modelo de funcionamiento de las plantas, teniendo en cuenta sus restricciones, parámetros y F.O. integrando las operaciones y necesidades de las partes. Se evaluó si la cooperación e integración de los productores con los puntos de recolección de cacao mejoraba los beneficios de parte y parte en comparación con una metodología donde no se lleva a cabo esta integración de las partes, encontrando que, al momento de integrar los productores a través de una coalición o grupos, se presentó un aumento del 7,7 % en los beneficios para cada una de las partes, mostrando que el modelo colaborativo (valor de shapley) presenta un mejor comportamiento económico en comparación con el modelo no colaborativo.

Alshekhli et al. (2011) diseñaron un modelo de simulación y optimización de un proceso industrial de fabricación de cacao utilizando herramientas de simulación asistida por computadora. Se modela el proceso base y se identifica la alcalinización como el cuello de botella principal. Se proponen varios esquemas de desatranque para aumentar la producción anual de 2638 a 5276 lotes de productos de cacao. Dos de estos esquemas logran duplicar la producción, con análisis económicos que muestran igual atractivo

financiero. Los autores resaltan la importancia de la simulación en la evaluación de alternativas y en la aceleración del desarrollo industrial para el sector cacao.

La estrategia de modelación para la optimización de procesos en cacao a nivel general ha sido poco utilizada desde los sistemas de cultivo (Tosto et al., 2023) hasta la cadena de suministro. Centrándose en la optimización y mejora de procesos de transformación individuales como el secado de los granos de cacao (Ahmed et al., 2020), conservación de los compuestos bioactivos en las cáscaras de cacao (Md Yusof et al., 2019) extracción de nibs de cacao (Srikanth et al., 2020) deslignificación y extracción de pectina en la cacota de cacao (Mensah et al., 2020; Ouattara et al., 2022; Sarah et al., 2022) y procesos de mejora en las propiedades fisicoquímicas de la manteca de cacao (Bölük et al., 2024; Shekarchizadeh et al., 2014). Al momento de la publicación de este trabajo solo se han encontrado tres trabajos que realizan procesos de modelación en alguno de los macroprocesos de la cadena de suministro de cacao (Alshekhli et al., 2011; Mujica Mota et al., 2019; Sana et al., 2017) que dan cuenta de la brecha de investigación en este sector.

## 6 Diseño Metodológico

A continuación, se presenta el diseño metodológico seguido para la optimización de la cadena de suministro postcosecha de cacao en las empresas de estudio del departamento de Arauca.

### 6.1 Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, descriptiva y mixta (Hernández-Sampieri, 2023) tomando como objeto de estudio las cooperativas Coomprocar y Coopcacao ubicadas en el departamento de Arauca buscando entregar una solución a un problema organizacional a partir de referentes estratégicos, mediante un modelo de optimización logístico como herramienta de mejora para la organización.

### 6.2 Población, Muestra y Ficha Técnica

El proceso de investigación tomó como población las cooperativas Coomprocar y Coopcacao ubicadas en el departamento de Arauca. Asimismo, se establece una muestra no probabilística de colaboradores y proveedores de las cooperativas que presentan relación con el funcionamiento operacional de la organización (Lastra, 2000). Debido a que las organizaciones presentan menos de 10 trabajadores y no existen procesos de operación estandarizados, se tomó como muestra el gerente general de la cooperativa y el líder del área comercial y operativa para el caso de la cooperativa Coomprocar (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) dado su conocimiento y experiencia integral del funcionamiento interno de la organización. En la cooperativa Coopcacao se tomó como muestra el gerente general, líder del área de producción y comercialización (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

### 6.3 Identificación de Variables

A partir de la revisión de referentes teóricos se identificaron variables que responden a los procesos de suministro y producción en las organizaciones entre las que se encuentran: gestión de proveedores, características de materias primas, transporte de materias primas, inventario de materias primas, previsión de producción, materias primas y productos, tiempos y capacidad de producción (Arenal Laza, 2022; Chopra & Meindl, 2013; Mauleon & Prado, 2021).

### 6.4 Definición Conceptual

- **Características de productos y materia primas:** requisitos, comportamiento y clasificación de las materias primas necesarias para los procesos de producción en la organización
- **Gestión de proveedores:** la gestión de proveedores busca medir el nivel de relación entre la organización y sus proveedores, buscando cumplir con las necesidades de compra de materias primas.
- **Transporte de materias primas:** contextualiza como se llevan a cabo los procesos de recolección y entrega de materias primas desde las fincas productoras hasta las plantas de transformación postcosecha.
- **Abastecimiento de materias primas:** relaciona el comportamiento y política de ingreso, clasificación, nivel y capacidad de existencia de materias primas en las plantas de transformación postcosecha.
- **Previsión de producción, materias primas y productos:** define las decisiones de planificación y programación de tareas, producción en las plantas de transformación.

- **Tiempos y capacidad de producción:** define características de tiempos y capacidad de procesamiento de cada una de las operaciones de transformación en las plantas de transformación.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan las características a considerar en las variables de la cadena de suministro aplicadas en el presente trabajo a las cooperativas Coomprocar y Coopcacao.

**Tabla 1**

*Operacionalización de factores y variables*

Dimensión	Tipo	Indicador	Medición	Variables
Características de materias primas y productos	Cualitativa	Cumplimiento de especificaciones	Sí, No	Tipos (cacao en baba, cacao seco, frutos de cacao)
Gestión de proveedores	Cuantitativa	Frecuencia de compra	Semanal, quincenal	Tiempo de recolección
Transporte de materias primas	Cuantitativa	Costo de recolección y transporte de materias primas	Costo por kilogramo	Distancia, tipo de transporte, tiempo de entrega.
Abastecimiento de materias primas	Cuantitativa	Costo de compra materia prima	Costo por kilogramo	Costo, periodo de reabastecimiento, clasificación.

---

Previsión de producción, materias primas y productos.	Cualitativa	Cumplimiento de la previsión	Sí, No	Proyección de demanda, datos históricos de ventas, plan de compras.
--	-------------	---------------------------------	--------	---

---

## 6.5 Instrumentos de Medición

Como instrumento de recopilación de información se establece la entrevista semiestructurada (ver Anexo A), ya que se busca recopilar la mayor información posible para determinar el funcionamiento actual de los procesos de abastecimiento y producción en las cooperativas, se formulan preguntas abiertas por cada variable identificada previamente, para un total de 30 preguntas aplicadas al personal relacionado con dichos procesos en la organización. Los datos recolectados fueron analizados mediante técnicas de análisis temático, identificando patrones y categorías en las respuestas del gerente. A partir de este diagnóstico, se identificaron las principales necesidades y oportunidades de mejora, las cuales sirvieron como base para la propuesta de optimización de la organización.

La recopilación de la información de los productores de cacao que abastecen las plantas de transformación se lleva a cabo mediante una entrevista estructurada que busca conocer su ubicación y niveles de producción en las fincas a lo largo del año, la entrevista puede ser consultada en el Anexo B.

Para abordar las deficiencias en la cadena agroalimentaria de cacao en el departamento de Arauca, se empleó el análisis temático como metodología cualitativa principal. Esta metodología permite identificar y analizar patrones recurrentes en las

percepciones y prácticas de los actores clave en las cooperativas seleccionadas, buscando proporcionar una comprensión profunda y detallada de los procesos y desafíos en la cadena agroalimentaria de cacao, facilitando la identificación de áreas clave para la intervención y mejora (Nowell et al., 2017).

## **6.6 Modelo de Optimización**

En la primera etapa se determinan las características del proceso de abastecimiento de las plantas a través de la información obtenida de los productores de cacao del departamento de Arauca, entre los que se encuentra su ubicación en coordenadas de georeferenciación, sus niveles de producción de frutos de cacao, cacao en baba y cacao en grano seco. Siendo esta información fundamental para el desarrollo del modelo de optimización. Una vez obtenida la información se realizó el mapeo de fincas y plantas determinando su ubicación geográfica, su nivel de producción y las distancias entre nodos pertenecientes a la red de suministro. Se determina solucionar el modelo bajo una heurística de clustering donde se asignan las fincas y plantas a clústeres definidos bajo criterios agroclimáticos y distancia respectivamente. Debido a la complejidad del problema, se diseña un modelo de programación lineal entero mixto descompuesto en dos submodelos subproblema de asignación zona – día y subproblema de ruteo *CVRP* (Vidal, 2022). El subproblema de asignación zona – día, determina los horarios de visita a cada una de las zonas climáticas a visitar. El subproblema de ruteo *CVRP* (*Capacited Vehicle Routing Problem*) determina la cantidad de materia prima a recolectar en cada finca, el número de vehículos a utilizar de los vehículos disponibles, la secuencia de la ruta para cada una de las zonas. Asimismo, se proponen tres indicadores de sostenibilidad que permitan la evaluación del modelo de optimización en sus distintos métodos de operación desde las perspectivas económica, social y ambiental.

## 6.7 Análisis de Escenarios

Se efectuó un análisis de escenarios del modelo de optimización propuesto considerando como factores el tipo de materia prima a transportar (Semillas de cacao – Frutos de cacao) y temporada de cosecha de cacao (Alta cosecha – Baja cosecha). La aplicación y análisis de los escenarios dispuestos en la Tabla 2, permitirá a la organización establecer cuál es el método de operación que maximiza sus ganancias.

**Tabla 2**

*Diseño de análisis de escenarios*

	Factores		Abreviación
	Tipo Materia Prima	Temporada de Cosecha	
Escenarios	Semillas de Cacao	Alta Cosecha	SC-AC
	Semillas de Cacao	Baja Cosecha	SC-BC
	Frutos de Cacao	Alta Cosecha	FC-AC
	Frutos de Cacao	Baja Cosecha	FC-BC

*Nota.* Elaboración propia

## 6.8 Modelo de Funcionamiento Operacional

Como una extensión de la propuesta de optimización de la cadena de suministro postcosecha de cacao con denominación de origen surgió la necesidad de adaptar el funcionamiento operativo de la organización. En consecuencia, el estudio busca ofrecer una guía para la implementación del modelo de optimización propuesto. Se realizó un mapeo de las operaciones lideradas por las cooperativas mediante el modelo de Referencia de Operaciones de la Cadena de Suministro 12 (SCOR-12) (Association for Supply Chain Management [APICS], 2017), detallando el procedimiento y actividades a

realizar en cada uno de los procesos operacionales bajo la aplicación del nuevo modelo de optimización propuesto.

## **Diagnóstico Organizacional**

A continuación, se presentan los resultados más importantes obtenidos durante la ejecución de la investigación comenzando por la caracterización del funcionamiento operativo actual de las cooperativas Coomprocar y Coopcacao, la determinación de las condiciones de ruteo, la propuesta de modelos y finalmente la evaluación económica del modelo de optimización propuesto.

### **6.9 Análisis de Funcionamiento Operativo Actual**

Actualmente, las cooperativas llevan a cabo procesos operativos de funcionamiento, por lo que es de vital importancia conocer cuáles son las actividades, operaciones, procesos y decisiones que se llevan a cabo y posteriormente analizar deficiencias o fortalezas en el sistema actual, para la construcción de una nueva propuesta.

#### **6.9.1 Identificación de Características de Funcionamiento Actuales**

A partir de las entrevistas ejecutadas a los gerentes de las cooperativas de transformación postcosecha de cacao se entregan los resultados según las variables macro identificadas.

##### **6.9.1.1 Características de Productos y Materia Primas**

Las características de productos y materias primas identificadas en la cooperativa Coomprocar como los productos, niveles de producción, tipo de materia prima, rendimiento de materia prima a producto, criterios de selección, meses de alta oferta de materias primas y acciones por recepción de materia prima en malas condiciones se detallan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El cacao en grano seco es el principal producto comercializado por las cooperativas con un total de 2000 ton, mensuales. La cooperativa Coomprocar lleva a cabo procesos

de compra de cacao en baba en presentación de 20 kg, adquiridos de la compra directa a los productores de cacao de los municipios del departamento de Arauca para posteriormente realizar la transformación postcosecha con el fin de obtener y comercializar cacao en grano seco. La cooperativa Coopcacao no realiza proceso de compra de cacao en baba como materia prima, comprando y comercializando cacao en grano seco directamente de los productores, realizando el acondicionamiento del cacao adquirido para más adelante ser comercializado a clientes industriales. Los demás productos como chocolate de mesa y chocolatinas son tercerizado a empresas con mayor nivel de transformación industrial.

**Tabla 3**

*Características de productos y materias primas*

Descripción	Coomprocar	Coopcacao
Productos	- Cacao seco - Chocolate - Chocolatinas.	- Cacao seco - Chocolate - Chocolatinas.
Producción cacao en grano (ton.)	- 700	- 1300
Tipo de materia prima	- Cacao Seco - Cacao en baba	- Cacao seco
Materia prima a utilizar por kg de producto obtenido	- 7 kg Cacao en baba - 1 kg cacao seco	- 1 kg cacao seco
Criterios de selección	- Selección NTC 1252	- % Humedad
Meses de alta oferta de materias primas	-mayo -junio -julio -noviembre	-mayo -agosto, -septiembre, -diciembre

---

Acciones por recepción de MP en malas condiciones	- Venta diferenciada - Penalización - Secado adicional	No se recibe materias primas en malas condiciones
---	--	---

---

*Nota.* Elaboración propia

Para la obtención de 1 kg de cacao en grano seco Coomprocar necesita en promedio 7 kg de cacao en baba, en el caso de la compra de cacao en grano seco como materia prima la relación es 1:1 ignorando las pérdidas por manejo. Asimismo, las organizaciones cuentan con criterios de ingreso de materias primas a las instalaciones, para el caso de cacao en baba Coomprocar define como tiempo máximo de desgrane de cacao de dos días para el ingreso de la materia prima, como son la NTC:1252 y el porcentaje de humedad de los granos de cacao seco, no obstante, Coomprocar no cuenta con medidor de humedad, llevando a cabo el proceso manualmente. La cooperativa Coomprocar despliega acciones en caso de ingreso de materias primas en malas condiciones como: ventas diferenciadas, penalización o secado adicional según sea el caso. En el caso de Coopcacao indican no recibir materias primas que no cumplan con los requerimientos en la NTC:1252.

Las cooperativas indican alta disponibilidad de materias primas en los meses comprendidos de mayo hasta agosto en el primer ciclo de alta producción y de noviembre a diciembre como segundo ciclo de producción. Por lo que son estos meses donde las cooperativas deben contar con la disponibilidad de mayores recursos y procesos optimizados para la adquisición de dichas materias primas, transformación y posterior comercialización del cacao en grano seco. En los meses de baja disponibilidad de materias primas, las cooperativas deben adaptarse para seguir operando en estas condiciones,

llevando a cabo procesos que garanticen el ingreso de materias primas a la planta para su funcionamiento adecuado.

### **6.9.2 Previsión de Producción, Materias Primas y Productos**

Las cooperativas llevan a cabo procesos de previsión de compra de materias primas, así como las cantidades de productos a obtener en un periodo de tiempo de tres años para la cooperativa Coomprocar. Por otro lado, la cooperativa Coopcacao no cuenta con herramienta para el pronóstico de la producción y compra de materias primas a sus proveedores.

Las cooperativas planifican sus procesos operacionales sujetos a la oferta de materias primas presente las fincas productoras de cacao del departamento, por lo tanto, las cooperativas comercializan y entregan a sus clientes el total de los productos obtenidos en el horizonte de planificación. El pronóstico de la producción en las cooperativas es diferenciado, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Coomprocar realiza el proceso de previsión mediante datos históricos de los tres años anteriores, mediante el método de promedio móvil. En contraposición Coopcacao no realiza previsión para su funcionamiento operacional, indicando toma de decisiones operativas basadas en la experticia de la gerencia sin bases tácticas o cuantificables que soporten el proceso de gestión, pudiendo aumentar el riesgo de incumplimientos. Por otra parte, la planificación de la producción se da mediante la creación y seguimiento de cronogramas o planes de trabajo mensuales en las cooperativas que se pueden ver afectados según el pronóstico efectuado anteriormente.

#### **Tabla 4**

*Resultados previsión de producción, materias primas y productos*

Descripción	Coomprocar	Coopcacao
Pronóstico de la producción	- Pronostico a partir de datos históricos de los últimos tres años	- No cuenta con sistema de pronóstico
Planificación de la producción según oferta o demanda	Según disponibilidad de materia prima	Según disponibilidad de materia prima
Planificación de la producción	Mensual según pronostico basado en los últimos 3 años	Cronograma de trabajo mensual y planes de transporte
Secuencia de transformación postcosecha	Asignación de rutas, recolección, fermentación, secado, almacenamiento, clasificación y entrega	Recolección, Selección, empaque, clasificación y entrega

*Nota.* Esta tabla presenta como la organización planifica el proceso de producción.

Adaptado de información suministrada por las Cooperativas

Las cooperativas cuentan con procesos de transformación diferenciados, considerando que la cooperativa Coopcacao actualmente no adquiere cacao en baba como materia prima, esta no cuenta con procesos de transformación postcosecha, ya que estos son llevados a cabo por los productores de cacao en sus predios, en este sentido la Coopcacao realiza procesos de ruteo, selección, clasificación, empaque, almacenamiento y entrega de cacao en grano seco. La cooperativa Coomprocar, realiza procesos de transformación postcosecha desde la obtención de cacao en baba, ejecutando los procesos de: asignación de rutas, recolección, fermentación, secado, clasificación, almacenamiento y entrega de productos. Además, Coomprocar recolecta cacao en grano seco como materia prima, integrando los de selección, clasificación, almacenamiento y entrega para este modelo de suministro.

### 6.9.3 Gestión de Proveedores

Para la gestión de proveedores como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, las cooperativas cuentan con mecanismos similares que se ajustan a las características de los proveedores principales y la dinámica de compra de materias primas de la región.

**Tabla 5**

*Resultados gestión de proveedores*

Descripción	Coomprocar	Coopcacao
Seguimiento a la oferta de materia primas	Semanal vía celular con proveedor	Semanal vía celular con proveedor
Selección de proveedores	No se cuenta con política de selección, compra a cualquier productor.	No se cuenta con política de selección, compra a cualquier productor.
Regularidad de proveedores	300 productores de cacao fijos, 1046 a 2000 proveedores variables según precio.	Variable, según el precio
Frecuencia de compra	- Cacao seco (15 días). -En baba (Semanal).	- Cacao seco (15 días)
Comunicación con proveedores	Vía celular	Vía celular
Factores de decisión, compra de materias primas	Calidad, cantidad, precio	Calidad, cantidad, precio

*Nota.* Adaptado de información suministrada por las Cooperativas

El seguimiento de la oferta de materias primas es realizado por las cooperativas mediante comunicación vía móvil celular debido a las características rurales y grandes distancias entre la red de suministro, haciendo un seguimiento semanal de la disponibilidad

de materia prima en los predios productores. Por otra parte, las organizaciones no cuentan con políticas de selección de proveedores, debido a la variable regularidad de compra de materias primas a los proveedores, esto se da por la dinámica de precio presente en la compra y venta de cacao definido por la bolsa de valores de New York y Londres, por ello, los productores de cacao deciden entregar su cacao al acopiador con mejor precio de compra de materias primas. En el caso de Coomprocar existe fidelización de algunos proveedores (300) gracias a la implementación de múltiples estrategias de compra como préstamos, intercambio por insumos, precios diferenciados por afiliación y calidad.

La frecuencia de compra de materia prima se encuentra diferenciada según su nivel de procesamiento, para el caso de compra de cacao en baba, la recolección y transporte por zonas se gestiona semanalmente. El cacao en grano seco presenta un horizonte de planificación quincenal (2 semanas) conjuntamente en las cooperativas debido a la ejecución de los procesos de cosecha, desgrane y fermentación que son llevados a cabo en un tiempo promedio de una semana, más los siete días de duración promedio de los procesos de secado y empaque ejecutados en los predios productores.

Entre los factores más determinantes para la adquisición de materias primas por parte de las cooperativas a los proveedores de cacao se encuentran: calidad, cantidad y precio, el factor calidad es el principal factor de decisión, debido a las primas de calidad generadas por parte de los clientes de las cooperativas, trasladando este incentivo a los productores, los factores de cantidad y precio se encuentran en segundo plano, pero son igualmente importantes para disminuir los costos de adquisición en las cooperativas.

#### **6.9.4 Abastecimiento de Materias Primas**

El abastecimiento de materias primas para las cooperativas se realiza mediante la compra de materias primas según la oferta de los productores de cacao del departamento

de Arauca, esto comienza por definir el precio de compra del cacao según el precio de referencia definido por la bolsa de valores que es indicado de forma semanal por Fedecacao, posteriormente la cooperativa establece las rutas, sujeto al nivel de procesamiento de la materia prima (en baba o seco) y cantidad de materia prima disponible por los productores, estas rutas son definidas por zonas que cuentan con criterios de cercanía principalmente. Actualmente, el proceso de asignación de rutas se realiza de forma intuitiva y a partir de la experticia de la alta dirección, siendo ausente el uso de sistemas que soporten y mejoren la toma de decisiones (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

**Tabla 6**

*Resultados abastecimiento materias primas*

Descripción	Coomprocar	Coopcacao
Costo de materia prima	Definido por la bolsa de valores (precio de mercado)	Definido por la bolsa de valores (precio de mercado)
Reabastecimiento de materias primas	Planeación empírica de rutas de forma semanal según oferta de productores	Planeación empírica de rutas de forma semanal según oferta de productores
Clasificación de materias primas	Indican clasificación según la NTC 1252	- Cacao en baba: cacao blanco, cacao corriente y cacao negro
Punto de equilibrio semanal	35 ton/sem	10.5 ton/sem

*Nota.* Adaptado de información suministrada por las Cooperativas

Posteriormente, las cooperativas realizan la clasificación de las materias primas según el nivel de procesamiento. Coomprocar realiza clasificación del cacao en baba mediante compra diferenciadas para cada una de las clasificaciones establecidas en la

organización, siendo el caco corriente la clasificación base para definir el precio según el mercado, el cacao blanco es comprado con una prima del 10 %, el cacao negro se penaliza en 4 %, a continuación se define cada una de las clasificaciones de cacao en baba: 1. Cacao blanco es la clasificación con mayor valor comercial debido a la obtención de granos de cacao frescos, sanos y limpios, pudiendo asegurar una mejor calidad de grano seco a partir de estos; 2. Cacao corriente son los granos de cacao generado a partir de la mixtura de cacao blanco con cacao sobre fermentado o impurezas propias de los frutos de cacao; 3. Cacao negro se refiere a los granos de cacao que por distintos factores ya han iniciado su proceso de fermentación de forma descontrolada, generando características sensoriales y de calidad diferenciadas que afectan la calidad de los productos obtenidos a partir de estos granos.

La cooperativa Coopcacao lleva a cabo el proceso de clasificación de materias primas para el cacao en grano adquirido como materia prima a los productores, dicha clasificación se realiza según la NTC 1252, especialmente según el tamaño de grano. La cooperativa Coomprocar en algunos casos realiza la clasificación de cacao en grano seco, pero es tratado como una clasificación de calidad para la comercialización del producto obtenido.

Como punto de equilibrio para las cooperativas Coomprocar y Coopcacao se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es de 35 ton/sem y 10.5 ton/sem respectivamente como cacao en grano seco, para el caso de la cooperativa Coomprocar puede alcanzar este punto de equilibrio adquiriendo y procesando cacao en baba o comprando y acondicionando cacao en grano seco a los productores, Coopcacao puede alcanzar este nivel de producción adquiriendo y acondicionando cacao en grano seco.

### 6.9.5 *Recolección y Transporte de Materias Primas.*

La recolección y transporte de materias primas en las cooperativas se dan según el nivel de procesamiento (cacao en baba o cacao seco) para este proceso Coomprocar cuenta con un vehículo propio con una capacidad de 2.000 kg donde los factores determinantes para establecer el costo de R+T son la ubicación y la cantidad de MP cosechada. Por otro lado, Coopcacao no cuenta con vehículos propios para realizar la R+T. Debido a las cantidades cosechadas en las zonas de afluencia de las cooperativas y la poca o nula disponibilidad de vehículos, las cooperativas realizan subcontratación del servicio de R+T con personas naturales o jurídicas dedicadas a dicha actividad, estableciendo el costo de R+T según el nivel procesamiento como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el porcentaje de participación de los costos de R+T sobre los costos totales se encuentran para las cooperativas entre el 1 – 2 %.

**Tabla 7**

*Resultados recolección y transporte de materias primas*

Descripción	Coomprocar	Coopcacao
Disponibilidad y capacidad de vehículos	-Vehículos propios: 2 - Capacidad: 2 – 5 ton. -Subcontratación	-Vehículos propios: 0 -Subcontratación
Costos de transporte	-Según distancia y cantidad de MP - Costo de R+T cacao en baba: \$ 1.500 – 2.000 kg - Costo de R+T cacao seco: \$ 100 kg - % participación: 1 % - 1.4 %	-Según distancia y cantidad de MP - Costo de R+T cacao seco: \$ 100 kg - % participación: 1 % - 2 %

Tiempo de recolección	Cacao en baba: 2 días, Max.	-
Información de ubicación, distancia y producción	Información de ubicación y producción para algunos proveedores	Información de ubicación y producción para algunos proveedores
Planificación de rutas	Rutas por zona (semanal) se envía independiente de la oferta de MP. Haciendo un sondeo de los productores.	Rutas por zona (semanal) se envía independiente de la oferta de MP. Haciendo un sondeo de los productores.

*Nota.* Adaptado de información suministrada por las Cooperativas

Como tiempo de recolección máximo, actualmente solo la cooperativa Coomprocar cuenta con límite de recolección, establecido en 2 días para el cacao en baba, posteriormente la recolección de estas materias primas se consideran cacao en fermentación, dificultando la obtención de productos de calidad sensorial. Para esto es importante, la información de ubicación, distancia y producción de cada uno de los productores de cacao (proveedores). Sin embargo, las cooperativas cuentan con información limitada en este sentido, lo que dificulta aún más la planificación de rutas que aseguren las características potenciales de calidad de las materias primas transportadas. Asimismo, la planificación de rutas se realiza de forma periódica (semanal) asignando vehículos a rutas específicas independientes de la oferta de materia prima disponible en dicho sector. Las condiciones de ruteo actuales descritas anteriormente, dificultan la optimización de recursos y la toma de decisiones debido a un alto grado de incertidumbre para los procesos posteriores de producción (ver

La Cooperativa Coomprocar lleva a cabo procesos de transformación postcosecha en sus instalaciones contando con una capacidad de fermentación y secado de 12 ton/sem, realizando la planificación de la producción mediante previsión a partir de los registros históricos de transformación postcosecha de los últimos 3 años. El abastecimiento y la producción en la cooperativa no se encuentra integradas, esto debido a que la cooperativa planea la producción o transformación postcosecha a partir de las materias primas adquiridas a los productores una vez ingresadas a la planta de transformación, puesto que, no dispone de mecanismos para determinar la cantidad de materia prima disponibles por los productores de cacao, llevando a cabo los procesos de transformación postcosecha a partir del cacao recolectado y transportado hacia las cooperativas, generando variaciones en el nivel de utilización de la capacidad operativa.

).

#### **6.9.6 Producción (Tiempos, Capacidad y Costos)**

Como se puede observar en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la cooperativa Coopcacao no lleva a cabo procesos de transformación postcosecha de cacao en sus instalaciones, siendo los productores quienes realizan este proceso en sus predios y Coopcacao compra el cacao con el proceso de transformación postcosecha finalizado obtenido cacao en grano seco, sin embargo, realiza procesos de acondicionamiento del cacao en grano comprado a los productores de cacao del departamento de Arauca, como clasificación, empaque, almacenamiento y entrega de producto terminado a los clientes.

La Cooperativa Coomprocar lleva a cabo procesos de transformación postcosecha en sus instalaciones contando con una capacidad de fermentación y secado de 12 ton/sem, realizando la planificación de la producción mediante previsión a partir de los registros

históricos de transformación postcosecha de los últimos 3 años. El abastecimiento y la producción en la cooperativa no se encuentra integradas, esto debido a que la cooperativa planea la producción o transformación postcosecha a partir de las materias primas adquiridas a los productores una vez ingresadas a la planta de transformación, puesto que, no dispone de mecanismos para determinar la cantidad de materia prima disponibles por los productores de cacao, llevando a cabo los procesos de transformación postcosecha a partir del cacao recolectado y transportado hacia las cooperativas, generando variaciones en el nivel de utilización de la capacidad operativa.

**Tabla 8**

*Resultados producción (tiempos, capacidad y costos)*

Descripción	Coomprocar	Coop cacao
Capacidad de fermentación y secado	12 ton/sem.	No realiza transformación postcosecha
Planificación de la producción (transformación postcosecha)	Mediante la previsión de los últimos 3 años.	No realiza transformación postcosecha
Integración de abastecimiento y producción	Baja Integración	No realiza transformación postcosecha
Costos de transformación	Mano de obra Materiales (sacos)	No realiza transformación postcosecha
Costo de producir un kg de producto	\$ 600	No realiza transformación postcosecha
Capacidad de almacenamiento de productos	35 ton	25 ton

*Nota.* Adaptado de información suministrada por las Cooperativas

Se relacionan como costos de transformación postcosecha en la organización la mano de obra y materiales necesarios para su procesamiento como costales. Asimismo, para Coomprocar el costo de transformar el cacao en la organización es de \$ 800 kg (ochocientos pesos por kilogramo).

La producción considerando tiempos, capacidad y costos en las cooperativas presenta oportunidades de mejora en la integración de las decisiones de abastecimiento junto con las decisiones de producción, buscando optimizar el flujo de materiales en la cadena de suministro para la transformación postcosecha del cacao en el departamento de Arauca y así aumentar la rentabilidad de la organización.

## 7 Resultados y Discusión

A continuación, se presenta un enfoque de optimización de la cadena de suministro postcosecha de cacao en el departamento de Arauca en un estudio de caso.

### 7.1 Condiciones de Suministro

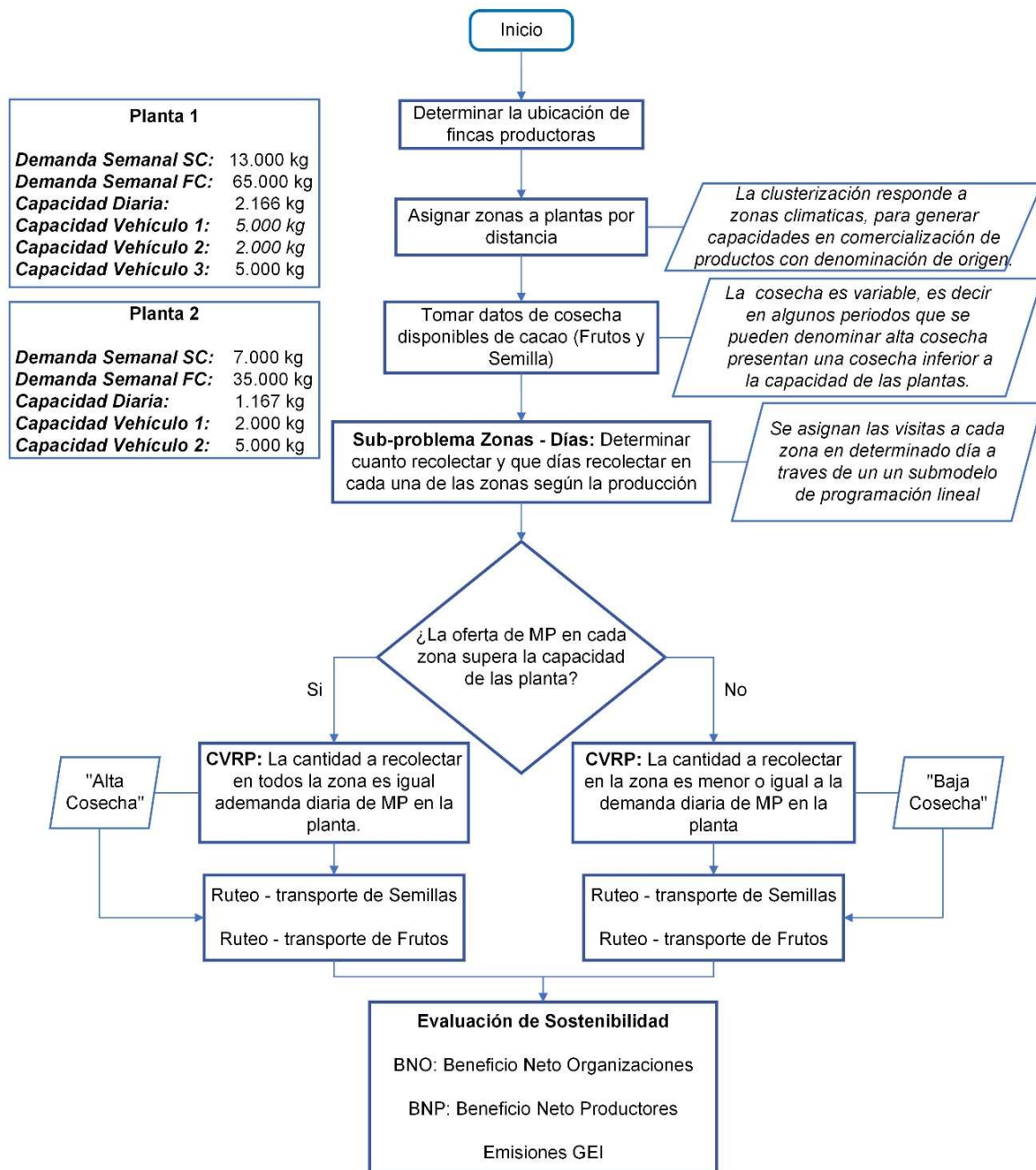
La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume los supuestos del modelo de optimización de la cadena de suministro de transformación postcosecha de cacao, entre los que se encuentran:

- Se cuenta con 2 plantas de transformación postcosecha de cacao y un total de 180 fincas productoras de cacao, siendo  $i$  los nodos pertenecientes a la red de suministro ( $i = \{i^P \cup i^f\}$ ); ( $i^P = 1, 2$ )  $\in$  plantas; ( $i^f = 1, 2, 3, \dots, F$ )  $\in$  fincas.
- El horizonte de planeación es de una semana (6 días laborales).
- Se abastecen las plantas a partir de materias primas que se encuentran dispuestas en zonas  $Z$  ( $z = 1, 2, 3, \dots, Z$ ) esto con el fin de adaptar y combinar las estrategias actuales de la organización de recolección de materias primas, con el aprovechamiento de zona climáticas que pueden aumentar el potencial de las organizaciones en el futuro próximo a través de la comercialización de cacao con denominación de origen.
- No es necesario visitar todas las fincas, ni recolectar la totalidad de materias primas ofertadas ( $O_i$ ) en las fincas, siempre que se satisface la demanda de materia prima de las plantas.

- Si la oferta total ( $OT_z$ ) de materia prima en las zonas es menor o igual a la demanda semanal de la planta, la cantidad de materia prima a recolectar ( $W_{zt}$ ) será igual a la oferta de materia prima en las fincas agrupadas en las zonas.

**Figura 16**

*Descripción modelo de optimización cadena de suministro*



*Nota.* Esta figura resume el método de aplicación del modelo de optimización para los escenarios de estudio del presente trabajo. Elaboración propia.

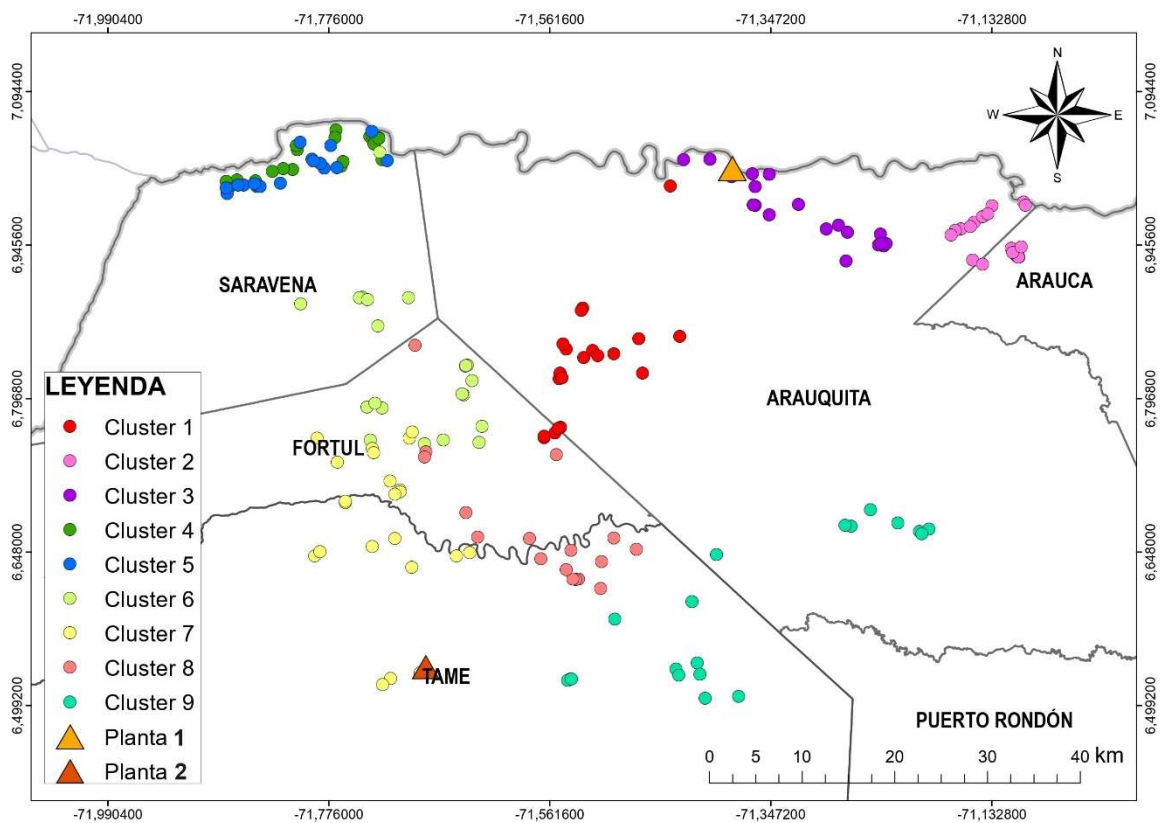
- Si la oferta total ( $OT_z$ ) de materia prima en las zonas es mayor a la demanda semanal de la planta, la cantidad de materia prima a recolectar ( $W_{zt}$ ) será igual a la demanda semanal de materia prima de las plantas.
- Si la oferta ( $O_z$ ) de materia prima en una zona es superior a la demanda diaria de la planta, la cantidad de materia prima a recolectar en cada día ( $W_{zt}$ ) será igual a la demanda diaria de materia prima de la planta.
- Si la oferta ( $O_z$ ) de materia prima en una zona es menor a la demanda diaria de la planta, la cantidad de materia prima a recolectar en cada día ( $W_{zt}$ ) será igual a la oferta de materia prima en la zona.
- La flota de vehículos es heterogénea  $v$  ( $v = 1, 2, \dots, V$ ) en diferentes unidades disponibles para cada planta, lo que indica distintas capacidades de transporte (Ver Figura 15).
- No se consideran los tiempos y fases de procesamiento de la transformación postcosecha de cacao.

## 7.2 Zonificación

Con el fin de mejorar la optimización de la cadena de suministro de transformación postcosecha de cacao se toma la zonificación climática de los cultivos de cacao del departamento de Arauca propuesta por González-Orozco et al. (2023<sup>a</sup>) con bases de datos disponibles en González-Orozco et al. (2023b), esta zonificación permite utilizar la heurística de clusterización conocida como agrupar primero y luego enrutar (Caro, 2017; Rocha-Medina et al., 2011), planeando el abastecimiento de materias primas desde 9 zonas climáticas que permiten obtener productos con denominación de origen (Ver Figura 17) que serán asignadas a cada una de las plantas en función de la distancia mínima.

**Figura 17**

*Mapeo de zonas climáticas en el departamento de Arauca*



*Nota.* Esta figura clasifica las fincas en 9 clústeres, en función de sus características climáticas. *Nota.* Adaptado de Gonzalez-Orozco et al. (2023<sup>a</sup>)

### 7.2.1 Asignación de Zonas a Plantas

A partir de la ubicación geográfica de cada finca perteneciente a las zonas climáticas se define un centroide aplicando las ecuaciones (1) y (2) tomando el promedio de las coordenadas de latitud y longitud, determinando un punto central (centroide) para cada una de las zonas, estableciendo este punto como referencia para los posteriores análisis y procesos de asignación de las fincas y zonas a plantas de transformación.

$$C_{lat} = \frac{\sum_i Latitud_i}{|i|} \quad \forall i^f \quad (1)$$

$$C_{long} = \frac{\sum_i Longitud_i}{|i|} \quad \forall i^f \quad (2)$$

Aplicando la ecuación (1) y (2) se obtuvieron los centroides de cada una de las zonas climáticas del departamento de Arauca, posteriormente se determinó la distancia entre cada uno de los centroides con las plantas de transformación determinando la distancia geodésica de los puntos. Se asigna cada zona agroclimática a una planta según la distancia más corta entre el centroide y la planta (Ver Tabla 9).

**Tabla 9**

*Mapeo de asignación de zonas a plantas*

Centroide	P1 (Coomprocar)	P2 (Coopcacao)
<b>Centroide Zona 1</b>	26.04152727(A)	37.13528762
<b>Centroide Zona 2</b>	29.14001836(A)	76.6577105
<b>Centroide Zona 3</b>	9.277088347(A)	63.7087786
<b>Centroide Zona 4</b>	44.26502989(A)	56.26001165
<b>Centroide Zona 5</b>	47.21438383(A)	61.07629401
<b>Centroide Zona 6</b>	40.29079362	32.67236431(A)
<b>Centroide Zona 7</b>	53.58020764	16.02395696(A)
<b>Centroide Zona 8</b>	43.84143438	19.3904354(A)
<b>Centroide Zona 9</b>	47.51702597	34.86609623(A)

*Nota.* Esta tabla determina las zonas asignadas a cada planta. *Abreviaciones.* A: Asignado.

De esta manera se establece que las zonas agroclimáticas 1, 2, 3, 4 y 5 se asignan a la planta 1, correspondiente a la cooperativa Coomprocar y las zonas agroclimáticas 6, 7, 8 y 9 se asignan a la planta 2 correspondientes a la cooperativa Coop cacao.

### **7.3 Propuesta Modelo de Optimización**

Para el presente modelo se toma como insumo la zonificación climática asignando cada zona a una de las plantas de transformación postcosecha, para establecer cronograma de ruteo semanal. Debido a los múltiples conjuntos, nodos, variables y restricciones a considerar, se utiliza una estrategia de descomposición en subproblemas con el fin de minimizar el tiempo de procesamiento y encontrar soluciones factibles en tiempos de cómputo racionales. El subproblema de asignación zona día determina la cantidad de materia prima a recolectar en cada zona y que día se lleva a cabo la recolección de materia prima disponible en dicha región. El subproblema de ruteo toma la información de cantidad de materia prima a recolectar en cada una de las zonas y determina las rutas, secuencia de la ruta, y los vehículos para recolectar dicha materia prima.

#### **7.3.1 Nomenclatura Modelo de Optimización**

Se establece la nomenclatura a utilizar para la formulación del modelo de optimización para la transformación postcosecha.

- **Conjuntos**

$i, j, a$  nodos pertenecientes a la red de suministro.

$I^P, j^P$  nodos que corresponden a las plantas de transformación.

$I^F, j^F$  nodos que corresponden a las fincas productoras de cacao.

$T$  días correspondientes al horizonte de planificación de una semana (6 días laborales).

$V$  conjunto de vehículos disponibles para el ruteo

$z$  zonas climáticas

- **Parámetros**

$b_i$  Cantidad de materia prima a recolectar en cada una de las fincas.

$C_i^{dc}$  Costo de desgrane de cacao en la finca  $i$ .

$C_i^{fc}$  Costo fijo de compra de materia prima en la planta  $i$ .

$C_i^{ft}$  Costo fijo de transformación en la planta  $i$ .

$C_i^{pf}$  Costo de producción fijo de cacao en la finca  $i$ .

$C_i^r$  Costo de ruteo en la planta  $i$ .

$C_i^{vc}$  Costo variable de compra de materia prima (precio de compra) en planta  $i$ .

$C_i^{vt}$  Costo variable de transformación en la planta  $i$ .

$d_{ij}$  Distancia entre el nodo  $i$  al nodo  $j$ .

$e_i$  Tiempo de carga de materia prima al vehículo (min/kg).

$k_v$  Capacidad de los vehículos.

$L$  Tiempo de carga de materia prima al vehículo (min/kg).

$O_i$  Oferta de materia prima en cada una de las fincas proveedoras.

$O_z$  Oferta de materia prima en cada zona climática.

$OT_i$  Oferta total de materia prima en las fincas agrupadas en una zona.

$OT_z$  Oferta total de materia prima en todas zonas climáticas.

$p_v$	Penalización de tiempo de viaje por el uso del vehículo $v$
$Pv_i^p$	Precio de venta de producto terminado en planta $i$ .
$P_i^{vc}$	Precio de venta del cacao (materia prima) en la finca $i$ .
$t_{ij}$	Tiempo de viaje desde el nodo $i$ hasta el nodo $j$ .
$T_{max}$	Tiempo máximo de viaje de la ruta.
$Tr_{ijv}$	Tiempo de ruteo penalizado por uso de vehículos con mayor capacidad.
$Vel$	Velocidad media de ruteo.
$Q_i^{cv}$	Cantidad de cacao vendido por la finca $i$ .
$Q_i^{mp}$	Cantidad de materia prima recolectada en la planta $i$ .
$Q_i^p$	Cantidad de producto fabricado en la planta $i$ .

- **Variables**

$H_{zt}$	1, si se visita la zona $z$ en el día $t$ ; 0, lo contrario.
$r_{iv}$	Variable que calcula el tiempo de ruteo en el vehículo $V$
$s_{iv}$	Variable que determina el tiempo de llegada al nodo $i$ en el vehículo $v$
Tiempo	Tiempo total de ruteo
$W_{zt}$	Cantidad de materia prima a recolectar en cada zona en el día $t$ (variable para el subproblema de asignación)
$X_{ijv}$	1, si se usa el arco que conecta el nodo $i$ al nodo $j$ con el vehículo $v$ ; 0, lo contrario.
$Y_{iv}$	1, si el nodo $i$ es abastecido por el vehículo $v$ ; 0, lo contrario

### 7.3.2 Subproblema de Asignación Zona – Día

Considerando que el horizonte de planificación es de una semana laboral (6 días laborales) y las zonas climáticas son cinco para la planta 1 y cuatro para la planta 2, se evidencia que estas no son equivalentes en número. Por consiguiente, se diseña un subproblema de asignación zona-día que permita indicar la cantidad de materia prima a recolectar por días en cada una de las zonas. El submodelo de asignación zona día determina la cantidad de materia prima a recolectar en cada día del horizonte de planeación, sin superar la capacidad diaria y semanal de las plantas de transformación, adaptable a las temporadas de baja y alta cosecha. En la temporada de baja cosecha entendida como el periodo de recolección semanal donde la oferta de materia prima de las fincas agrupadas en las zonas asignadas a la planta es igual o inferior a demanda semanal de materia prima requerida por la planta, bajo esta condición, la planta recolecta el total de materia prima ofertada por las fincas. En temporada de alta cosecha comprendida como el periodo de recolección semanal donde la oferta de materia prima de las fincas es superior a la demanda de materia prima semanal de la planta asignada, la cantidad de materia prima a recolectar por las plantas es igual a su demanda diaria y semanal.

$$\text{Min Distancia ZD} = \sum_{zt} W_{zt} * D_{zt} \quad (3)$$

$$\sum_t W_{zt} \leq O_z \quad \forall z, (OT_z > Ds) \quad (4)$$

$$\sum_z W_{zt} = Dd \quad \forall t, \quad (OT_z > Ds) \quad (5)$$

$$\sum_t W_{zt} \geq Dd \quad \forall z, \quad (O_z > Dd) \quad (6)$$

$$\sum_t u_{zt} \geq 1 \quad \forall z, \quad (O_z > Dd) \quad (7)$$

$$W_{zt} \leq Dd * H_{zt} \quad \forall z, t \quad (8)$$

$$\sum_t W_{zt} = O_z \quad \forall z, \quad (OT_z \leq Ds) \quad (9)$$

$$\sum_z W_{zt} \leq Dd \quad \forall t, \quad (OT_z \leq Ds) \quad (10)$$

$$\sum_t H_{zt} = 1 \quad \forall z, \quad (O_z \leq Dd) \quad (11)$$

$$W_{zt} \geq 0; H_{zt} = \{0,1\} \quad (12)$$

La ecuación 3 busca minimizar el costo de transporte de materia prima a la planta de transformación. La ecuación 4 diseñada para temporada de alta cosecha, establece que la cantidad de materia prima a recolectar en cada una de las zonas debe ser menor e igual a la oferta de materia prima de la zona. La ecuación 5 establece que, si la oferta total de las zonas es mayor a la demanda semanal de la planta, la cantidad a recolectar en cada día será igual a la demanda diaria de materia prima de la planta. La ecuación 6 establece que, si la oferta de materia prima en la zona es mayor a la demanda diaria de materia prima de la planta, la cantidad a recolectar en cada zona debe ser mayor o igual a la demanda diaria de materia de la planta. La ecuación 7 establece que, si la oferta en la zona es mayor a demanda diaria, cada zona puede ser visitada una o más veces. La ecuación 8 establece que la cantidad de materia prima a recolectar en cada combinación de zona (z) y día (t) debe ser menor o igual a la demanda diaria según sea el caso. La ecuación 9 indica que, si la oferta total de materia prima en todas las zonas es menor o igual a la demanda semanal, la cantidad de materia prima a recolectar es igual a la oferta de materia prima en cada zona. La ecuación 10 establece que, si oferta total en las zonas es menor o igual a la demanda semanal, la cantidad de materia prima a recolectar cada día (t) debe ser menor o igual a la demanda diaria de la planta de transformación. La ecuación 11 establece que,

si la oferta de materia en determinada zona es menor o igual a la demanda diaria, dicha zona se visita una vez. La ecuación 12 establece los valores que puede tomar  $W_{zt}$  y  $H_{zt}$ .

Como se puede observar en la Tabla 10 el subproblema de asignación de zona-día se basa en la matriz de distancia entre cada zona con la planta asignada para el transporte de materias primas. Este parámetro es fundamental para minimizar el tiempo de recolección de materia prima en cada una de las plantas y zonas.

**Tabla 10**

*Matriz de distancia zona a planta*

Zona	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Planta
Zona 1	26	26	26	26	26	26	
Zona 2	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	29.1	
Zona 3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	P1
Zona 4	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	44.3	
Zona 5	47.2	47.2	47.2	47.2	47.2	47.2	
Zona 6	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	32.7	
Zona 7	16	16	16	16	16	16	
Zona 8	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	P2
Zona 9	34.9	34.9	34.9	34.9	34.9	34.9	

*Nota.* Esta tabla relaciona la distancia entre cada zona y la planta asignada en un horizonte de planeación semanal. Elaboración propia.

### 7.3.3 Subproblema de Ruteo Vehicular.

Una vez se ha determinado la cantidad de materia prima a recolectar en cada día del horizonte de planeación en el subproblema de asignación zona – día ( $W_{zt}$ ), el subproblema de ruteo vehicular utiliza esta información para determinar las rutas de recolección de materia primas para cada una de las zonas y días asignados, este modelo se ajusta a la variabilidad de cosecha de materia prima en cada una de las fincas productoras a través del tiempo, incorporando restricciones que se ajustan a la baja y alta cosecha de las zonas climáticas.

El tiempo máximo de ruteo es de 7 horas, la capacidad de los vehículos asignados a cada una de las plantas se encuentra detallado en la Figura 15. El parámetro ( $P_v$ ) corresponde a una penalización por uso de un vehículo, siendo los vehículos con menor capacidad los de menor penalización. La oferta de materia prima en cada una de las fincas ( $O_i$ ) es un parámetro que se conoce semanalmente a través la encuesta de productividad aplicada a los productores de cacao. La velocidad media ( $Vel$ ) se establece en 40 km/h. La distancia entre los nodos ( $d_{ij}$ ) se establece como la recta geodésica entre las coordenadas de los nodos, calculada mediante la ecuación 10. El tiempo de viaje entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$  ( $t_{ij}$ ) se determina mediante el cociente de la distancia sobre la velocidad media ( $d_{ij} / Vel$ ). El tiempo de carga de la materia prima a los vehículos ( $L$ ) se determinó mediante estudios llevados a cabo por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). La oferta de materia prima en todos los nodos ( $OT_i$ ) que se encuentran agrupadas en una operación de recolección. La cantidad de materia prima a recolectar en cada zona para cada día ( $W_{zt}$ ) definido como un parámetro en este subproblema de ruteo, es determinado por el subproblema de asignación zona día, así, para cada combinación zona-día se debe efectuar una corrida del subproblema de ruteo.

La cantidad de materia prima a recolectar ( $B_i$ ) en cada finca se determina bajo la ecuación 11. Ponderando la cantidad de materia prima ofertada por cada finca en el horizonte de planeación por la cantidad de materia prima determinada en el submodelo de asignación zona día. De esta manera se visitan todas las fincas con oferta de materia prima y es representativa de la totalidad de la oferta en todas las fincas, siendo funcional para cacaos con denominación de origen.

$$D_{ij} = 2r * \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \frac{\Delta \phi}{2} + \cos \phi_1 * \cos \phi_2 * \sin^2 \frac{\Delta \lambda}{2}} \quad \forall (i, j) \quad (13)$$

$$B_i = \frac{O_i}{\sum_i O_i} * Wzt \quad \forall i^f \quad (14)$$

$$e_i = l * b_i \quad \forall (i^f) \quad (15)$$

$$Tv_{ijv} = t_{ij} * P_v \quad \forall (i, j, v) \quad (16)$$

El tiempo de carga de la materia prima a los vehículos de la ecuación 12 se obtiene a partir del producto del tiempo de servicio ( $L$ ) por la cantidad de materia prima a recolectar en el nodo  $i$  ( $B_i$ ), datos suministrados por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). El tiempo de ruteo con penalización de uso de vehículos ( $tr_{ijv}$ ), se obtiene a partir del producto entre tiempo de viaje desde el nodo  $i$  hasta el nodo  $j$  ( $t_{ij}$ ) por la penalización de costo por el uso de un vehículo  $v$  ( $P_v$ ).

Las variables de decisión detalladas buscan determinar: si se usa el arco que conecta el nodo  $i$  al nodo  $j$  con el vehículo  $v$  ( $x_{ijv}$ ), si el nodo  $i$  es abastecido por el vehículo  $v$  ( $y_{iv}$ ). Determinar el tiempo de llegada al nodo  $i$  en el vehículo  $v$  ( $s_{iv}$ ), y determinar el tiempo de ruteo en el vehículo  $v$  ( $r_{iv}$ ) sin superar el tiempo máximo de ruteo ( $T_{max}$ ).

**Formulación Subproblema de Ruteo.** A continuación, se presenta la formulación matemática del subproblema de ruteo bajo una formulación clásica de CVRP (Toth & Vigo,

2002) con restricciones que se adaptan a las características propias del caso de estudio. Este submodelo es alimentado por los resultados del submodelo de asignación zona – día, generando una corrida por cada asignación zona día ( $W_{zt}$ ).

$$\text{Min Tiempo} = \sum_{Ijv} Tr_{ijv} * X_{ijv} + 0.1 \sum_{ijv} r_{iv} \quad (17)$$

$$\sum_v u_{iv} = B_I \quad \forall i \quad (18)$$

$$u_{iv} = B_i * Y_{iv} \quad \forall [i^f, v, (B_i \leq M)] \quad (19)$$

$$\sum_I u_{iv} \leq K_v \quad \forall v \quad (20)$$

$$\sum_v Y_{iv} \leq |V| \quad \forall i^p \quad (21)$$

$$Y_{iv} \geq \frac{u_{iv}}{M} \quad \forall [i^f, (B_i > 0)] \quad (22)$$

$$\sum_i Y_{iv} = 0 \quad \forall [i^f, (B_i = 0)] \quad (23)$$

$$u_{iv} \leq M * Y_{iv} \quad \forall i^f \quad (24)$$

$$\sum_j X_{ijv} = Y_{iv} \quad \forall [I, v] \quad (25)$$

$$\sum_i X_{ijv} = Y_{jv} \quad \forall [j, v] \quad (26)$$

$$\sum_i X_{iav} = \sum_i X_{ajv} \quad \forall [a > 1, v, (i \neq a), (j \neq a)] \quad (27)$$

$$\sum_{v, j^f} X_{ijv} + X_{jiv} \leq 1 \quad \forall [i^f, j^f, v, (i \neq j)] \quad (28)$$

$$S_{iv} + t_{ij} * X_{tijv} \leq S_{jv} \quad \forall [i^p, j, v, (j \neq i)] \quad (29)$$

$$S_{iv} + t_{ij} * X_{tijv} + e_i * Y_{iv} - S_{jv} \leq T_{max} * (1 - X_{ijv}) \quad \forall [i, j^f, v, (j \neq i)] \quad (30)$$

$$S_{iv} + t_{ij} * X_{tijv} + e_i * Y_{iv} \leq r_{iv} \quad \forall [i^f, j, v, (j \neq i)] \quad (31)$$

$$r_{iv} \leq T_{max} * Y_{iv} \quad \forall [i, v] \quad (32)$$

$$Y_{iv}, X_{ijv}, = \{0,1\} \quad (33)$$

$$s_{iv}, r_{iv}, u_{iv} > 0 \quad (34)$$

$$\text{Tiempo} \geq 0 \quad (35)$$

Función objetivo (17) minimiza el tiempo total de ruteo considerando una penalización por utilizar vehículos con más alta capacidad. La restricción (18) permite que la cantidad de materia prima a recolectar en la finca i pueda ser transportada por más de un vehículo. La restricción (19) establece que, si en la finca i se debe recolectar materia prima y la cantidad de MP a recolectar es menor a la capacidad máxima de los vehículos (M = 5000) debe ser abastecida por un vehículo. La restricción (20) establece que la cantidad de materia prima recolectada por un vehículo no debe superar su capacidad. La restricción (21) establece que los vehículos que salen de la planta deben ser menor o igual al número de vehículos disponibles. La restricción (22) establece que, si se recolecta MP en la finca i por el vehículo v, este debe ser abastecido una vez. En contraposición, la restricción (23) y (24) establecen que, si la oferta de materia prima en la finca i es igual a cero, no se visita dicha finca, esta restricción permite disminuir el tiempo de procesamiento de cómputo por lo que es importante incorporarla. La restricción (25) establece que, para cada nodo correspondiente a una finca (i<sup>f</sup>) debe salir un vehículo. La restricción (26) establece que, para cada nodo correspondiente a una finca, debe existir un arco de salida. La restricción (27) y (28) son ecuaciones clásicas de eliminación de subtours. La restricción (29) determina el tiempo de viaje desde la planta hacia el primer nodo finca. Las

restricciones (30) y (31) determinan el tiempo de llegada al nodo ( $i^f$ ) considerando el tiempo de carga de materia prima al vehículo. La restricción (32) indica que las rutas no deben superar el tiempo máximo de ruteo ( $T_{max}$ ). Las restricciones (33), (34) y (35) establecen los valores que pueden tomar las variables de decisión.

#### 7.4 Evaluación Modelo de Optimización

Se efectuó la evaluación del modelo de optimización mediante un análisis de escenarios que establece los tiempos de ruteo y la distancia recorrida en cada uno. Se procede a evaluar la sostenibilidad determinando el BNC (Beneficio Neto en las Cooperativas), el BNF (Beneficio Neto en las Fincas) y las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) para cada uno de los escenarios estudiados.

#### 7.5 Indicadores de Sostenibilidad.

Se proponen indicadores de sostenibilidad para evaluar el modelo de optimización de la cadena de suministro de transformación postcosecha de cacao desde las perspectivas económicas, sociales y ambientales. Los costos asociados para la cuantificación de los indicadores fueron suministrados por las organizaciones mediante entrevista, construcción y presentación de informes de operación.

$$BNC = \sum_i Q_i^p * (P_{V_i^p} - C_i^{vp}) + \sum_i I_i^{pr} - \sum_i Q_i^{mp} * C_i^{vc} - \sum_i C_i^{fp} - \sum_i C_i^{fc} - \sum_i C_i^r - \sum_i C_i^{dc}; \quad \forall i^f \quad (36)$$

$$BNF = \sum_i Q_i^{cv} * (P_i^{vc} - C_i^{pf} - C_i^{dc}); \quad \forall [i^f] \quad (37)$$

La ecuación 36 cuantifica el beneficio neto de las cooperativas (BNC) mediante la diferencia entre los ingresos por venta del cacao transformado, obtenido a través del producto aritmético entre la cantidad de producto fabricado en la planta  $i$  ( $Q_i^p$ ) por el precio de venta del producto en la planta  $i$ , más un precio de venta de subproductos o residuos

generados en los escenarios de frutos de cacao, menos los costos de producción, compra y ruteo. La cantidad de producto fabricado en cada planta ( $Q_i^p$ ) se determina mediante el producto de la cantidad de materia prima recolectada en el horizonte de planeación ( $Q_i^{mp}$ ) por el rendimiento de producción; el precio de venta del producto ( $Pv_i^p$ ) se define según el precio nacional de referencia publicado por Agronet & MADR (2024) como su valor promedio en el año 2023 para el cacao con denominación corriente (SC-AC, SC-BC) y con 10 % de valoración adicional para cacao categorizado como de fino sabor y aroma (Abbott et al., 2019); los costos variables de transformación ( $C_i^{vt}$ ) se estimaron a partir de la información suministrada por las cooperativas; la cantidad de materia prima recolectada ( $Q_i^{mp}$ ) se obtuvo de los subproblemas de asignación y ruteo del modelo propuesto; ( $C_i^{vc}$ ) el costo variable de compra o precio de compra de cacao a los productores se determina mediante cálculos efectuados con las cooperativas, donde se descuentan los costos de recolección, distribución y la cuota de fomento regulada por la ley 67 de 1983 del congreso de Colombia (Fedecacao, 2024); el costo de desgrane de cacao ( $C_i^{dc}$ ) se estima a partir de los valores de mercado en el territorio; el costo fijo de transformación ( $C_i^{ft}$ ) se determina a partir de los activos y personal de las cooperativas; el costo fijo de compra ( $C_i^{fc}$ ) se determina mediante los costos de depreciación de vehículos y personal asignado a la compra de materias primas; el costo de ruteo se determina a través de los resultados del subproblema de ruteo considerando la distancia recorrida por cada vehículo, su tasa de consumo de combustible, cantidad de combustible a consumir de cada vehículo y precio de combustible. La tasa de consumo de combustible se obtuvo de la información brindada por las cooperativas y el precio de los combustibles se obtuvo de la Unidad de Planeación Minero Energética, (UPME, 2024) para la ciudad de Arauca.

La ecuación 37 cuantifica el beneficio neto de las fincas (BNF) mediante la diferencia entre los ingresos por venta del cacao cosechado en sus fincas, obtenido mediante la sumatoria del producto, cantidad de cacao vendido en todas las fincas ( $Q_i^{cv}$ ) obtenido como resultado de la aplicación del modelo de optimización por el precio de venta del cacao en todas las fincas ( $P_i^{vc}$ ) que es equivalente al precio de compra de cacao de las cooperativas. Los costos de producción en las fincas  $i$ , se obtienen mediante proyección de la información consignada por (Fedecacao, 2016) aplicando la inflación de cada año (Banco de la República, 2023) y los costos de desgrane de cacao ( $C_i^{dc}$ ) en las fincas es equivalente al costo de desgrane para las plantas.

Como indicador ambiental se propone la cuantificación de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el proceso de transporte de materias primas, a través de la metodología FECOC 2016 (UPME, 2024) que cuantifica las emisiones de GEI en función del tipo de combustible utilizado con un exceso de aire del 20 % para gasolina y diésel comercial. El contenido de humedad para cada tipo de combustible fue establecido según los valores máximos permitidos por la resolución 40103 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2024). La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume las características de cada uno de los vehículos codificados en el modelo de ruteo para las plantas de transformación, su modelo comercial, el tipo de combustible y la tasa de consumo de combustible en cada uno, información suministrada por las cooperativas del departamento de Arauca.

### **Tabla 11**

*Características de vehículos para ruteo*

Planta	Código Vehículo	Modelo	Tipo de Combustible	Tasa de consumo Combustible (km/gal)
P1	V1	Toyota Hilux 4*2 2003	Gasolina	37.85
	V2	Hino Dutro City 300	Diesel	24.22
	V3	Hino Dutro City 300	Diesel	24.22
P2	V4	Toyota Hilux 4*2 2003	Gasolina	37.85
	V5	Hino Dutro City 300	Diesel	24.22

*Nota.* Esta tabla relaciona las características de los vehículos disponibles para ruteo en cada una de las plantas de transformación. Elaboración propia.

### 7.5.1 Análisis de Escenarios

Se llevó a cabo el análisis de escenarios bajo las condiciones dispuestas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con el software de optimización GAMS.44.3 bajo licencia académica instalada en equipo de cómputo con procesador AMD Ryzen 5 5500U with Radeon Graphics 2.10 GHz, memoria RAM de 16.0 y sistema operativo de 64 bits, tomando como insumo los datos recopilados de 180 fincas productoras de cacao del departamento de Arauca aplicada desde el mes de mayo de 2022 hasta noviembre de 2022. Las condiciones de abastecimiento de cada una de las plantas se encuentran descritas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde la planta 1 y planta 2 de transformación cuentan con una demanda semanal de materia prima, para abastecimiento de semillas de 13000 kg y 7000 kg respectivamente; para condiciones de abastecimiento en frutos de cacao, la demanda semanal es de 65000 kg y 35000 kg respectivamente. La demanda diaria de cada una de las plantas en los

distintos escenarios de abastecimiento se obtiene mediante el cociente de la demanda semanal sobre los días del horizonte de planificación (6 días laborales).

**Tabla 12**

*Condiciones de abastecimiento de las plantas de transformación.*

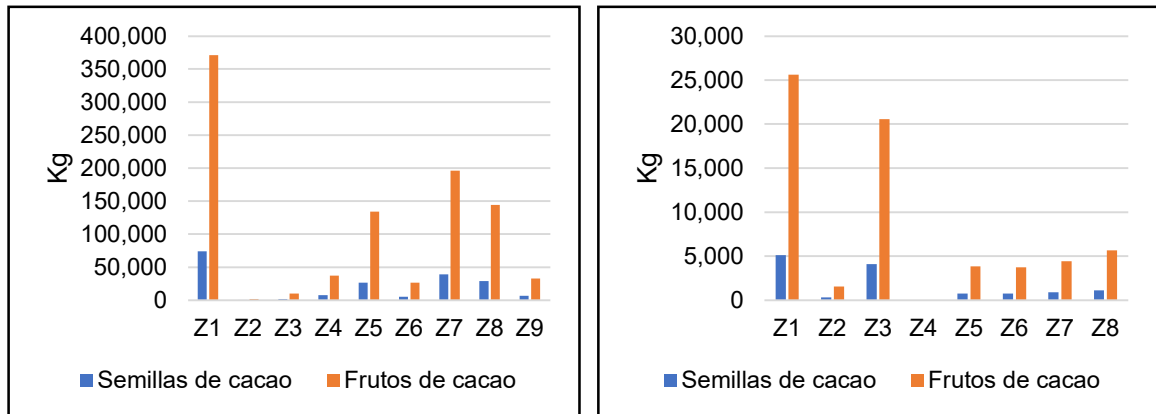
Descripción	Planta 1		Planta 2	
	Semillas de Cacao (kg)	Frutos de Cacao (kg)	Semillas de Cacao (kg)	Frutos de Cacao (kg)
Ds MP (kg)	13000	65000	7000	35000
Dd MP (kg)	2166.7	10833.3	1167.7	5833.3

*NOTA.* Esta tabla indica la capacidad máxima semanal y diaria de procesamiento de materia prima en cada planta según el tipo de materia prima a recolectar. *Abreviaciones:* Ds MP – Demanda Semanal de Materia Prima; Dd MP: Demanda Diaria de Materia Prima. Elaboración propia.

Posteriormente, se tomaron los datos de producción obtenidos en las fincas productoras de cacao siendo los datos de la semana 22, el periodo de alta cosecha con mayor pido de producción de cacao y la semana 31 el periodo con menor cosecha de cacao. Esta información sintetizada se encuentra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde se puede observar que el nivel de producción durante la temporada alta de cosecha de cacao es 14 veces mayor a la producción de cacao en las zonas durante la temporada de baja cosecha y algunas zonas presentan cero producciones en dichos periodos.

**Figura 18**

*Producción de cacao en las fincas productoras en las semanas seleccionadas.*



A). Semana 22 – Alta Cosecha

B). Semana 31 – Baja Cosecha

*Nota.* Esta figura presenta el comportamiento de la producción de cacao en las fincas productoras agrupadas en las zonas asignadas. Elaboración propia.

### 7.5.2 Resultado Subproblema de Asignación Zona-Día

Con la información suministrada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se determinan las zonas y días a visitar en el horizonte de planificación (6 días) para los cuatro escenarios de estudio, a través de la aplicación del subproblema de asignación zona-día. El resultado consolidado se puede visualizar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, con un total de 48 asignaciones, 13 para el escenario SC.AC, 11 para el escenario SC-BC, 13 para el escenario FC-AC, y 11 para el escenario FC-BC.

**Tabla 13**

*Consolidado de resultados de subproblema asignación zona-día*

Escenario	Planta	Corrida	Wzt (kg)	Código
SC-AC	P1	Wz1t1	175.7	SC-AC-P1-Wz1t1
		Wz1t4	2166.7	SC-AC-P1-Wz1t4
		Wz1t5	2166.7	SC-AC-P1-Wz1t5
		Wz1t6	2166.7	SC-AC-P1-Wz1t6

## En Las Cooperativas Coomprocar Y Coopcacao.

Escenario	Planta	Corrida	Wzt (kg)	Código	
SC-AC		Wz3t1	1991	SC-AC-P1-Wz3t1	
		Wz4t2	2166.7	SC-AC-P1-Wz4t2	
		Wz5t3	2166.7	SC-AC-P1-Wz5t3	
	P2	Wz6t1	1166.7	SC-AC-P2-Wz6t1	
		Wz7t2	1166.7	SC-AC-P2-Wz7t2	
		Wz7t5	1166.7	SC-AC-P2-Wz7t5	
		Wz7t6	1166.7	SC-AC-P2-Wz7t6	
		Wz8t4	1166.7	SC-AC-P2-Wz8t4	
		Wz9t3	1166.7	SC-AC-P2-Wz9t3	
	FC-AC	P1	Wz1t1	878.1	FC-AC-P1-Wz1t1
			Wz1t4	10833	FC-AC-P1-Wz1t4
			Wz1t5	10833	FC-AC-P1-Wz1t5
			Wz1t6	10833	FC-AC-P1-Wz1t6
			Wz3t1	9955.2	FC-AC-P1-Wz3t1
Wz4t2			10833	FC-AC-P1-Wz4t2	
P2		Wz5t3	10833	FC-AC-P1-Wz5t3	
		Wz6t1	5833.3	FC-AC-P2-Wz6t1	
		Wz7t2	5833.3	FC-AC-P2-Wz7t2	
		Wz7t5	5833.3	FC-AC-P2-Wz7t5	
		Wz7t6	5833.3	FC-AC-P2-Wz7t6	
		Wz8t4	5833.3	FC-AC-P2-Wz8t4	
		Wz9t3	5833.3	FC-AC-P2-Wz9t3	
		SC-BC	P1	Wz1t2	2166.7
Wz1t3	222.9			SC-BC-P1-Wz1t3	
Wz1t4	563.6			SC-BC-P1-Wz1t4	
Wz1t5	2166.7			SC-BC-P1-Wz1t5	
Wz2t1	315.2			SC-BC-P1-Wz2t1	

Escenario	Planta	Corrida	Wzt (kg)	Código	
FC-BC	P2	Wz3t3	1944.7	SC-BC-P1-Wz3t3	
		Wz3t6	2166.7	SC-BC-P1-Wz3t6	
		Wz5t1	769.6	SC-BC-P1-Wz5t1	
	P2	Wz6t2	748.5	SC-BC-P2-Wz6t2	
		Wz7t6	888.6	SC-BC-P2-Wz7t6	
		Wz8t3	1134.7	SC-BC-P2-Wz8t3	
	P1	P1	Wz1t2	10833	FC-BC-P1-Wz1t2
			Wz1t3	1114.7	FC-BC-P1-Wz1t3
			Wz1t4	2817.9	FC-BC-P1-Wz1t4
		P1	Wz1t5	10833	FC-BC-P1-Wz1t5
			Wz2t1	1576	FC-BC-P1-Wz2t1
			Wz3t3	9718.7	FC-BC-P1-Wz3t3
		P2	Wz3t6	10833	FC-BC-P1-Wz3t6
			Wz5t1	3848	FC-BC-P1-Wz5t1
			Wz6t2	3742.4	FC-BC-P2-Wz6t2
P2	Wz7t6	4443.2	FC-BC-P2-Wz7t6		
	Wz8t3	5673.6	FC-BC-P2-Wz8t3		

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de la aplicación del submodelo de asignación zona-día, la cantidad de materia prima a recolectar y la codificación respectiva.

*Ejemplo:* La codificación SC-AC-P1-Wz1t1, indica SC (semillas de cacao) - AC (Alta Cosecha) – P1 (Planta 1) – Wz1t1 (cantidad de materia prima a recolectar en la zona 1 en el día 1) que es correspondiente a 175.7 kilogramos.

**Escenario SC-AC.** Los resultados del escenario de operación SC-AC detallados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** indican que se debe visitar la zona 1 cuatro veces, donde el día uno recolecta 175.7 kg de cacao en semilla para completar la demanda diaria de la planta 1; la zona 3 una vez recolectando la totalidad de



*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de la aplicación del submodelo de asignación zona-día para el escenario SC-AC. Determinando la cantidad de materia prima a recolectar en cada combinación zona-día. Elaboración propia.

Este resultado se obtuvo en un tiempo de procesamiento total de 0.094 segundos. Se deben efectuar 7 visitas de recolección a las zonas asignadas a la planta 1 y 6 visitas a las zonas asignadas a la planta de transformación 2. En este escenario podemos encontrar que la cantidad de materia prima a recolectar en cada día (t) es igual a la demanda diaria de cada planta (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y la cantidad de materia prima recolectada en el horizonte de planificación es igual a la demanda semanal de materia prima de cada planta. Asimismo, se recolecta el total de materia prima ofertada en la zona 3, debido a la cercanía (9.3 km) con la planta de transformación y la materia prima restante se recolecta de la zona más cercana a la planta con materia prima disponible, en este caso la zona 1 con una distancia a la planta de 26 km (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

**Escenario FC-AC.** Para el escenario FC-AC (Frutos de Cacao – Alta Cosecha) los resultados detallados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentran resultados similares a los obtenidos en el escenario SC-AC recolectando la materia prima demanda en cada una de las plantas de manera diaria y semanal, en virtud de que la oferta de materia exceda la demanda diaria de materia prima de las plantas de transformación. La similitud en los resultados con el escenario SC-AC se debe a que en el presente escenario (FC-AC) donde se recolecta y transporta frutos de cacao, las variables y parámetros aumentan en la misma proporción respecto al escenario SC-AC.

### **Tabla 15**

*Determinación de materia prima a recolectar zona-día escenario FC-AC (kg)*

	Wzt	t1	t2	t3	t4	t5	t6	Total
P1	Z1	878.13	-	-	10833	10833	10833	33378
	Z2	-	-	-	-	-	-	0
	Z3	9955.2	-	-	-	-	-	9955.2
	Z4	-	10833	-	-	-	-	10833
	Z5	-	-	10833	-	-	-	10833
	Total	10833	10833	10833	10833	10833	10833	65000
	Wzt	t1	t2	t3	t4	t5	t6	Total
P2	Z6	5833.3	-	-	-	-	-	5833.3
	Z7	-	5833.3	-	-	5833.3	5833.3	17500
	Z8	-	-	-	5833.3	-	-	5833.3
	Z9	-	-	5833.3	-	-	-	5833.3
	Total	5833.3	5833.3	5833.3	5833.3	5833.3	5833.3	35000

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de la aplicación del submodelo de asignación zona-día para el escenario FC-AC. Determinando la cantidad de materia prima a recolectar en cada combinación zona-día. Elaboración propia.

El tiempo de procesamiento para obtener la solución correspondió a 0.548 segundos, estableciendo las siete visitas a las zonas asignadas a la planta 1 y seis zonas asignadas a la planta 2 bajo las mismas condiciones descritas en el escenario SC-AC (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Asimismo, se cumplen la restricción que indica que para los casos donde la oferta de materia prima sea superior a la demanda diaria de la planta, la cantidad de cacao a recolectar será igual a la demanda diaria de cada planta correspondiente a 10833.3 y 5833.3 para las plantas 1 y 2 respectivamente.

**Escenario SC-BC.** El escenario SC-BC (Semillas de Cacao – Baja Cosecha) descrito y detallado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** busca representar los periodos de tiempo donde la oferta de materia prima en las fincas productoras de cacao agrupadas en las zonas climáticas es menor que la capacidad semanal de las plantas de transformación. Por ello, se puede observar que bajo este escenario se recolecta la materia prima demandada diariamente por la planta 1 en los días 2, 3, 5, 6; en los días restantes no se puede abastecer la planta en su demanda diaria, igual que la planta 2 y todas sus zonas debido a la baja oferta de materia prima en las zonas asignadas a las plantas.

**Tabla 16**

*Determinación de materia prima a recolectar zona-día escenario SC-BC (kg)*

	Wzt	t1	t2	t3	t4	t5	t6	Total
P1	Z1	-	2166.7	222.9	563.6	2166.7		5119.9
	Z2	315.2	-	-	-	-	-	315.2
	Z3	-	-	1943.7	-	-	2166.7	4110.4
	Z4	-	-	-	-	-	-	0
	Z5	769.6	-	-	-	-	-	769.6
	Total	1084.8	2166.7	2166.6	563.6	2166.7	2166.7	10315
P2	Z6	-	748.48	-	-	-	-	748.48
	Z7	-	-	-	-	-	888.6	888.6
	Z8	-	-	1134.7	-	-	-	1134.7
	Z9	-	-	-	-	-	-	0
	Total	0	748.48	1134.7	0	0	888.6	2771.8

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de la aplicación del submodelo de asignación zona-día para el escenario SC-BC. Determinando la cantidad de materia prima a recolectar en cada combinación zona-día. Elaboración propia.

El tiempo de procesamiento para encontrar la solución al problema fue de 0.125 segundos, determinando que: se deben hacer cuatro visitas a la zona 1; una visita a la zona 2, 6, 7 y 8; dos visitas a la zona 3, y la zona 9 no se visita porque no cuenta con oferta.

**Escenario FC-BC.** Los resultados obtenidos para la recolección de frutos de cacao en baja cosecha (FC-BC) sintetizados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** son similares al escenario de SC-BC debido a que se cuenta con la misma disponibilidad de materia prima para ser procesada, pero al momento de transportar frutos de cacao la masa aumenta proporcionalmente. En ese sentido, se deben realizar cuatro visitas a la zona 1; una visita a la zona 2, 6, 7 y 8; dos visitas a la zona 3, y la zona 9 no se visita porque no cuenta con oferta de cacao, en todas las zonas se recolecta la totalidad de la oferta de materia prima en las zonas y se cumple la restricción de recolección máxima por día correspondiente a 10833.3 para la planta 1 y 5833.3 para la planta 2. El tiempo de procesamiento para obtener esta solución fue de 0.109 segundos.

**Tabla 17**

*Determinación de materia prima a recolectar zona-día escenario SC-BC (kg)*

	Wzt	t1	t2	t3	t4	t5	t6	Total
	Z1	-	10833	1114.7	2817.9	10833	-	25599
	Z2	1576	-	-	-	-	-	1576
P1	Z3	-	-	9718.7	-	-	10833	20552
	Z4	-	-	-	-	-	-	-
	Z5	3848	-	-	-	-	-	3848
	Total	5424	10833	10833	2817.9	10833	10833	51575

	Wzt	t1	t2	t3	t4	t5	t6	Total
P2	Z6	-	3742.4	-	-	-	-	3742.4
	Z7	-	-	-	-	-	4443.2	4443.2
	Z8	-	-	5673.6	-	-	-	5673.6
	Z9	-	-	-	-	-	-	-
	Total	0	3742.4	5673.6	0	0	4443.2	13859

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de la aplicación del submodelo de asignación zona-día para el escenario FC-BC. Determinando la cantidad de materia prima a recolectar en cada combinación zona-día. Elaboración propia.

### 7.5.3 Resultados Subproblema de Ruteo

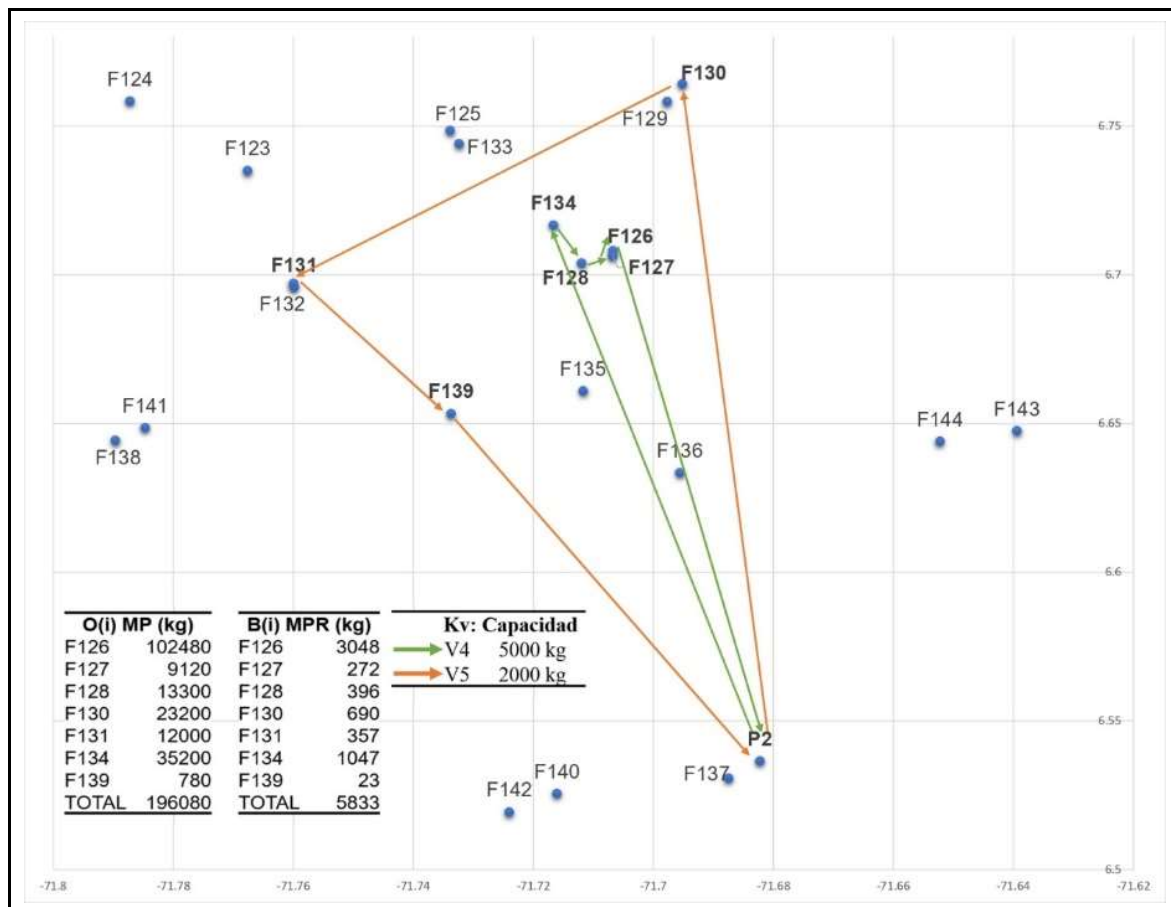
El subproblema de ruteo establece las rutas semanales para cada una de las plantas de transformación de cacao dispuestas en los municipios de Arauquita y Tame abastecidas por 180 fincas productoras de cacao. Se utilizó el modelo matemático MILP (Programación Lineal Entera Mixta) descrito en el Subproblema de Ruteo Vehicular. En términos de ejecución y calidad de la solución del SRV para las 48 corridas se obtuvo una brecha de optimalidad del 0 % en tiempos inferiores a los 10 segundos. Asimismo, el tiempo total de cómputo para lograr los resultados de los cuatro escenarios de estudio se obtuvo en 20.985 segundos.

Se presentan como ejemplo de las rutas de recolección de materias primas obtenidas en los distintos escenarios de estudio en la El escenario SC-BC, imagen B utiliza solamente el V5 con una capacidad de 2000 kg, debido a la baja oferta de semillas de cacao disponibles en las fincas agrupadas en la zona 7 y siendo inferior a la capacidad máxima de procesamiento de la planta 2, generando una sola ruta de visitas para recolectar la cantidad de materia prima ofertada en las fincas.

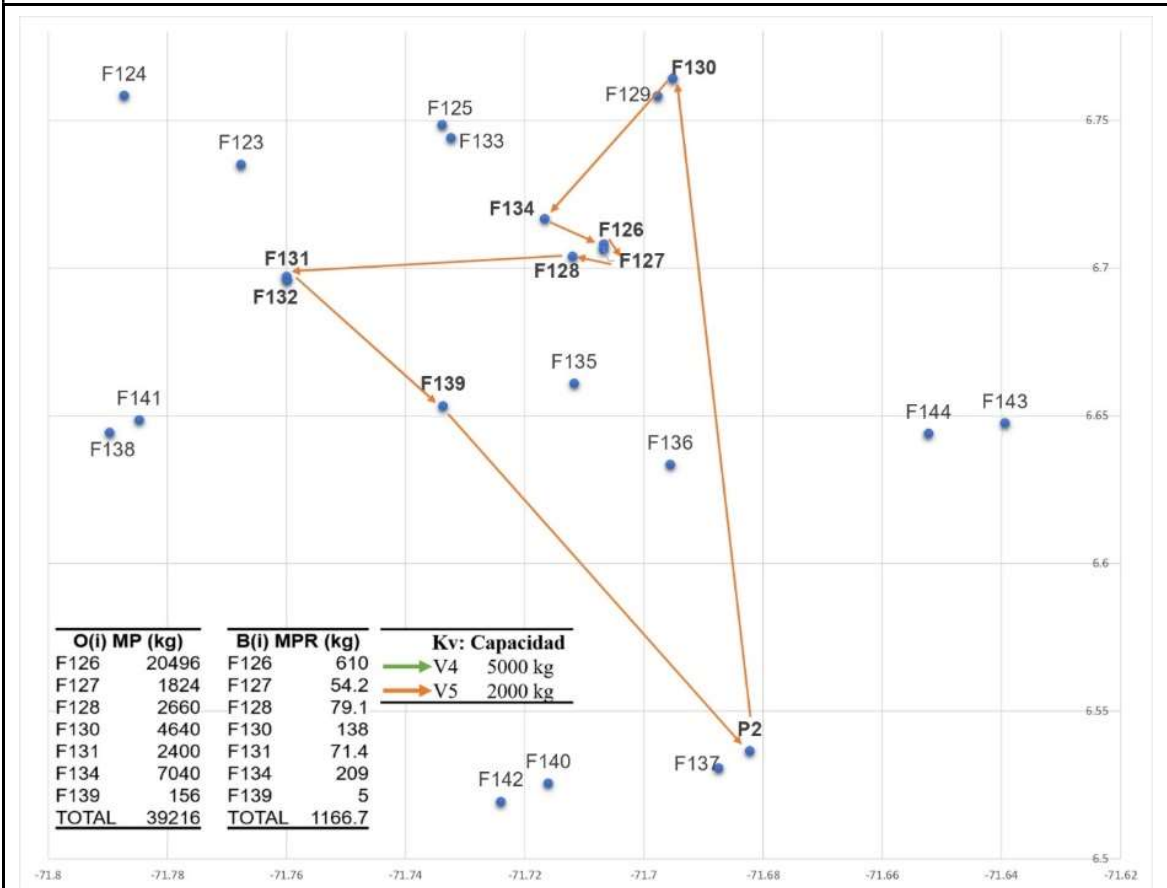
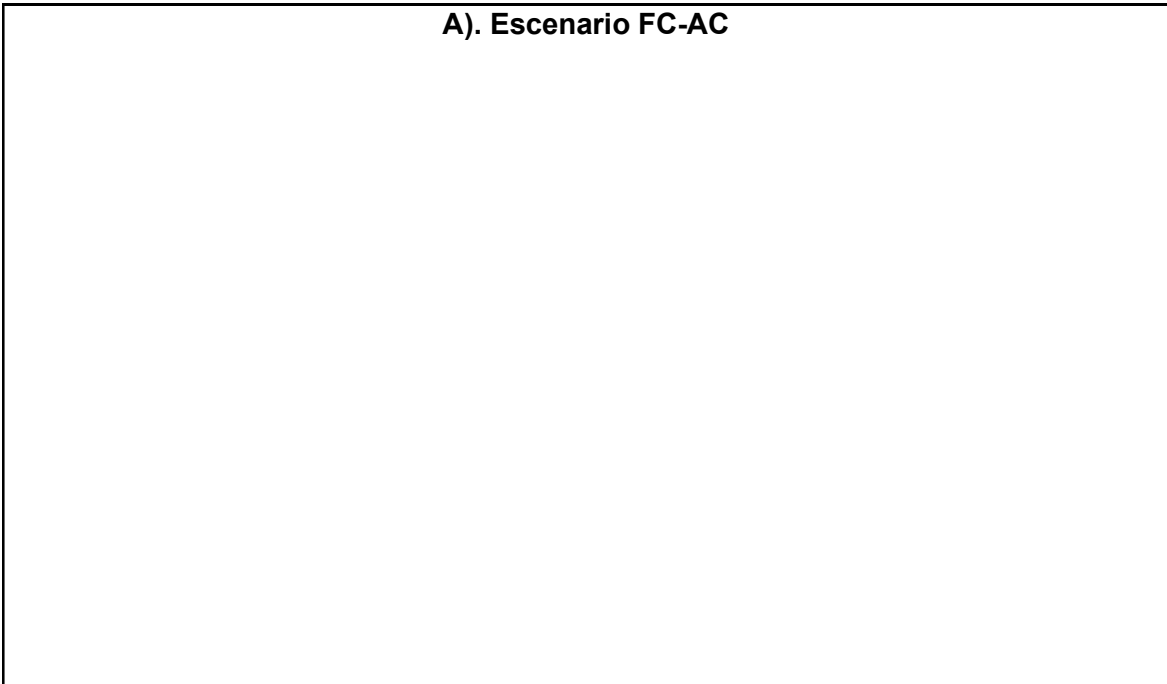
y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.. La ruta de recolección en el escenario FC-AC corrida Wz7t2-Wz7t5-Wz7t6 aplicada para la zona 7 asignada a la planta 2 para los días 2, 5 y 6 recolectando 4763 kg en V4 (Vehículo 4) y 1070 kg en V5 (Vehículo 5), para un total 5833 kg de frutos de cacao transportados a la planta de transformación 2 y equivalentes a su demanda diaria de frutos de cacao, como se puede observar en la Figura 19, imagen A. Para el escenario SC-AC de la corrida Wz7t2-Wz7t5-Wz7t6 se recolectan 1166.7 kg de semillas de cacao en V5 equivalentes a la capacidad máxima recepción de semillas de cacao de la planta 2, se utiliza V5 al recolectar una cantidad de semillas inferior a la capacidad del vehículo.

**Figura 19**

*Ejemplo de ruteo vehicular AC-Wz7t2- Wz7t5- Wz7t6*



**A). Escenario FC-AC**



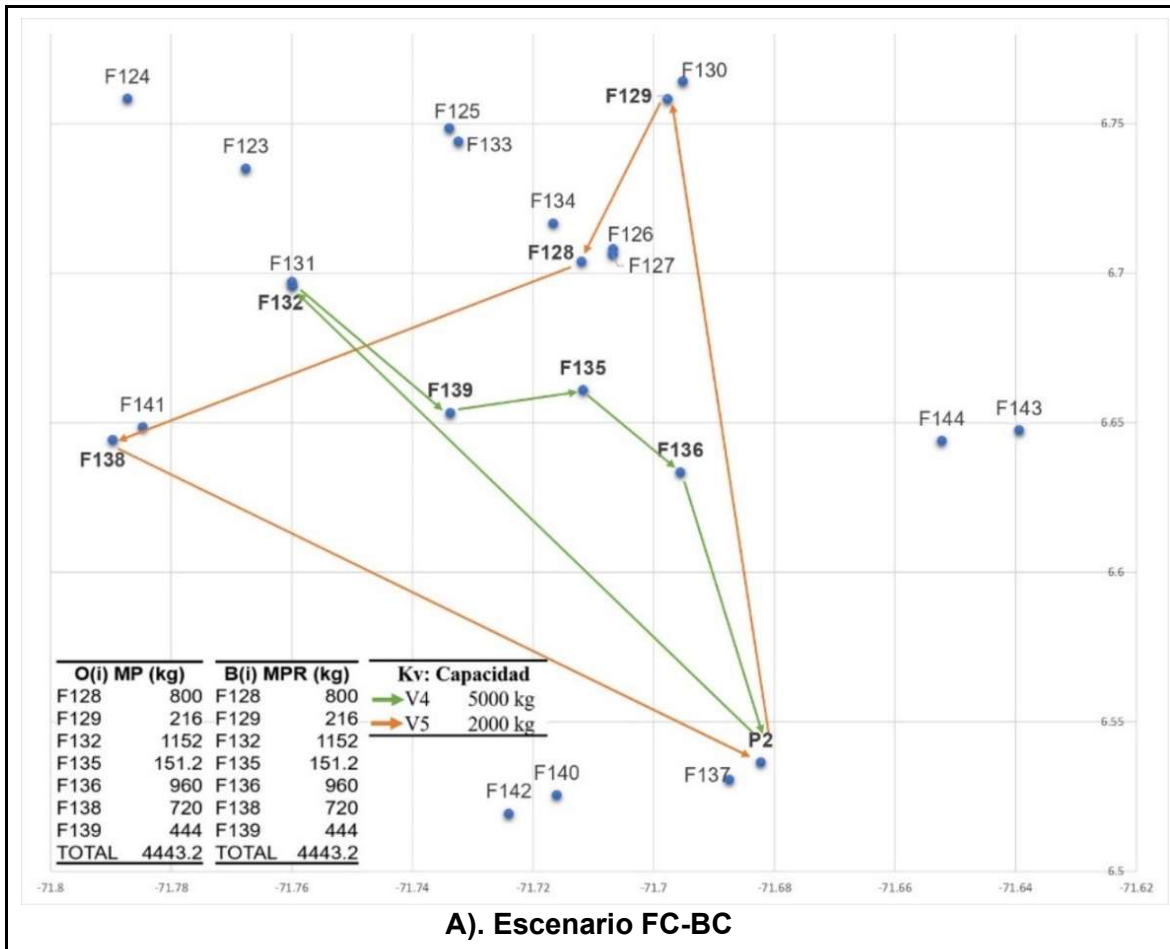
**B). Escenario SC-AC**

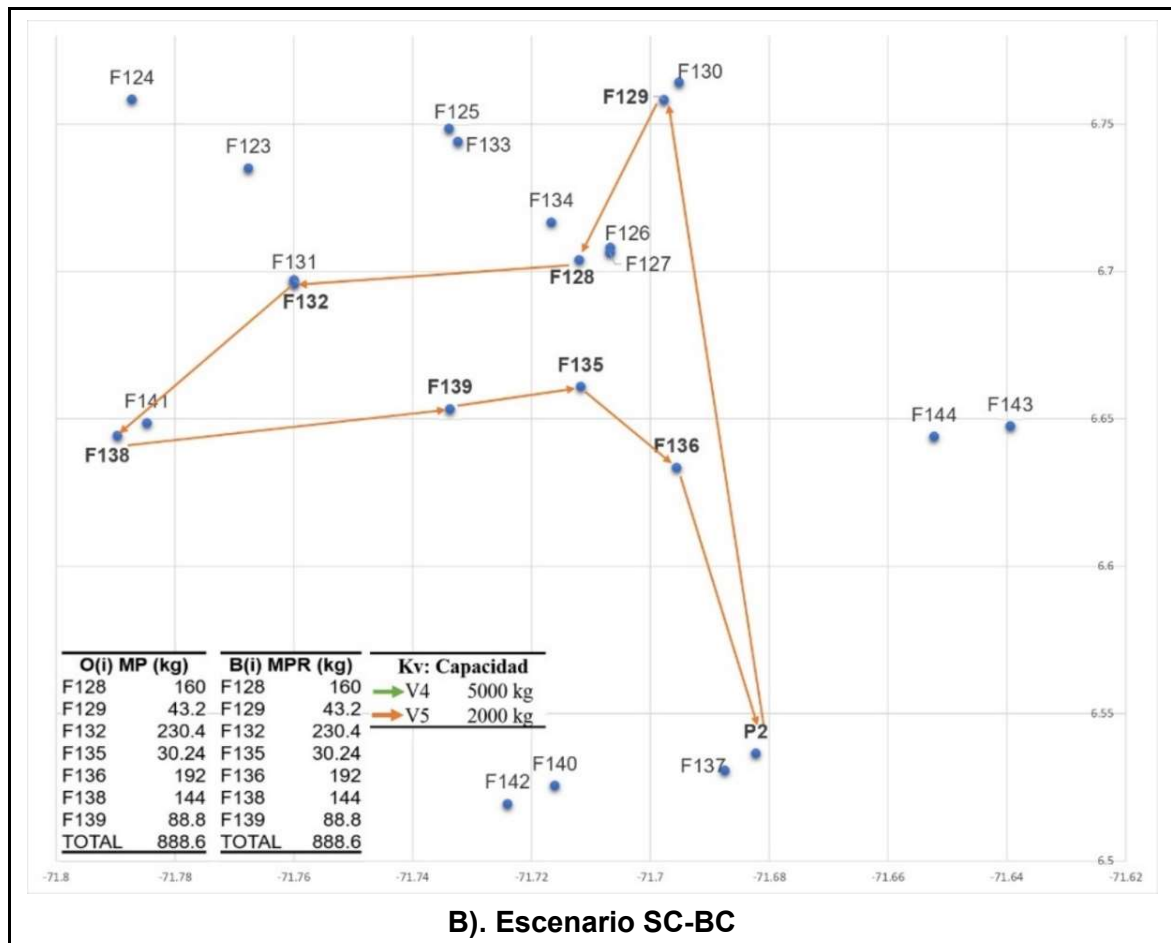
*NOTA.* Esta tabla presenta la ruta de recolección de materia prima obtenida por el submodelo de ruteo para los escenarios de alta cosecha. *Abreviaciones.* O(i): Oferta de materia prima en la finca i; MPR: Materia prima recolectada; Kv: Capacidad de vehículo V; V4: Vehículo 4; V5: Vehículo 5. Elaboración propia.

Para la combinación de escenarios de baja cosecha (BC) se toma la corrida BC-Wz7t6, encontrando la ruta óptima al transporte de semillas de cacao, el resultado de la ruta se sintetiza en la Figura 20. Para el escenario FC-BC, imagen A, la oferta de materia prima en la zona 7 es inferior a la demanda de la planta, por lo que el subproblema de ruteo recolecta y transporta la totalidad de la materia prima disponible en las fincas, mediante el uso de los vehículos V4 y V5 entregando a la planta de transformación 2707.2 y 1736 kg de frutos de cacao respectivamente. El escenario SC-BC, imagen B utiliza solamente el V5 con una capacidad de 2000 kg, debido a la baja oferta de semillas de cacao disponibles en las fincas agrupadas en la zona 7 y siendo inferior a la capacidad máxima de procesamiento de la planta 2, generando una sola ruta de visitas para recolectar la cantidad de materia prima ofertada en las fincas.

### **Figura 20**

*Ejemplo de ruteo vehicular BC-Wz7t6*





*NOTA.* Esta tabla presenta la ruta de recolección de materia prima obtenida por el submodelo de ruteo para los escenarios de alta cosecha. *Abreviaciones.* O(i): Oferta de materia prima en la finca i; MPR: Materia prima recolectada; Kv: Capacidad de vehículo V; V4: Vehículo 4; V5: Vehículo 5. Elaboración propia.

En las cuatro rutas de ejemplo correspondientes a los cuatro escenarios de estudio se visitan todas las fincas con oferta de materia prima, estas fincas se encuentran resaltadas con negrita en la Figura 19 y Figura 20, recolectando parte de la oferta de materia prima en las fincas para los escenarios de alta cosecha de manera proporcional y recolectando la totalidad de la materia prima en los escenarios de baja cosecha, esto permite indicar que subproblema de ruteo se adapta a los periodos de alta y baja cosecha,

así como el tipo de materia prima a transportar, variando las rutas en función de los factores antes descritos y la capacidad de los vehículos.

#### 7.5.4 Resultados Consolidados de Escenarios

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta los resultados consolidados para cada uno de los escenarios en el horizonte de planificación de una semana (6 días laborales). El tiempo total de ruteo (TTR) es superior en los escenarios donde se recolecta y transportan frutos de cacao (FC-AC, FC-BC) a los escenarios que transportan semillas de cacao (SC-AC, SC-BC), esto se debe a que los frutos de cacao presentan mayor masa y, por lo tanto, su recolección toma más tiempo. En los escenarios de alta cosecha (FC-AC, SC-AC) el tiempo total de ruteo es superior a los escenarios de baja cosecha a excepción del escenario SC-AC para la planta 1 (P1), esto se puede presentar debido a que las fincas con materia prima disponible para la planta 1 en el escenario SC-AC presentan agrupamiento más homogéneo.

**Tabla 18**

*Resultados consolidados subproblema de ruteo*

Escenarios	Planta	TTR (horas)	DTR (km)	DRV (km)			MPR (kg)
				V1	V2	V3	
FC-AC	P1	30.8	1239.63	470.31	418.54	350.8	65000
	P2	14.9	599.48	273.83	325.65	0	35000
SC-AC	P1	12.5	503.11	85.5	417.61	0	13000
	P2	8.9	358.57	0	358.57	0	7000
FC-BC	P1	28.5	775.24	231.49	354.39	189.4	51575

Escenarios	Planta	TTR (horas)	DTR (km)	DRV (km)			MPR (kg)
				V1	V2	V3	
	P2	7.9	239.57	168.71	70.86	0	13859
	P1	13.7	494.52	269.15	225.37	0	10315
SC-BC	P2	5.1	189.79	0	189.79	0	2772

*Nota.* Esta tabla presenta los resultados consolidados de operación en el horizonte de planeación de una semana según la distancia y tiempo de tuteo general y de cada vehículo. *Abreviaciones.* DVR: Distancia Recorrida por el Vehículo v; TTR: Tiempo Total de Ruteo; DTR: Distancia Total Recorrida; MPR: Materia Prima Recolectada; FC - AC: Frutos de Cacao-Alta Cosecha; SC-AC: Semillas de Cacao - Alta Cosecha; FC-BC: Frutos de Cacao - Baja Cosecha; SC-BC: Semilla de Cacao – Baja Cosecha.

La distancia total de ruteo (DTR) es superior en alta cosecha (FC-AC, SC-AC) a los escenarios de baja cosecha (FC-BC, SC-BC). Esto se debe a la política de recolección de materias primas con denominación de origen definida para este ruteo aplicada bajo el subproblema de asignación zona-día y la ecuación 11 del subproblema de ruteo. Esta política de recolección origina que, cuando la oferta de materia prima en las zonas es superior a la demanda semanal de las plantas, la cantidad máxima de materia prima a recolectar sea igual a la demanda de las plantas y se deba recolectar parte de la materia prima ofertada por cada una de las fincas de manera proporcional hasta cumplir con la demanda, asegurando que la materia prima recolectada por las plantas sea representativa a la zona climática. En consecuencia, el aumento tanto en la oferta de materia prima como en el número de fincas que la ofrecen da como resultado un incremento en la distancia que los vehículos deben recorrer durante la temporada de alta cosecha. Por otra parte, la

distancia total de ruteo (DTR) cuando se transportan frutos de cacao (FC-AC, FC-BC), es superior al transporte de semillas de cacao (SC-AC, SC-BC) debido a que se requiere un mayor número de vehículos.

### **7.5.5 Evaluación de Sostenibilidad**

Con los resultados obtenidos de los subproblemas de asignación y ruteo se determinan los indicadores de sostenibilidad BNC (Ecuación 36), BNF (Ecuación 37) y las emisiones de GEI mediante la metodología Fecoc 16 (Unidad de Planeación Minero Energética, 2024) generadas en el transporte de materias primas en cada uno de los escenarios de estudio.

**Costos de Ruteo.** Los costos del ruteo se encuentran resumidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para cada una de las plantas en cada uno de los escenarios. El costo de ruteo aumenta en función de la cantidad de materia prima a recolectar, por ello los escenarios FC-AC y FC-BC son más costosos a sus contrapartes SC-AC y SC-BC. Para los escenarios de alta cosecha FC-AC y SC-AC se evidencia un mayor costo de ruteo en la mayoría de sus contrapartes FC-BC y SC-BC a excepción de del escenario SC-BC para la planta 1 con su contraparte SC-AC planta 1, esto se puede al igual que para el DTR debido a que las fincas con oferta de materia prima para la planta 1 en el escenario SC-AC presentan agrupamiento más homogéneo que indica menor recorrido de los vehículos.

Los resultados de ruteo dispuestos en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** alimentan los indicadores de sostenibilidad. En la determinación del beneficio neto de las cooperativas (BNC), este costo se agrega costos de operación y se restan a los ingresos por venta. Para la cuantificación de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) se toma en cada uno de los escenarios la distancia recorrida por cada

uno de los vehículos, tipo y cantidad de combustible utilizado para la recolección y transporte de cacao.

**Tabla 19**

*Resultados costo de ruteo*

Escenario	Planta	Consumo de combustible			Cantidad gasolina (gal)	Cantidad Diesel (gal)	Costo de Ruteo (\$ COP)
		V1	V2	V3			
FC-AC	P1	12.4	17.3	14.5	12.4	31.8	\$ 492,963
	P2	11.3	8.6	0.0	8.6	11.3	\$ 241,778
SC-AC	P1	2.3	17.2	0.0	2.3	17.2	\$ 196,441
	P2	0.0	9.5	0.0	9.5	0.0	\$ 150,258
FC-BC	P1	6.1	14.6	7.8	6.1	22.5	\$ 306,132
	P2	7.0	1.9	0.0	1.9	7.0	\$ 94,580
SC-BC	P1	7.1	9.3	0.0	7.1	9.3	\$ 199,464
	P2	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	\$ 79,531

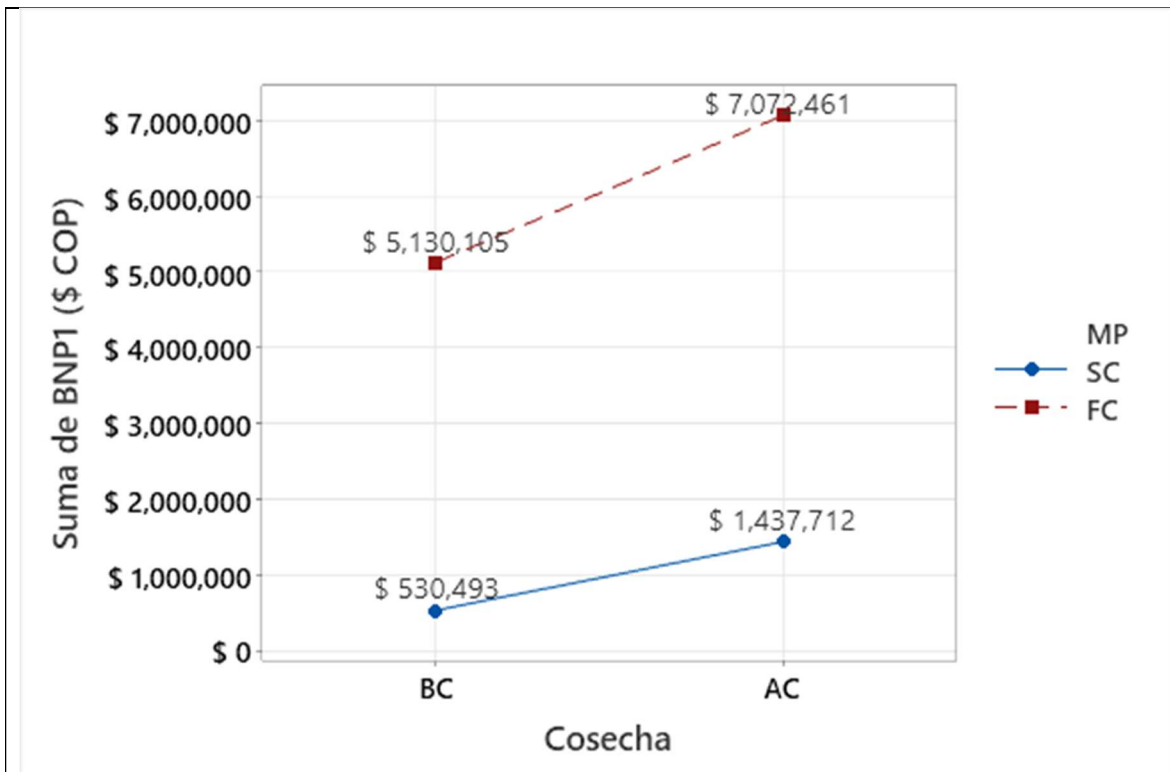
*Nota.* Esta tabla presenta los resultados de consumo de combustible y costo de ruteo para cada escenario de operación. *Abreviaciones.* V1: Vehículo 1; V2: Vehículo 2; V3: Vehículo 3; FC - AC: Frutos de Cacao-Alta Cosecha; SC-AC: Semillas de Cacao - Alta Cosecha; FC-BC: Frutos de Cacao - Baja Cosecha; SC-BC: Semilla de Cacao – Baja Cosecha. Elaboración propia.

**Resultados Beneficio Neto de las Cooperativas.** Se determina el beneficio neto de la cooperativa buscando establecer los escenarios que brindan mayor rentabilidad,

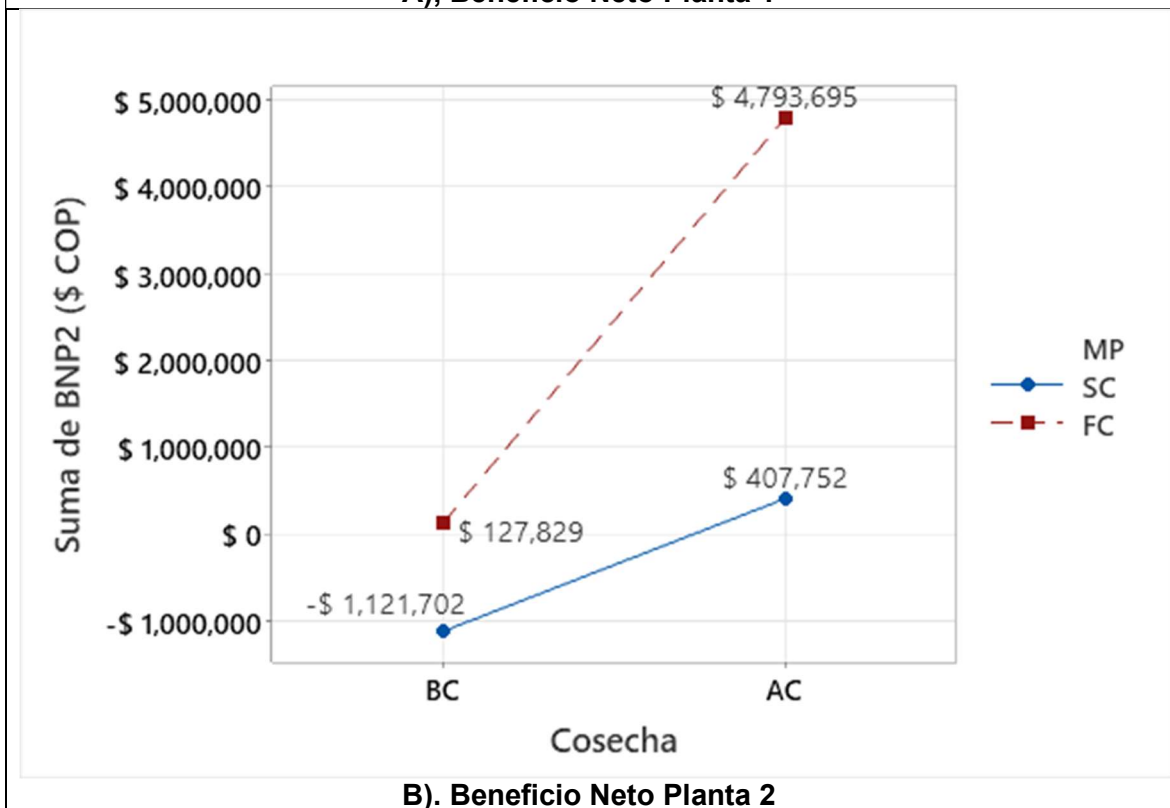
resultados que se pueden observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Para la planta 1 (ver imagen A), el beneficio neto es positivo en todos los escenarios, siendo mayor para los escenarios donde se recolectan frutos de cacao y presentando mayor beneficio para el escenario FC-AC, debido a que se presenta mayor oferta de materia prima que finalmente se transforma en mayor producto terminado y mayores ingresos para la cooperativa. En la planta 2 el beneficio neto es positivo en los escenarios de alta cosecha FC-AC, FC-BC y SC-AC, con beneficio económico más alto en el escenario FC-AC. El beneficio neto de la planta 2 resulta negativo en el escenario SC-BC. Esta situación se debe a la escasa disponibilidad de materia prima en las fincas que impide la producción de productos adicionales y al bajo precio del cacao de referencia nacional, resultando en déficit para la cooperativa.

### **Figura 21**

*Beneficio neto de las cooperativas de transformación postcosecha*



A), Beneficio Neto Planta 1



B). Beneficio Neto Planta 2

*Nota.* Esta figura presenta los resultados a la aplicación del indicador de beneficio neto (en pesos colombianos) de las plantas en los distintos escenarios de operación. *Abreviaciones.* P1: Planta 1; P2: Planta 2; SC: Semilla de cacao; FC: Frutos de Cacao; BC: Baja Cosecha; AC: Alta Cosecha. Elaboración propia.

**Punto de Equilibrio.** Al encontrar beneficios negativos se realizó análisis de punto de equilibrio para cada una de las plantas de transformación con el fin de determinar el nivel de ingresos para cubrir todos los costos totales. Los resultados dispuestos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** indican que los valores mínimos de producto a fabricar, la misma medida, considerando que el cacao recolectado en fruto o semilla es la materia prima exclusiva para obtener granos de cacao secos y dispuestos para procesos de transformación industriales, se determina la cantidad mínima de materia prima a recolectar para no generar pérdidas para las cooperativas en cada uno de los escenarios estudiados.

Para el escenario de procesamiento de fruto de cacao la cantidad requerida para igualar los costos totales con los ingresos es de 1682 y 1200 kg de cacao seco vendido para las plantas 1 y 2 respectivamente, en consecuencia, la cantidad mínima de materia prima a recolectar en el horizonte de planeación para no generar pérdidas para las cooperativas es de 22425 y 16001 kg de frutos de cacao. Para los escenarios de transporte y procesamiento de semillas de cacao liderados por las cooperativas, se necesita producir y comercializar 3055 y 2072 kg de cacao seco, por tanto, se requiere recolectar 8148 y 5526 kg de semillas de cacao para no generar pérdidas en las plantas de transformación 1 y 2.

## **Tabla 20**

*Punto de equilibrio según escenario de materia prima*

Escenario	Planta	Cacao en grano seco a obtener (kg)	Materia prima a adquirir (kg)
FC	P1	1682	22425
	P2	1200	16001
SC	P1	3055	8148
	P2	2072	5526

*Nota.* Esta tabla presenta la cantidad de producto a elaborar y la materia prima demandada para alcanzar el punto de equilibrio en cada una de las plantas. *Abreviaciones.* P1: Planta 1; P2: Planta 2 FC: Frutos de Cacao; SC: Semillas de Cacao. Elaboración propia.

La transformación postcosecha de cacao en los escenarios de recolección y procesamiento de frutos de cacao con denominación de origen genera mayores beneficios para la organización tanto en baja cosecha como de alta cosecha (FC-AC y FC-BC) en comparación a los escenarios de adquisición de semillas de cacao. Esto se da gracias a que las cooperativas controlan la mayor parte de los procesos de transformación, facilitando la estandarización de los mismos, asegurando la conservación y exaltación del potencial de calidad desde los procesos de pre-acondicionamiento de las semillas de cacao que permiten la comercialización de productos en mercados de mayor valor (Afoakwa et al., 2013; Saltini et al., 2013). Como se pudo evidenciar el escenario SC-BC con las condiciones de baja oferta correspondiente a 2722 kg de semillas cacao a recolectar, se encuentra por debajo del punto de equilibrio de la planta 2 correspondiente a 5526 kg de semillas de cacao a recolectar necesarias para cubrir los costos totales de operación, igual sucede en el escenario FC-BC para la planta 2 donde se recolectan 13859 kg de frutos de cacao, cuando para llegar a punto de equilibrio se requieren 16001 kg de frutos de cacao a recolectar.

La aplicación de los escenarios de abastecimiento en frutos de cacao viene acompañada de la generación de subproductos como el mucilago de cacao y la cacota de cacao, que en muchos sectores son considerados residuos. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se estima la cantidad de productos y subproductos como la cacota de cacao que aproximadamente el 80 % del fruto de cacao, el mucilago de cacao que representa aproximadamente el 3.5 % en variedades trinitarias (Campos-Vega et al., 2018; Llerena et al., 2023),

**Tabla 21**

*Obtención de productos y subproductos*

Escenario	Planta	MPR	SC Obtenida (kg)	CC obtenida (kg)	MC obtenida (kg)	Cacao Seco (kg)
FC-AC	P1	65000	13000	52000	455	4875
	P2	35000	7000	28000	245	2625
FC-BC	P1	51575	10315	41260	361	3868
	P2	13859	2772	11087	97	1039

*Nota.* Esta tabla presenta la cantidad potencial de subproductos de cacao como cacota de cacao y mucilago de cacao y cacao en grano seco, obtenidos a partir de la recolección de frutos de cacao; *Abreviaciones.* P1: Planta 1; P2: Planta 2 SC: Semilla de cacao; CC: Cacota de Cacao; MC: Mucilago de Cacao. Elaboración propia.

En la Figura 22 se presenta la capacidad de obtención de subproductos en los escenarios de alta cosecha los productos a obtener con mayor valor agregado a partir de la centralización y conservación de la calidad de los frutos de cacao por parte de las cooperativas, pudiendo aumentar de esta manera los ingresos de las cooperativas y por consiguiente su rentabilidad (Bannor et al., 2024; Villaroel et al., 2022).

**Figura 22**

*Potencial de obtención de materias primas, productos y subproductos.*



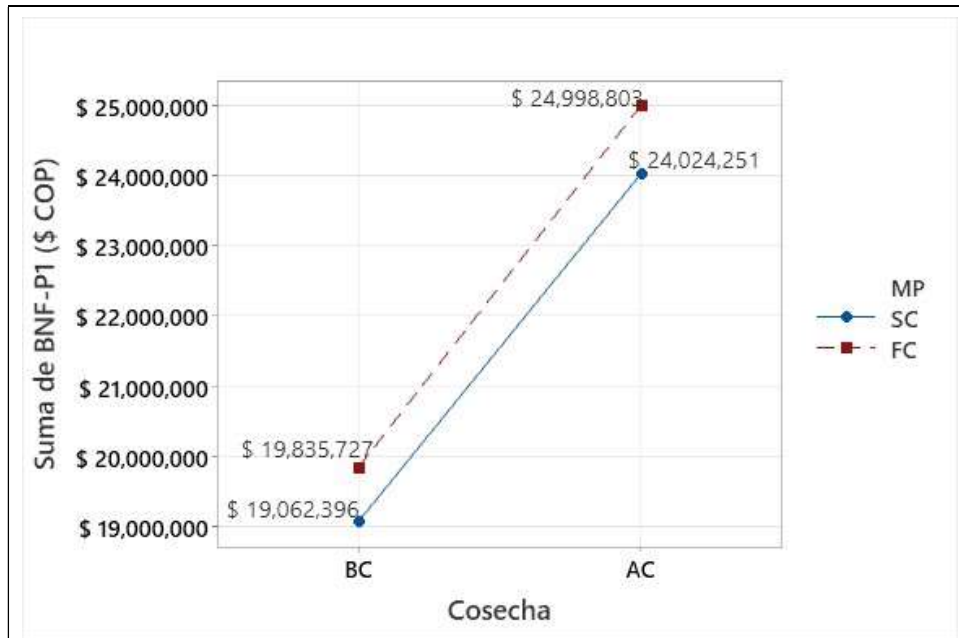
*Nota.* Esta figura presenta el flujo y potencial de obtención de subproductos de cacao, a partir del escenario de alta cosecha para las dos plantas de transformación. Elaboración propia.

**Resultado Beneficio Neto de las Fincas.** Mediante este indicador se busca determinar si la rentabilidad de los productores varía en función de los escenarios de operación de las plantas de transformación, esta relación de ganancia para los productores se da en el horizonte de una semana. Como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los productores de cacao presentan ganancias en todos los escenarios estudiados para las dos plantas de transformación, siendo mayores en los escenarios de alta cosecha. Los escenarios de adquisición de frutos de cacao (FC-AC, FC-BC) exhiben un aumento del 4 % en los ingresos a los productores, frente a su contraparte adquisición de semillas de cacao (SC-AC, SC-BC), esta diferencia se presenta,

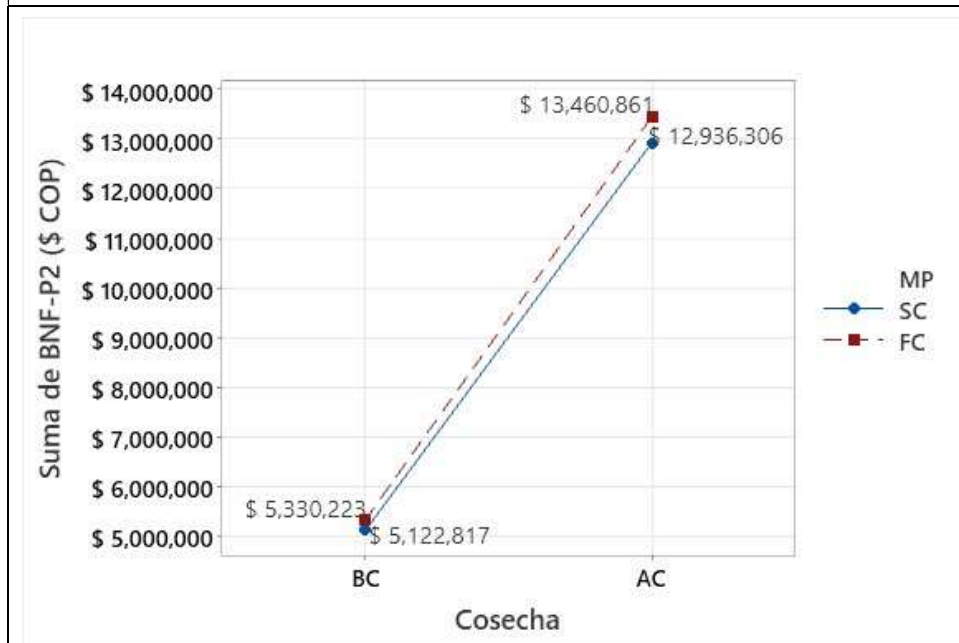
ya que los productores no deben realizar procesos de desgrane de frutos en los escenarios FC-AC, FC-BC.

**Figura 23**

*Beneficio neto fincas de producción de cacao*



**A), Beneficio Neto Fincas Asignadas a Planta 1**



**B). Beneficio Neto Fincas Asignadas a Planta 2**

*Nota.* Esta figura presenta los resultados a la aplicación del indicador de beneficio neto (en pesos colombianos) de las fincas productoras de cacao que abastecen a las plantas de transformación asignadas en los distintos escenarios de operación para cada planta de transformación. *Abreviaciones.* BNF: Beneficio Neto de las Fincas; P1: Planta 1; P2: Planta 2; SC: Semilla de cacao; FC: Frutos de Cacao; BC: Baja Cosecha; AC: Alta Cosecha. Elaboración propia.

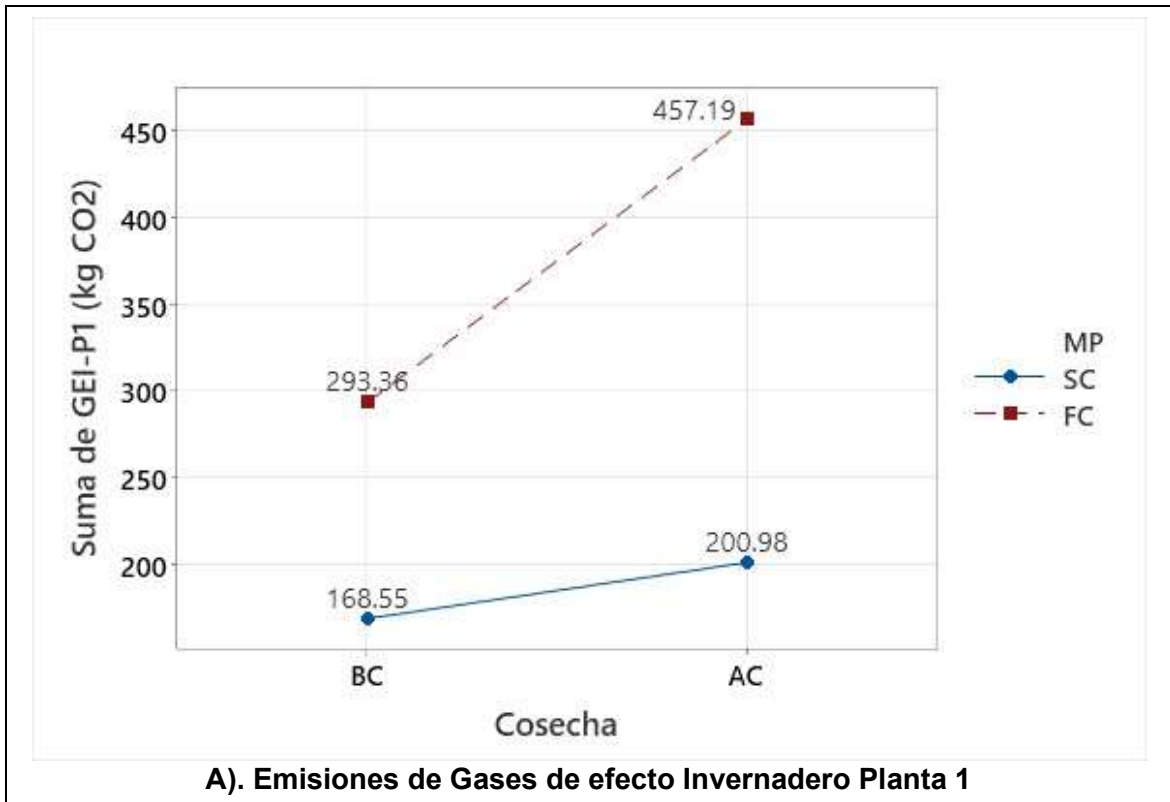
#### **7.5.5.1 Resultado Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).**

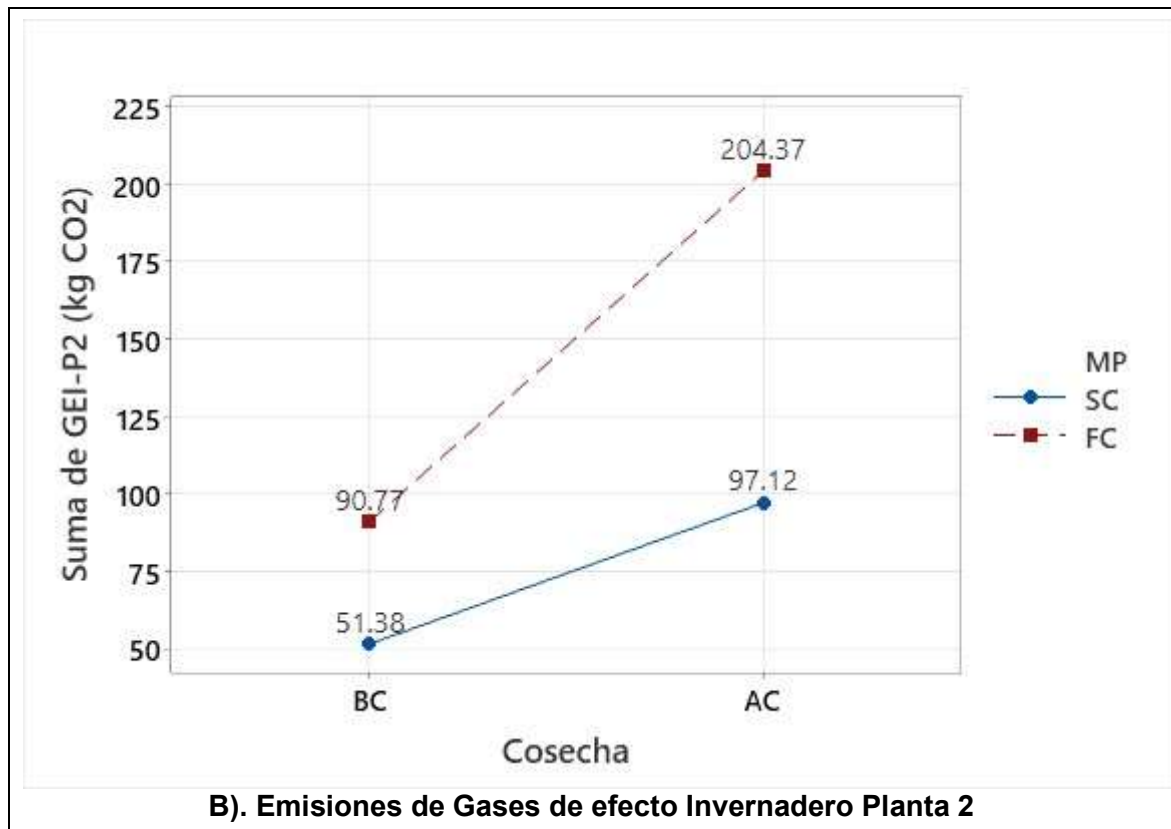
El aumento en el consumo de combustibles fósiles facilita el volumen creciente de gases de efecto invernadero que son responsables del calentamiento global (Garg et al., 2024). Las cadenas de suministro a nivel mundial no son ajenas a esta problemática, por ello, la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero en sus procesos de transporte es un primer paso para reconocer la necesidad de implementar mecanismo con mayor sostenibilidad ambiental (Jiménez-Sánchez et al., 2024). Se cuantificaron las emisiones de gases de efecto invernadero bajo los escenarios de transporte de frutos de cacao y semillas de cacao para las dos plantas de transformación, resultados que se pueden visualizar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Los escenarios de transporte de frutos de cacao FC-BC y FC-AC presentan mayores emisiones de GEI con 293.36 y 457.19 kg CO<sub>2</sub> respecto a los escenarios SC-BC y SC-AC con 168.55 y 200.98 kg CO<sub>2</sub> para la planta 1. Las emisiones de GEI en la planta 2 presentan el mismo comportamiento siendo mayor en los escenarios de transporte de frutos de cacao FC-BC y FC-AC con 90.77 y 204.37 kg CO<sub>2</sub> frente a los escenarios SC-BC y SC-AC con 51.38 y 97.12 kg CO<sub>2</sub> emitidos. Asimismo, para los escenarios de alta cosecha se presentan mayores emisiones que en las temporadas de baja cosecha, ya que en periodos de alta

cosecha los vehículos recorren mayor distancia, por tanto, se debe visitar un número superior de fincas que en periodos de baja cosecha.

**Figura 24**

*Emisiones de GEI en los escenarios de operación*





*Nota.* Esta figura presenta los resultados a la aplicación del indicador de emisiones de gases de efecto invernadero por el consumo de combustibles fósiles (en kgCO<sub>2</sub> equivalentes) en los distintos escenarios de operación para cada planta de transformación postcosecha. *Abreviaciones.* P1: Planta 1; P2: Planta 2; GEI: Gases de Efecto Invernadero; SC: Semilla de cacao; FC: Frutos de Cacao; BC: Baja Cosecha; AC: Alta Cosecha. Elaboración propia.

El cambio climático se presenta actualmente como uno de los retos más importantes de la humanidad debido las amenazas para su bienestar (Morán-Villa et al., 2024). El sistema agroforestal de cacao captura y almacena el carbono al convertir el CO<sub>2</sub> en biomasa (Mena-Mosquera & Andrade, 2021). Este atributo se da gracias a la interacción del cacao con especies arbóreas de frutales, maderables, entre otras, que le otorgan la capacidad de mitigar grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero

convirtiéndose en sumideros de carbono de alto interés a nivel mundial (Goñas et al., 2022). La capacidad de captura y almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales de cacao dependen entre otras, la edad, la diversidad, la densidad de especies y de las variedades genéticas de cacao (Carvalho et al., 2023; Huera-Lucero et al., 2024).

Al momento de la publicación de este trabajo no se encontró información científica específica de la capacidad de captura de carbono en los sistemas agroforestales de cacao en el departamento de Arauca. Sin embargo, se han llevado a cabo estudios científicos en el sur occidente de Colombia donde determinan que el potencial de almacenamiento de carbono en los sistemas agroforestales de cacao oscila entre los 6.29 y 14.02 tonCO<sub>2</sub>/ha\*año (Ballesteros-Possú et al., 2022). Por otra parte, Fedecacao (2023b) estima para los departamentos de Santander, Meta y Arauca bajo el programa ASOMBRATE un potencial de captura entre 4 y 6 tonCO<sub>2</sub>/ha\*año y Blanco et al., (2023) estima para los departamentos de Caquetá y Cesar un potencial de entre 4 y 13 tonCO<sub>2</sub>/ha\*año (ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

**Tabla 22**

*Estimaciones potencial de captura de CO2 para cacao en Colombia*

Fuente	Valor mínimo tonCO <sub>2</sub> /ha*año	Valor máximo tonCO <sub>2</sub> /ha*año
(Ballesteros-Possú et al., 2022)	6.29	14.02
(Blanco et al., 2023)	4	13
<b>(Federación Nacional de Cacaoteros, 2023b)</b>	4	6

*Nota.* Esta tabla presenta valores del potencial de captura de CO<sub>2</sub> del sistema agroforestal de cacao en Colombia. *Abreviaciones.* tonCO<sub>2</sub>/ha\*año: tonelada carbono hectárea por año. Adaptada de (Ballesteros-Possú et al., 2022; Blanco et al., 2023; Federación Nacional de Cacaoteros, 2023b)

Tomando un potencial de 6.29 tonCO<sub>2</sub>/ha\*año capturadas por el sistema agroforestal de cacao en Arauca y contando con 180 fincas, un total de 727 hectáreas del sistema agroforestal de cacao sembradas, con un promedio de área sembrada de 4 ha por predio, se estima un nivel de captura de carbono equivalente a 4572.83 tonCO<sub>2</sub>/ha\*año, se realiza el ajuste al horizonte de planeación de una semana del modelo de optimización, se obtiene un nivel de captura de carbono equivalente a 87.9 tonCO<sub>2</sub>/ha\*sem. En este contexto, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** establece las emisiones totales de gases de efecto invernadero, así como su ratio de compensación según la capacidad de captura de carbono semanal estimada en 87.9 tonCO<sub>2</sub>/ha\*sem, para todos los escenarios se evidencia que se requiere menos del 1 % de la capacidad de captura del sistema agroforestal cacao para compensar las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en el transporte de materias primas a las plantas de transformación.

Los resultados presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, demuestran un notable potencial en la captura de carbono por parte de las fincas evaluadas en este estudio. Asimismo, señalan la necesidad de llevar a cabo futuras investigaciones para cuantificar exhaustivamente la capacidad de captura del sistema agroforestal de cacao en el departamento de Arauca dada su elevada potencialidad en esta función. Este análisis también sugiere la posterior formulación y ejecución de proyectos orientados a pagos por servicios ambientales, que propiciarían un incremento en los ingresos de los productores y mejora en su calidad de vida.

**Tabla 23**

*Relación emisiones y potencial de compensación de gases de efecto invernadero*

Escenario	Planta	Emisiones GEI (tCO <sub>2</sub> /sem)	Total Emisiones GEI (tCO <sub>2</sub> /sem)	Ratio de compensación (%)
FC-AC	P1	0.457	0.662	0.75 %
	P2	0.204		
SC-AC	P1	0.201	0.298	0.34 %
	P2	0.097		
FC-BC	P1	0.293	0.384	0.44 %
	P2	0.091		
SC-BC	P1	0.169	0.220	0.25 %
	P2	0.051		

*Nota.* Esta tabla presenta porcentaje de requerido del potencial de captura de CO<sub>2</sub> para compensar las emisiones de GEI. *Abreviaciones.* tonCO<sub>2</sub>/ha\*año: tonelada carbono hectárea por año; P1: Planta 1; P2: Planta 2; GEI: Gases de Efecto Invernadero; SC: Semilla de cacao; FC: Frutos de Cacao; BC: Baja Cosecha; AC: Alta Cosecha. Elaboración propia.

## 8 Plan de Intervención

Como estrategia de intervención e implementación se aplica la metodología SCOR (Supply Chain Operations Reference) para optimizar y mejorar las operaciones de la cadena de suministro de la empresa.

### 8.1 Propuesta de Funcionamiento Operacional

La aplicación del modelo de optimización en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao genera la implementación de un nuevo mecanismo de operaciones estandarizado que recolecte y transporte la materia prima hasta las plantas minimizando el tiempo y los costos, transformando las materias primas en producto terminado y estableciendo los métodos de entrega los clientes finales. El modelo de funcionamiento operacional bajo el modelo SCOR (Supply Chain Operations Reference) por sus siglas en inglés busca mejorar la gestión de la cadena de suministro en las organizaciones, contando con seis categorías; planificar (Plan), suministro (Source), producir (Make), distribuir (Deliver), devolver (Return) y activar (Enable) (Association for Supply Chain Management, 2017).

#### 8.1.1 Nivel 1: Proceso de Gestión de la Cadena de Suministro (SCM)

Para el diseño de las operaciones bajo la metodología SCOR se tomaron en cuenta los tres primeros niveles de configuración, dado que el nivel 4 se orienta a la implementación significativa del modelo por parte del gerente de las cooperativas.

**Objetivo.** Optimizar la cadena de suministro postcosecha de cacao en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao desde la adquisición de materias primas (cacao) hasta la entrega de productos finales.

**Responsables.** El diseño y posterior implementación del modelo se ha determinado la conformación del Comité de operaciones, liderado por el Gerente, e integrado por el ingeniero de planta y coordinador de comercialización. La función de este comité será la de establecer los mecanismos para la implementación del modelo de operaciones SCOR.

**Indicadores.** Como indicador de rendimiento se establece: el costo total de la cadena de suministro siendo la sumatoria de los costos de abastecimiento, transformación y entrega.

**Alcance.** La presente propuesta de operaciones de la cadena de suministro gestionada por las cooperativas Coomprocar y Coopcacao bajo el modelo SCOR será aplicable para la transformación postcosecha de cacao, desde la adquisición de materia prima hasta la entrega del cacao en grano seco. Con la información suministrada por las cooperativas en el diagnóstico organizacional y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se representa la cadena de suministro postcosecha de cacao bajo el modelo SCOR (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) aplicable para las cooperativas Coomprocar y Coopcacao, donde se identifican los grupos de interés en la cadena de suministro y su relación. Como se puede ver en la Figura 25 el diseño es dirigido a las cooperativas y su relacionamiento con productores y clientes para establecer los macroprocesos. En esta etapa se consideran para las plantas de transformación los siguientes macroprocesos:

**Suministro.** Durante este proceso se realiza el abastecimiento de materias primas a las plantas de transformación mediante recolección, transporte y recepción de materia prima, para su posterior proceso de transformación.

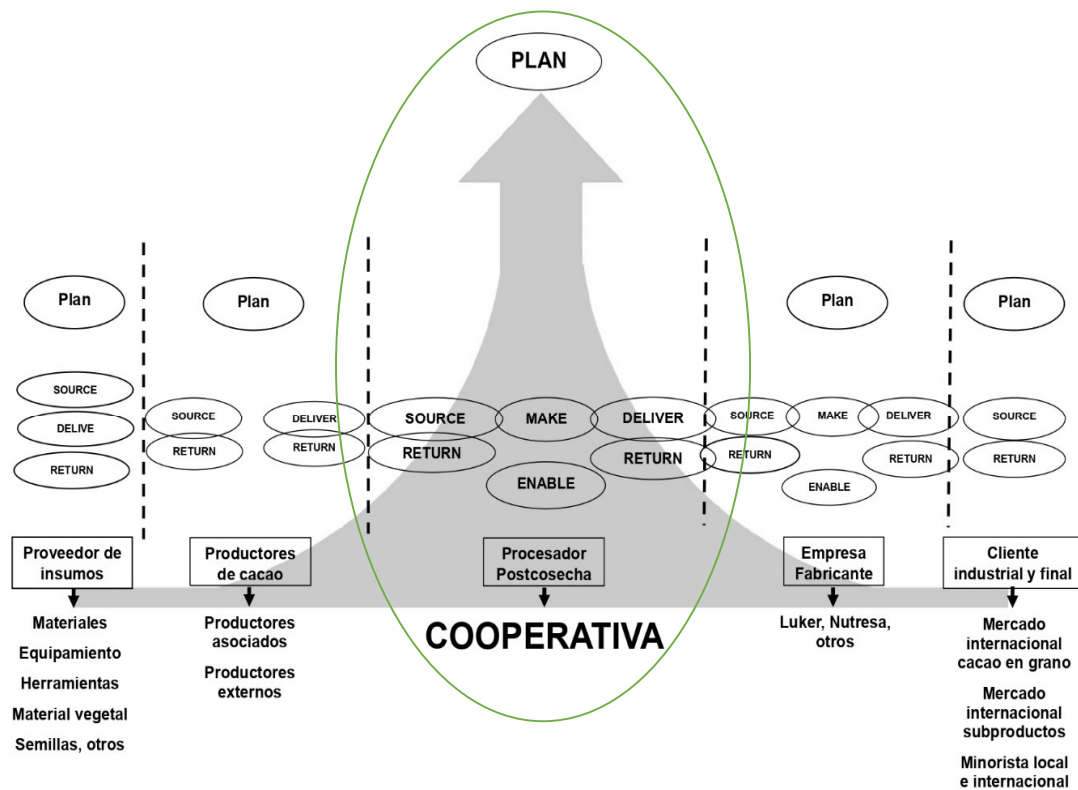
**Transformación.** Durante este proceso se realizan los procesos de desgrane (aplicable para la adquisición de frutos de cacao), fermentación, secado, empaque y almacenamientos de producto terminado.

**Distribución.** Al obtener el cacao en grano seco empacado se programa el envío y entrega de producto al cliente.

**Retorno.** Ante la devolución de materia prima o producto terminado, se gestionan los procesos de retorno del producto o materia prima defectuosa.

**Figura 25**

*Representación cadena de suministro postcosecha de caca bajo modelo SCOR*



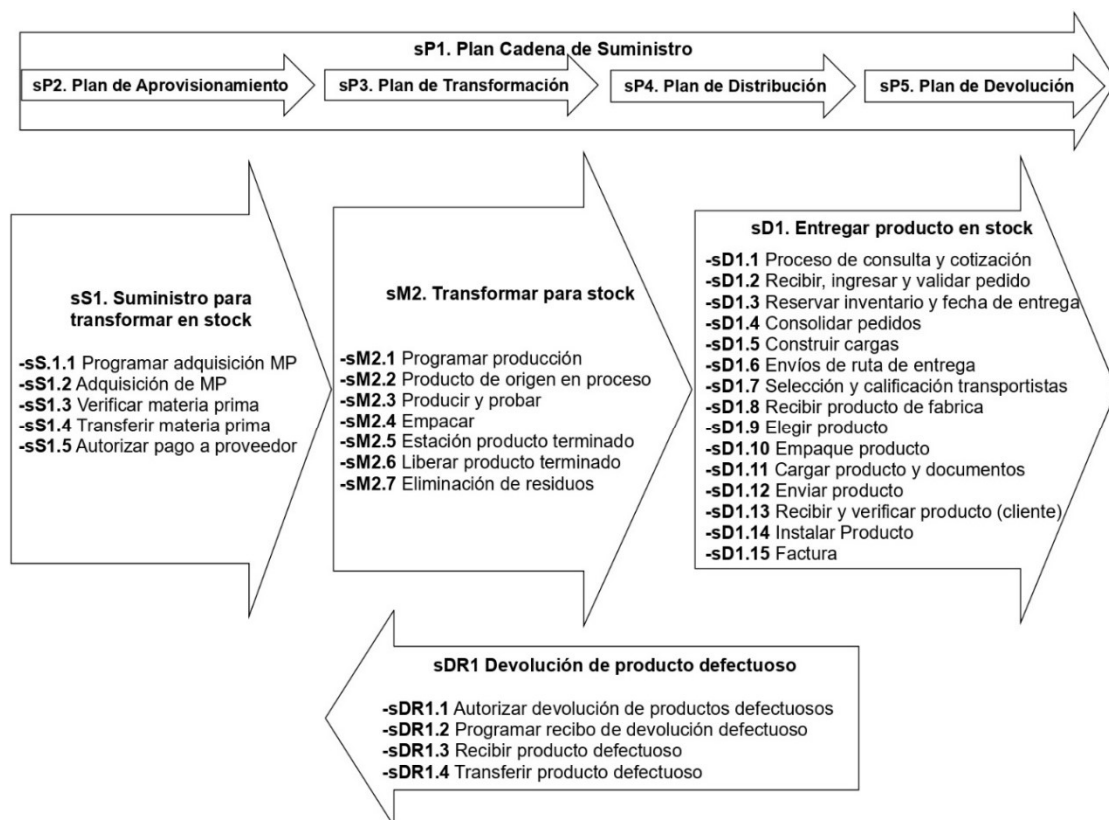
*Nota.* Adaptado de APICS (2017), información brindada por las cooperativas, Abbott et al. (2019) y Escobar et al. (2020). Esta figura identifica la cadena de suministro postcosecha de cacao aplicable a las cooperativas Coomprocar y Coopcacao.

### 8.1.2 Nivel 2 - Procesos Primarios

Se presenta propuesta de los flujos de información y materiales en los procesos primarios de suministro, transformación, distribución y retorno para las plantas de transformación postcosecha en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, así como sus operaciones más importantes bajo el sistema de fabricación para inventarios (make to stock) aplicado por las cooperativas.

**Figura 26**

*Propuesta flujo de materiales e información en operaciones estratégicas*



Nota. Adaptado de APICS (2017), información brindada por las cooperativas, Abbott et al. (2019) y Escobar et al. (2020). Esta figura identifica y planea los macroprocesos principales para el suministro postcosecha de cacao aplicable a las

cooperativas Coomprocar y Coopcacao según el sistema y características de producción make to stock.

### **8.1.3 Nivel 3 - Elementos y Procesos**

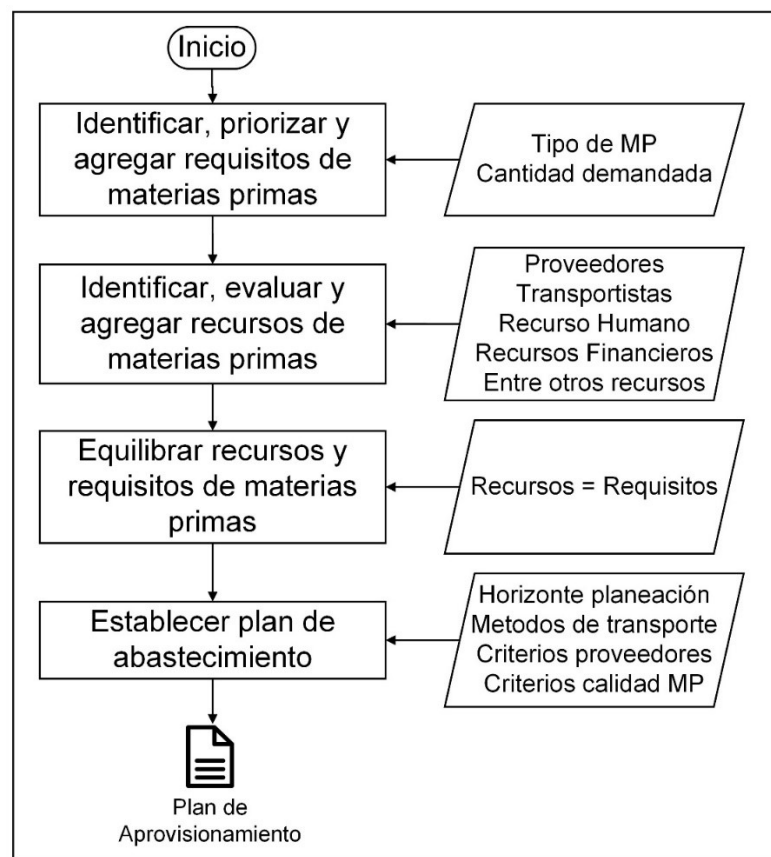
En este nivel se detallan de manera individual los procesos, caracterizando los procedimientos determinantes para el éxito de las operaciones en las cooperativas y la relación entre los macroprocesos. En primera medida se planean los procesos de la cadena de suministro, este proceso de planeación se realiza por los líderes de cada macroproceso y es socializado, actualizado y aprobado por todos los líderes y gerente general de las cooperativas. Lo anterior, permite la adaptación de los requisitos de la materia prima a adquirir, los procesos de transformación postcosecha, requisitos de operación, procesos de entrega de productos a los clientes y gestión de productos defectuosos, que minimizan las desviaciones y maximizan la confiabilidad en la cadena de suministro. Los entregables de este proceso son los planes de aprovisionamiento, transformación, distribución, retorno y de compra en caso de requerir la adquisición de bienes y servicios.

**Plan de Aprovisionamiento.** En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la propuesta para establecer el plan de aprovisionamiento para la planeación de la cadena de suministro postcosecha de cacao en las cooperativas, como primer paso se identifican, priorizan y agregan los requisitos de las materias primas como cantidad demanda, criterios de calidad y tipo de materia prima necesaria. Como segundo paso se identifican, evalúan y agregan los recursos como personal, vehículos, económicos, entre otros, disponibles por la organización para el cumplimiento de los requisitos de aprovisionamiento. Como tercer paso se equilibran los recursos con los requisitos de suministro, estableciendo propuestas como la que permitan el cumplimiento de los

requisitos de suministro. Finalmente, se establece el plan de suministro de las cooperativas determinando el horizonte de planeación, métodos de transporte, criterios de selección de proveedores, criterios de calidad de materia prima, personal adicional a contratar, entre otros.

**Figura 27**

*Propuesta de flujograma de plan de aprovisionamiento*



*Nota.* Adaptado de APICS (2017) e información brindada por las cooperativas. Esta figura propone una metodología para planear el aprovisionamiento de las plantas de transformación.

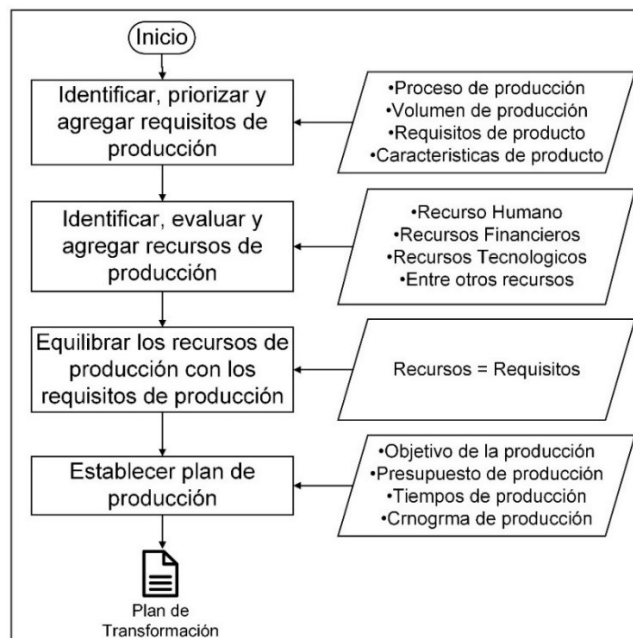
**Plan de Producción.** En los procesos de manufactura la obtención de productos es dependiente de la disponibilidad de materias primas. Esta característica es más notable

para los procesos de transformación postcosecha de cacao en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao puesto que las semillas de cacao son la materia prima exclusiva para la obtención de granos de cacao seco, generando mayor dependencia para los procesos de transformación y distribución. Por tanto, el plan de producción es establecido tomando como insumo el plan de abastecimiento.

La propuesta para establecer el plan de producción se sintetiza como flujograma en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y busca alinear los requisitos de producción, diseño de procesos de transformación, volúmenes de producción y características finales del producto con los recursos necesarios para la transformación postcosecha de cacao como son: la capacidad actual de personal, turnos u horarios de trabajo, cuellos de botella, tiempos de producción, nuevas habilidades, mantenimiento, entre otros.

**Figura 28**

*Propuesta de flujograma de plan de transformación*

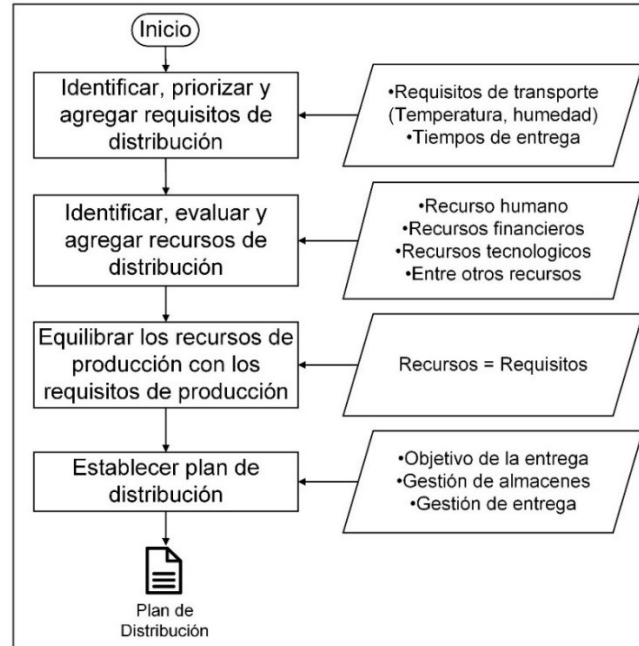


*Nota.* Adaptado de APICS (2017) e información brindada por las cooperativas. Esta figura propone una metodología de planeación de la producción para las cooperativas.

**Plan de Distribución.** La propuesta de establecimiento de plan de distribución presentada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** busca gestionar la entrega del cacao en granos seco a los clientes de las cooperativas de manera efectiva, equilibrando los requisitos de entrega del producto por parte del cliente y los recursos disponibles y a adquirir por parte de las cooperativas. Además, establece los objetivos de entrega de productos terminados, la gestión de almacenes de producto terminado y la gestión de la entrega.

**Figura 29**

*Propuesta de flujograma de plan de distribución*

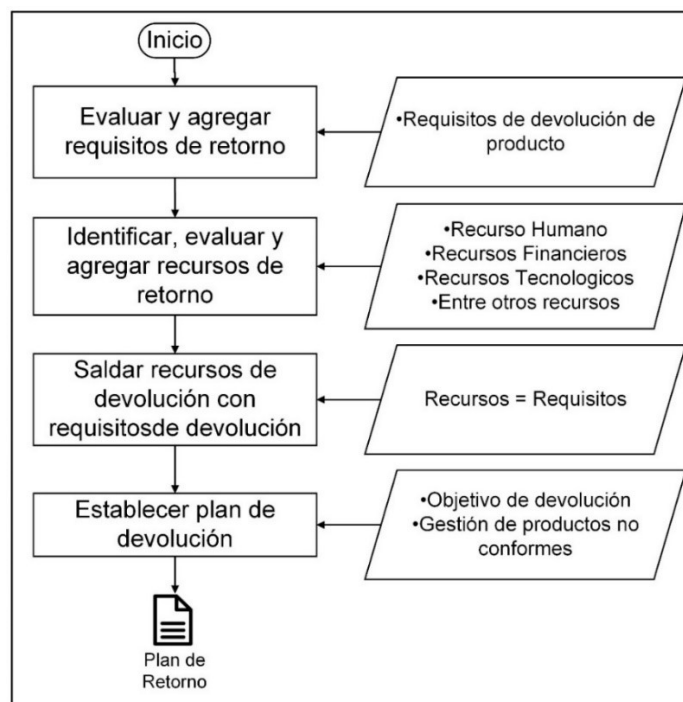


*Nota.* Adaptado de APICS (2017) e información brindada por las cooperativas. Esta figura propone una metodología de planeación de la distribución para las cooperativas.

**Plan de Retorno.** La propuesta de un plan de retorno se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** como un proceso que busca gestionar los productos no conformes devueltos por los clientes por el incumplimiento en los requisitos de entrega, estableciendo en primera medida los criterios de devolución por parte del cliente. Posteriormente, los recursos asignados para la organización para la gestión de estos productos no conformes, balance de los requisitos con los recursos y finalmente el establecimiento del objetivo de retorno y acciones a tomar para los productos no conformes.

**Figura 30**

*Propuesta de flujograma de plan de retorno*

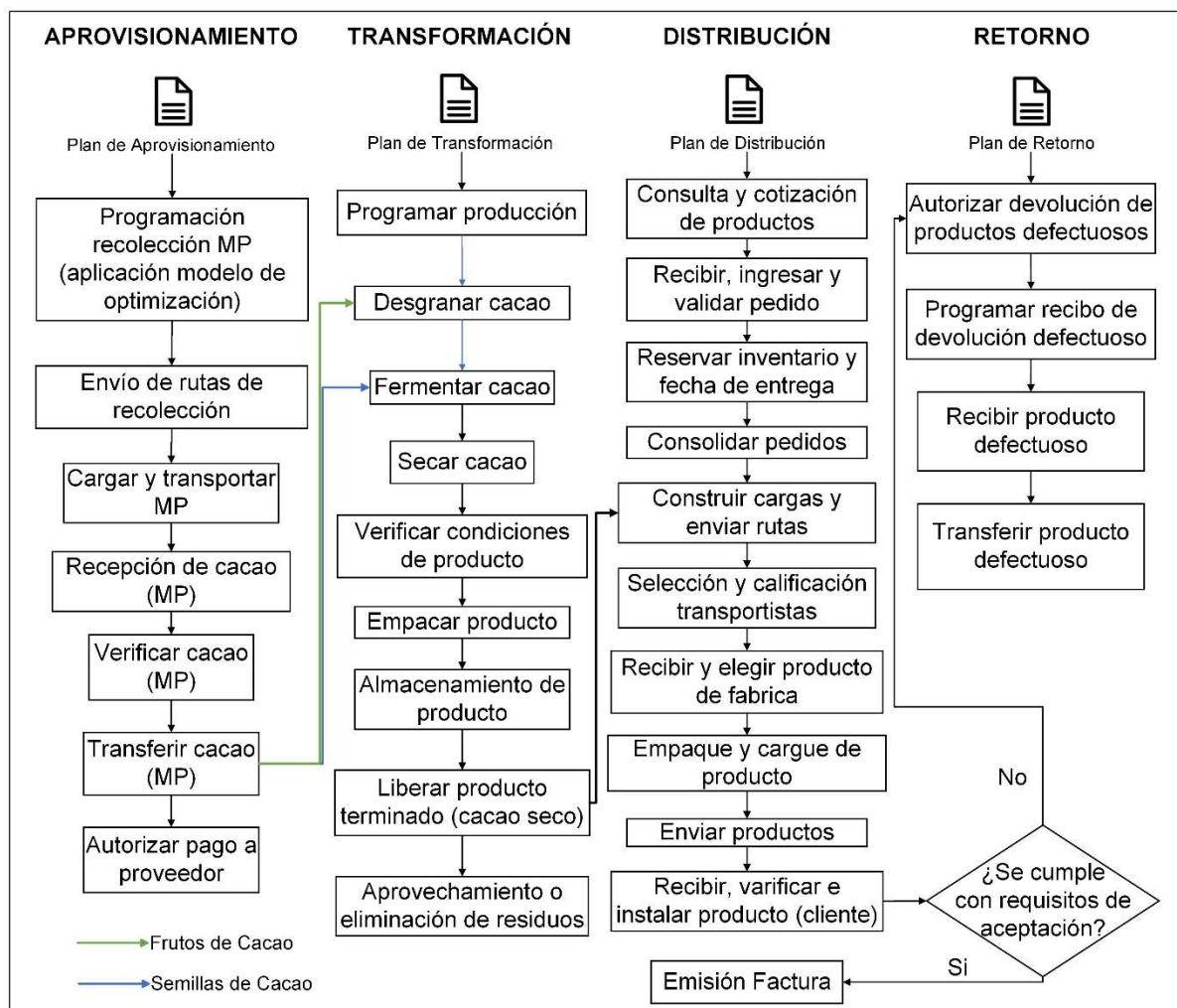


*Nota.* Adaptado de APICS (2017) e información brindada por las cooperativas. Esta figura propone una metodología de planeación de retorno para las cooperativas.

**Propuesta de Procesos Operacionales.** Se presenta propuesta de operaciones en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** iniciando el proceso de aprovisionamiento con la programación de la recolección de materia prima con la aplicación del modelo de optimización propuesto en el presente trabajo, se envían las rutas de recolección para el cargue y transporte de las materias primas, son recibidas en las plantas de transformación, se verifica según requisitos y se transfieren para llevar a cabo la transformación según el plan de transformación.

**Figura 31**

*Propuesta flujograma de procesos operacionales*



*Nota.* Adaptado de APICS (2017) e información brindada por las cooperativas. Esta figura propone un modelo de funcionamiento de operacional en las plantas de transformación de cacao.

El plan de transformación se ejecuta según la fase de procesamiento de la materia prima. Para el caso de recolección y transporte de frutos de cacao se inicia con el proceso de desgranar los frutos de cacao para obtener las semillas de cacao, fermentar, secar, verificar condiciones del producto, empacar, almacenar y liberar producto para el posterior proceso de distribución del producto terminado al cliente. El aprovechamiento de residuos para la recolección y transporte de frutos de cacao se debe realizar para la cacota de cacao y el mucilago de cacao según los procesos de gestión de residuos a definir por las cooperativas. Para la recolección y transporte de semillas de cacao se deben establecer protocolos para el tratamiento de lixiviados provenientes de las semillas de cacao desde su transporte hasta la fermentación.

El proceso de distribución detallado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** relaciona y establece el procedimiento para la comercialización del producto final con los clientes desde los procesos administrativos de venta hasta las actividades operacionales de cargue, envío de rutas y recepción de los clientes, en la etapa de recepción el cliente verifica el cumplimiento de los requisitos de aceptación del producto y en caso de no cumplimiento se deben desarrollar los procesos de retorno detallados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Los procesos de retorno establecen la gestión de los productos no conformes, por ello la organización de establecer donde transferir el producto defectuoso según los requisitos no cumplidos.

#### **8.1.4 Cronograma de Ejecución Plan de Intervención**

El desarrollo e implementación del plan de intervención se detalla en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** estableciendo actividades, responsables, tiempo de ejecución, indicador de medición, meta y presupuesto estimado. De esta manera la organización contará con herramientas para la implementación de las propuestas sugeridas en el presente trabajo.

**Tabla 24**

*Cronograma plan de intervención.*

Actividad	Responsable	Tiempo	Indicador	Meta	Presupuesto
1. Desarrollar software para aplicación de modelo de optimización.	Gerente general	1 año	Un (1) software desarrollado.	Un (1) software desarrollado	\$ 60.000.000
2. Capacitar al personal operativo en la aplicación del modelo de optimización y la propuesta de funcionamiento.	Ingeniero de planta	2 meses	$\frac{\text{Trabajadores capacitados}}{\text{Trabajadores operacionales}} * 100$	100 %	N.A
3. Capacitar a los productores de cacao en el diligenciamiento de encuestas de producción de cacao para recopilar la información.	Coordinador de compra	1 mes	$\frac{\text{Productores capacitados}}{\text{Productores a capacitar}} * 100$	90 %	N.A
4. Establecer protocolos de aprovechamiento de mucilago de cacao y cacota de cacao.	Ingeniero de planta	6 meses	$\frac{\text{Productores capacitados}}{\text{Productores a capacitar}} * 100$	100 %	\$ 30.000.000 (materiales, equipos, herramientas).
6. Implementación y seguimiento propuesta de funcionamiento operacional para la optimización de la cadena suministro postcosecha de cacao en las cooperativas Coomprocar y Coopcacao.	Comité de operaciones	3 meses	Reducción de costos $\frac{\text{Cant} - \text{Cact}}{\text{Costos Ant}} * 100$	10 %	\$20.000.000 (materiales, equipos, herramientas)

Nota. Cant.: Costos anteriores; Cact.: Costos Actuales. Elaboración propia

## **9 Conclusiones y Recomendaciones**

A continuación, se presentan las conclusiones y recomendaciones de la intervención desarrollada:

### **Conclusiones**

La cadena de suministro postcosecha de cacao propuesta desde el abastecimiento de frutos de cacao aplicando el modelo de optimización aumenta la rentabilidad de las cooperativas transformadoras y los productores de cacao.

Las condiciones de suministro de materias primas propuesta gestionada por las cooperativas desde las fincas productoras y su posterior transformación y comercialización favorecen el aumento de la calidad y rentabilidad de la cadena de suministro postcosecha de cacao.

El modelo de optimización obtenido permite la planificación de los procesos de recolección, transporte y recepción de materias primas en las cooperativas, siendo adaptable a los periodos de baja y alta cosecha y obteniendo resultados óptimos en bajos tiempos de cómputo.

El escenario de operación de abastecimiento y transformación postcosecha desde los frutos de cacao, basado en costos y precios de comercialización estimados, generó un beneficio neto desde un 110% mayor para las cooperativas en comparación con los escenarios basados en semillas de cacao, además de proporcionar un 4 % más de ingresos para los productores de cacao.

El escenario operativo de abastecimiento y transformación postcosecha desde frutos de cacao genera las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> durante el transporte. Sin embargo, el sistema agroforestal de cacao destaca por su alta capacidad para capturar gases de

efecto invernadero, neutralizando así las emisiones de CO<sub>2</sub> y promoviendo un equilibrio ambiental.

### **Recomendaciones**

Las cooperativas deben fortalecer las relaciones comerciales con clientes que valoren y demanden cacao en grano seco de fino sabor y aroma, a la vez que fortalecen las relaciones con los productores de cacao para la obtención de cacaos de fino sabor y aroma.

Establecer protocolos de recolección y aprovechamiento de cáscara y mucílago de cacao, obtenidos como residuos en los procesos de desgrane y fermentación del cacao, para favorecer el aumento de ingresos y el uso sostenible de todos los subproductos en la transformación postcosecha de cacao.

Complementar el presente trabajo mediante la aplicación de modelos de asignación de tareas y simulación de procesos de fermentación, secado, almacenamiento y empaque adaptados a los sistemas de producción propuestos en el presente trabajo, para una evaluación más precisa en los procesos postcosecha.

Diseñar y ejecutar planes de formación y entrenamiento para la aplicación e implementación del modelo de optimización y el modelo de funcionamiento operacional.

## 10 Referencias

- Abbott, P. C., Benjamin, T. J., Burniske, G. R., Croft, M. M., Fenton, M., Kelly, C. R., Lundy, M., Rodríguez Camayo, F., & Wilcox, M. D. (2019). *Análisis de la cadena de cacao en Colombia* [Report]. United States Agency for International Development. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/99089>
- Adams, M., & Carodenuto, S. (2023). Stakeholder perspectives on cocoa's living income differential and sustainability trade-offs in Ghana. *World development*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2023.106201>
- Adewumi, A. O., & Adeleke, O. J. (2018). A survey of recent advances in vehicle routing problems. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 9(1), 155-172. <https://doi.org/10.1007/s13198-016-0493-4>
- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., & Jans, R. (2015). The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. *Computers & Operations Research*, 55, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.01.011>
- Afoakwa, E. O. (2014). *Cocoa Production and Processing Technology*. CRC Press.
- Afoakwa, E. O., Quao, J., Takrama, J., Budu, A. S., & Saalia, F. K. (2013). Chemical composition and physical quality characteristics of Ghanaian cocoa beans as affected by pulp pre-conditioning and fermentation. *Journal of Food Science and Technology*, 50(6), 1097-1105. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0446-5>
- AgroNet, & Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). *Precio de referencia semanal de compra de cacao—Fuente Industria—Fedecacao - Exportadores*. <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Precio-de-referencia-semanal-de-compra-de-cacao---Fuente-Industria.aspx>

- Aguilar, H. (2017, septiembre). *Guía de buenas prácticas de postcosecha de cacao*. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola. [http://www.fhia.org.hn/descargas/Proyecto\\_de\\_Cacao\\_SECO/Guia\\_buenas\\_practicas\\_de\\_poscosecha\\_de\\_cacao.pdf](http://www.fhia.org.hn/descargas/Proyecto_de_Cacao_SECO/Guia_buenas_practicas_de_poscosecha_de_cacao.pdf)
- Ahmed, N., Shek Md, A. R., Hegazy, R., & Zafar, S. (2020). Modelización basada en ANFIS y determinación de parámetros operativos óptimos para mejorar la velocidad de secado de los granos de cacao | Diarios y revistas del IEEE | IEEE Xplore. *IEEE Access*, 8, 45964-45973. <https://doi.org/doi:10.1109/ACCESS.2020.2977165>
- Alshekhli, O., Foo, D. C. Y., Hii, C. L., & Law, C. L. (2011). Process simulation and debottlenecking for an industrial cocoa manufacturing process. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 528-536. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.09.013>
- Amado, D. (2022, septiembre 9). *Entrevista personal gerente de Coopcacao* [Comunicación personal].
- Arenal Laza, C. (2022). *Optimización de la cadena logística*. MF1005. Editorial Tutor Formación. <https://elibro.net/es/ereader/bibliotecaean/218961>
- Association for Supply Chain Management. (2017). *Supply Chain Operations Reference Model SCOR Version 12.0*. <https://www.apics.org/docs/default-source/scor-training/scor-v12-0-framework-introduction.pdf?sfvrsn=2>
- Ballesteros-Possú, W., Valencia, J. C., & Navia-Estrada, J. F. (2022). Assessment of a Cocoa-Based Agroforestry System in the Southwest of Colombia. *Sustainability*, 14(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/su14159447>

- Banco de la República. (2023). *Índice de precios al consumidor (IPC)*. Índice de precios al consumidor (IPC). <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indice-precios-consumidor-ipc>
- Bannor, R. K., Amoako, D., & Kwabena Chaa Kyire, S. (2024). Sustaining beyond the production of cocoa for beans: The preference and impact of products from the cocoa husk. *Environmental and Sustainability Indicators*, 21, 100333. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100333>
- Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2004). *Food Chemistry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07279-0>
- Beltrami, E. J., & Bodin, L. D. (1974). Networks and vehicle routing for municipal waste collection. *Networks*, 4(1), 65-94. <https://doi.org/10.1002/net.3230040106>
- Blanco, J. T., Quintana, A., Garcia, M. C., Navarrete, M., Borda, C., & Vanegas, M. (2023). *Identificación de las metodologías/estándares para formular proyectos de reducción de emisiones de GEI para sistemas de producción de cacao bajo en emisiones en Caquetá y Cesar*. <https://hdl.handle.net/10568/138249>
- Bölük, E., Akdeniz, E., Gunes, R., Palabiyik, I., Konar, N., & Toker, O. S. (2024). Determination of the process effect on cocoa butter crystallization by rheometer: Kinetic modeling by Gompertz equation. *Journal of Food Science*, 89(5), 2867-2878. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17040>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>

- Campbell, A. M., & Wilson, J. H. (2014). Forty years of periodic vehicle routing. *Networks*, 63(1), 2-15. <https://doi.org/10.1002/net.21527>
- Campos-Vega, R., Nieto-Figueroa, K. H., & Oomah, B. D. (2018). Cáscara de vaina de cacao (*Theobroma cacao* L.): Fuente renovable de compuestos bioactivos. *Trends in Food Science & Technology*, 81, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.022>
- Cardona Velasquez, L. M., Rodroguéz-Sandoval, E., & Marleny Cadena Chamorro, E. (2016). Diagnóstico de las prácticas de beneficio del cacao en el departamento de Arauca. *Revista Lasallista de Investigación*, 13, 94-104.
- Caro, M. S. C. (2017). *Modelo de optimización de ruteo – localización de vehículos con ventanas de tiempo y estructuras cross-docking en cadena de suministro sostenible de alimentos perecederos de dos eslabones*. [Universidad Tecnológica de Bolívar]. <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0073035.pdf>
- Carvalho, F. E. L., Escobar-Pachajoa, L. D., Camargo, I. D., Rojas-Molina, J., Jaimes-Suárez, Y. Y., & Rivera-Meneses, J. J. (2023). The interspecific interactions in agroforestry systems enhance leaf water use efficiency and carbon storage in cocoa. *Environmental and Experimental Botany*, 205, 105119. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105119>
- Caso Barrera, L. (2016). *Cacao: Producción, consumo y comercio: del período prehispánico a la actualidad en América Latina*. Editorial Iberoamericana / Vervuert. <https://elibro.net/es/ereader/bibliotecaean/105749>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2013). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (5th ed). Pearson.

Christofides, N., & Beasley, J. E. (1984). The period routing problem. *Networks*, 14(2), 237-256. <https://doi.org/10.1002/net.3230140205>

Cóccola, M. E., Basán, N., Méndez, C. A., & Dondo, R. G. (2022). Optimization of resource flows across the whole supply chain. Application to a case study in the dairy industry. *Computers and Chemical Engineering*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107632>

Computers & Industrial Engineering. (2016). *Problema de enrutamiento de vehículos: Una descripción general | Temas de ScienceDirect*. <https://www-sciencedirect-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/topics/mathematics/vehicle-routing-problem>

Contreras Pedraza, C. A. (2017). *Análisis de la cadena de valor del cacao en Colombia: Generación de estrategias tecnológicas en operaciones de cosecha y postcosecha, organizativas, de capacidad instalada y de mercado*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60801>

Cooper, M. C., Lambert, D. M., & Pagh, J. D. (1997). Supply chain management: More than a new name for logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1), 1-14. <https://doi.org/10.1108/09574099710805556>

Cooperativa Multiactiva de Producción y Comercialización Agropecuaria de Arauquita. (2023). *Coomprocar*. Coomprocar. <https://coomprocar.com.co/>

Cooperativa Multiactiva de Producción y Comercialización Agropecuaria de Arauquita. (2023). *Coomprocar*. Coomprocar. <https://coomprocar.com/>

Cordeau, J.-F., Gendreau, M., & Laporte, G. (1997). A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, 30(2), 105-119.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0037\(199709\)30:2<105::AID-NET5>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0037(199709)30:2<105::AID-NET5>3.0.CO;2-G)

Cordeau, J.-F., & Maischberger, M. (2012). A parallel iterated tabu search heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, 39(9), 2033-2050. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.09.021>

Corona-Gutiérrez, K., Nucamendi-Guillén, S., & Lalla-Ruiz, E. (2022). Vehicle routing with cumulative objectives: A state of the art and analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108054. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108054>

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80-91. <https://doi.org/10.1287/mnsc.6.1.80>

Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista EIA*. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n12/n12a03.pdf>

Deng, Y., Shi, Y., Huang, Y., & Xu, J. (2023). An optimization approach for food waste management system based on technical integration under different Water/Grease proportions. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136254>

Díaz-Madroñero, M., Peidro, D., & Mula, J. (2015). A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions. *Computers & Industrial Engineering*, 88, 518-535. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.06.010>

- Duarte Roa, J. J. (2018). *Montaje de un centro de acopio para exportación de cacaos especiales finos de aroma en la ciudad de Lebrija-Santander* [Universidad Pontificia Bolivariana]. <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5652>
- Dubón, A. (2016, abril). *Protocolo para el beneficiado y calidad del cacao*. Fundación Hondureña de Investigación Agrícola, FHIA. [http://www.fhia.org.hn/descargas/Proyecto\\_de\\_Cacao\\_SECO/Protocolo\\_para\\_el\\_Beneficiado\\_y\\_Calidad\\_del\\_Cacao\\_2016.pdf](http://www.fhia.org.hn/descargas/Proyecto_de_Cacao_SECO/Protocolo_para_el_Beneficiado_y_Calidad_del_Cacao_2016.pdf)
- Encinas-Ferrer, C. (2014). Oligopsonio-Oligopolio: La perfecta competencia imperfecta. *Nova Scientia*, 6(11), 346-362.
- Escobar, S., Santander, M., Useche, P., Contreras, C., & Rodríguez, J. (2020). Aligning strategic objectives with research and development activities in a soft commodity sector: a technological plan for colombian cocoa producers. *Agriculture*, 10(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050141>
- Escobar, S., Santander, M., Zuluaga, M., Chacón, I., Rodríguez, J., & Vaillant, F. (2021). Fine cocoa beans production: Tracking aroma precursors through a comprehensive analysis of flavor attributes formation. *Food Chemistry*, 365, 130627. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130627>
- Fahimnia, B., Farahani, R. Z., Marian, R., & Luong, L. (2013). A review and critique on integrated production–distribution planning models and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2012.07.005>
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2016). *Guía técnica para el cultivo del cacao*.
- Federación Nacional de Cacaoteros. (2023a, febrero 7). *Producción cacaotera presentó una reducción del 10% en 2022 por lluvias*. Sitefedecacao.

<https://www.fedecacao.com.co/post/producción-cacaotera-presentó-una-reducción-del-10-en-2022-por-lluvias>

Federación Nacional de Cacaoteros. (2023b, septiembre 18). *Fedecacao y Solidaridad Network lanzan Asómbrate*. Sitefedecacao. <https://www.fedecacao.com.co/post/fedecacao-y-solidaridad-network-lanzan-asómbrate>

Federación Nacional de Cacaoteros. (2024, mayo 8). *Cuota De Fomento Cacaotero*. Sitefedecacao. <https://www.fedecacao.com.co/cuota-de-fomento-cacaotero>

Fins, L, Somarriba, E, & Quesada, F. (2013). *La historia del cacao y del chocolate*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). [http://www.fhia.org.hn/descargas/Proyecto\\_de\\_Cacao\\_FHIA-Canada/historia\\_del\\_cacao\\_y\\_chocolate.pdf](http://www.fhia.org.hn/descargas/Proyecto_de_Cacao_FHIA-Canada/historia_del_cacao_y_chocolate.pdf)

Flood, M. M. (1956). The Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, 4(1), 61-75. <https://doi.org/10.1287/opre.4.1.61>

Francis, P. M., Smilowitz, K. R., & Tzur, M. (2008). The Period Vehicle Routing Problem and its Extensions. En B. Golden, S. Raghavan, & E. Wasil (Eds.), *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges* (pp. 73-102). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8_4)

Garg, A. P., Chaudhary, M., Garg, C., Garg, A. P., Chaudhary, M., & Garg, C. (2024). *Global impact of carbon emissions and strategies for its management* (global-impact-of-carbon-emissions-and-strategies-for-its-management) [Chapter]. <https://Services-lgi-Global-Com.Bdbiblioteca.Universidadean.Edu.Co/Resolvedoi/Resolve.Asp?Doi=10.401>

8/978-1-6684-9863-7.Ch004; IGI Global.  
<https://www.igi.global.com/gateway/chapter/www.igi-global.com/gateway/chapter/341611>

Gheisariha, E., Etebari, F., Vahdani, B., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2023). A holistic, integrated supply-production–distribution problem in the dairy industry under uncertain supply and demand. *Computers & Industrial Engineering*, *181*, 109296. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109296>

Giallombardo, G., Mirabelli, G., & Solina, V. (2021). An integrated model for the harvest, storage, and distribution of perishable crops. *Applied Sciences-Basel*, *11*(15). <https://doi.org/10.3390/app11156855>

González-Orozco, C. E., Porcel, M., Yockteng, R., Caro-Quintero, A., Rodriguez-Medina, C., Santander, M., Zuluaga, M., Soto, M., Rodriguez Cortina, J., Vaillant, F. E., & Escobar Parra, S. (2024). Integrating new variables into a framework to support cacao denomination of origin: A case study in Southwest Colombia. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *104*(3), 1367-1381. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13016>

Gonzalez-Orozco, C., Porcel, M., Escobar, S., Bravo, D., Lopez, Y. G., Yockteng, R., Vaillant, F., Santander, M., Llano, S., Parra, K., Briceño, E., Carmona, J., Torres, S., Contreras, R., Otero, A., Pesca, A., & Carrillo, G. (2023a). Cacao (*Theobroma cacao* L.) climate zones and its associated agrobiodiversity in Arauca, Colombia. *Biodiversity Data Journal*, *11*, e112771. <https://doi.org/10.3897/BDJ.11.e112771>

Gonzalez-Orozco, C., Porcel, M., Escobar, S., Bravo, D., Lopez, Y. G., Yockteng, R., Vaillant, F., Santander, M., Llano, S., Parra, K., Briceño, E., Carmona, J., Torres,

S., Contreras, R., Otero, A., Pesca, A., & Carrillo, G. (2023b). *Cacao (Theobroma cacao L.) climate zones and its associated agrobiodiversity in Arauca, Colombia*.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.8302237>

Goñas, M., Rojas-Briceño, N. B., Culqui-Gaslac, C., Arce-Inga, M., Marlo, G., Pariente-Mondragón, E., & Oliva-Cruz, M. (2022). Carbon Sequestration in Fine Aroma Cocoa Agroforestry Systems in Amazonas, Peru. *Sustainability*, 14(15), Article 15.  
<https://doi.org/10.3390/su14159739>

Guarnaschelli, A., Salomone, H. E., & Méndez, C. A. (2020). A stochastic approach for integrated production and distribution planning in dairy supply chains. *Computers & Chemical Engineering*, 140, 106966.  
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106966>

Hashemi-Amiri, O., Ghorbani, F., & Ji, R. (2023). Integrated supplier selection, scheduling, and routing problem for perishable product supply chain: A distributionally robust approach. *Computers & Industrial Engineering*, 175.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108845>

Hein, F., & Almeder, C. (2016). Quantitative insights into the integrated supply vehicle routing and production planning problem. *International Journal of Production Economics*, 177, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.04.014>

Hernández Triviño, A. (2013). Chocolate: Historia de un nahuatlismo. *Estudios de cultura náhuatl*, 46, 37-87.

Hernández-Sampieri, R. (2023). *Metodología de la investigación* (Segunda Edición). McGraw Hill. <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/stage.aspx?il=&pg=&ed=>

Hrabec, D., Hvattum, L. M., & Hoff, A. (2022). The value of integrated planning for production, inventory, and routing decisions: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Production Economics*, 248, 108468. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108468>

Huera-Lucero, T., Lopez-Piñeiro, A., Torres, B., & Bravo-Medina, C. (2024). Biodiversity and Carbon sequestration in chakra-type agroforestry systems and humid tropical forests of the Ecuadorian Amazon. *Forests*, 15(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/f15030557>

International Cocoa Organization. (2023, abril 4). *Economy*. International Cocoa Organization. <https://www.icco.org/economy/>

International Cocoa Organization. (2024). *Fine flavor cocoa*. International Cocoa Organization. <https://www.icco.org/fine-or-flavor-cocoa/>

Jiménez-Sánchez, R., Raygoza-L, M. E., Orduño-Osuna, J. H., Limón-Molina, G. M., Murrieta-Rico, F. N., Jiménez-Sánchez, R., Raygoza-L, M. E., Orduño-Osuna, J. H., Limón-Molina, G. M., & Murrieta-Rico, F. N. (2024). *Towards a sustainable supply chain management: strategies and challenges in the era of industry 4.0 (towards-a-sustainable-supply-chain-management)* [Chapter]. <https://Services-Igi-Global-Com.Bdbiblioteca.Universidadean.Edu.Co/Resolvedoi/Resolve.Asp?Doi=10.4018/979-8-3693-0669-7.Ch004>; IGI Global. <https://www.igi-global.com/gateway/chapter/www.igi-global.com/gateway/chapter/341516>

- Koç, Ç., & Laporte, G. (2018). Vehicle routing with backhauls: Review and research perspectives. *Computers & Operations Research*, 91, 79-91.  
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.003>
- Kumari, M., Kanti De, P., Narang, P., & Shah, N. H. (2023). Integrated optimization of inventory, replenishment, and vehicle routing for a sustainable supply chain utilizing a novel hybrid algorithm with carbon emission regulation. *Expert Systems with Applications*, 220, 119667. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119667>
- Lahyani, R., Khemakhem, M., & Semet, F. (2015). Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 1-14.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.048>
- Lambert, D. M. (2014). *Supply Chain Management* (4th ed.). Supply Chain Management Institute.
- Lastra, R. P. (2000). Encuestas probabilísticas vs. No probabilísticas. *Política y Cultura*, 13, 263-276.
- Lee, Y., Charitopoulos, V. M., Thyagarajan, K., Morris, I., Pinto, J. M., & Papageorgiou, L. G. (2022). Integrated production and inventory routing planning of oxygen supply chains. *Chemical Engineering Research and Design*, 186, 97-111.  
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.07.027>
- Llerena, W., Samaniego, I., Vallejo, C., Arreaga, A., Zhunio, B., Coronel, Z., Quiroz, J., Angós, I., & Carrillo, W. (2023). Profile of bioactive components of cocoa (Theobroma cacao L.) By-Products from Ecuador and Evaluation of Their Antioxidant Activity. *Foods*, 12(13), Article 13.  
<https://doi.org/10.3390/foods12132583>

- Manousakis, E. G., Tarantilis, C. D., & Zachariadis, E. E. (2023). The cyclic production routing problem. *International Journal of Production Research*, 61(22), 7707-7726. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2162144>
- Marin, K. (2022, septiembre 6). *Entrevista personal gerente de Coopcacao* [Comunicación personal].
- Mauleon & Prado. (2021). *Logística Inbound: Vol. Tomo 1*. <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/stage.aspx?il=&pg=&ed=>
- Md Yusof, A. H., Abd Gani, S. S., Zaidan, U. H., Halimi, M. I. E., & Zainudin, B. H. (2019). Optimization of an ultrasound-assisted extraction condition for flavonoid compounds from cocoa shells (*Theobroma cacao*) using response surface methodology. *Molecules*, 24(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/molecules24040711>
- Mejia, C. (2015). *Una introducción general a los mercados de commodities a nivel internacional (a general introduction to the international commodity markets)* (SSRN Scholarly Paper 3062233). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3062233>
- Mena-Mosquera, V. E., & Andrade, C. (2021). Potencial de reducción de emisiones y captura de carbono en bosques y sistemas agroforestales con cacao en el Pacífico colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 69(4), Article 4. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i4.45927>
- Mensah, M., Asiedu, N. Y., Neba, F. A., Amaniampong, P. N., Boakye, P., & Addo, A. (2020). Modeling, optimization and kinetic analysis of the hydrolysis process of waste cocoa pod husk to reducing sugars. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1160. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2966-y>

- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2).  
<https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021, marzo). *Cadena de Cacao*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.  
<https://sioc.minagricultura.gov.co/Cacao/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024, mayo 8). *Resolución 40103 de 2021*.  
[https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30043913#ver\\_30269902](https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30043913#ver_30269902)
- Montoya-Torres, J. R., López Franco, J., Nieto Isaza, S., Felizzola Jiménez, H., & Herazo-Padilla, N. (2015). A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, 79, 115-129.  
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.10.029>
- Mor, A., & Speranza, M. G. (2022). Vehicle routing problems over time: A survey. *Annals of Operations Research*, 314(1), 255-275. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04488-0>
- Morán-Villa, V. L., Monterroso-Rivas, A. I., Mata-González, R., Márquez-Berber, S. R., Abdallah, M. A. B., Valdes-Velarde, E., & Hernández-Sánchez, R. (2024). Above-ground biomass estimation by developing allometric equations for *Theobroma cacao* in Tabasco, Mexico. *Agroforestry Systems*, 98(3), 537-549.  
<https://doi.org/10.1007/s10457-023-00928-x>

- Mujica Mota, M., El Makhoulfi, A., & Scala, P. (2019). On the logistics of cocoa supply chain in Côte d'Ivoire: Simulation-based analysis. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106034. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106034>
- Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic analysis: Striving to meet the trustworthiness criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, 16(1), 1609406917733847. <https://doi.org/10.1177/1609406917733847>
- Nur, T., Hidayatno, A., Setiawan, A. D., Komarudin, K., & Suzianti, A. (2023). Environmental impact analysis to achieve sustainability for artisan chocolate products supply chain. *Sustainability (Switzerland)*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/su151813527>
- Ouattara, L., Soro, D., Fanou, G., Kouassi, E., Bamba, M., Yao, K., Adouby, K., Drogui, A., & Tyagi, D. (2022). Optimización de la deslignificación alcalina asistida en autoclave de cáscaras de vainas de cacao (*Theobroma cacao*) utilizando KOH para maximizar los azúcares reductores: BioResources. *BioResources*, 17(1), 826-848.
- Pabón, M. (2016). Caracterización socio-económica y productiva del cultivo de cacao en el departamento de Santander (Colombia). *Revista Mexicana de Agronegocios*, 38(January-June 2016), 1-12.
- Paredes-Belmar, G., Montero, E., Lüer-Villagra, A., Marianov, V., & Araya-Sassi, C. (2022). Vehicle routing for milk collection with gradual blending: A case arising in Chile. *European Journal of Operational Research*, 303(3), 1403-1416. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.050>
- Patrimonio Natural. (2020). *Manual de Cosecha y postcosecha de cacao fino y de aroma*. Patrimonio Natural. <https://www.patrimonionatural.org.co/download/manual-de-cosecha-y-postcosecha-de-cacao-fino-y-de-aroma/>

- Perea Villamil, J. A. (2019). *El cacao desde la ciencia: De la semilla al chocolate*. Ediciones UIS. <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaean/titulos/129274>
- Pratap, S., Jauhar, S., Paul, S., & Zhou, F. (2022). Stochastic optimization approach for green routing and planning in perishable food production. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130063>
- Rocha-Medina, L. B. R., González la Rota, E. C. G. L., & Orjuela-Castro, J. A. O. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. *Ingeniería*, 16(2), 35-55.
- Saltini, R., Akkerman, R., & Frosch, S. (2013). Optimizing chocolate production through traceability: A review of the influence of farming practices on cocoa bean quality. *Food Control*, 29(1), 167-187. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.05.054>
- Sana, S. S., Herrera-Vidal, G., & Acevedo-Chedid, J. (2017). Collaborative model on the agro-industrial supply chain of cocoa. *Cybernetics and Systems*, 48(4), 325-347. <https://doi.org/10.1080/01969722.2017.1285160>
- Sánchez Arizo, V. H., Zambrano Mendoza, J. L., & Iglesias, C. (2019). *La cadena de valor del cacao en América Latina y el Caribe*. INIAP, Estación Experimental Santa Catalina 2019. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5382>
- Santander Muñoz, M., Rodríguez Cortina, J., Vaillant, F. E., & Escobar Parra, S. (2020). An overview of the physical and biochemical transformation of cocoa seeds to beans and to chocolate: Flavor formation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(10), 1593-1613. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1581726>

- Sarah, M., Hasibuan, I. M., Misran, E., & Maulina, S. (2022). Optimization of microwave-assisted pectin extraction from cocoa pod husk. *Molecules*, 27(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/molecules27196544>
- Sawik, T. (2016). Integrated supply, production and distribution scheduling under disruption risks. *Omega*, 62, 131-144. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.09.005>
- Shekarchizadeh, H., Tikani, R., & Kadivar, M. (2014). Optimization of cocoa butter analog synthesis variables using neural networks and genetic algorithm. *Journal of Food Science and Technology*, 51(9), 2099-2105. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0695-y>
- Srikanth, V., Rajesh, G. K., Kothakota, A., Pandiselvam, R., Sagarika, N., Manikantan, M. R., & Sudheer, K. P. (2020). Modeling and optimization of developed cocoa beans extractor parameters using box behnken design and artificial neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105715. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105715>
- Stock, J. R., & Boyer, S. L. (2009). Developing a consensus definition of supply chain management: A qualitative study. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(8), 690-711. <https://doi.org/10.1108/09600030910996323>
- Teneda Llerena, W. F. (2017). *Mejoramiento del Proceso de Fermentación del Cacao: (Theobroma cacao L.) Variedad nacional y variedad CCN51*. Universidad Internacional de Andalucía. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=664426>

- Tosto, A., Morales, A., Rahn, E., Evers, J. B., Zuidema, P. A., & Anten, N. P. R. (2023). Simulating cocoa production: A review of modelling approaches and gaps. *Agricultural Systems*, 206, 103614. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103614>
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. SIAM monographs on discrete mathematics and applications.
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2024, abril 12). *Calculadora FECOC 2016* [Gubernamental]. Acerca de la calculadora Fecoc 2016. [http://www.upme.gov.co/calculadora\\_emisiones/aplicacion/acercade.html](http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/acercade.html)
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2024, mayo 8). *Estructura de precios de los combustibles en las principales ciudades*. <https://www1.upme.gov.co/sipg/Paginas/Estructura-precios-combustibles.aspx>
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. (2023). *Plan de ordenamiento productivo para la cadena de cacao y su agroindustria*. Plan de ordenamiento productivo para la cadena de cacao y su agroindustria. <https://upra.gov.co:443/es-co/Paginas/pop-cacao.aspx>
- Vanzetti, N., Broz, D., Montagna, J. M., & Corsano, G. (2019). Integrated approach for the bucking and production planning problems in forest industry. *Computers & Chemical Engineering*, 125, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.03.008>
- Vidal, T. (2022). Hybrid genetic search for the CVRP: Open-source implementation and SWAP\* neighborhood. *Computers & Operations Research*, 140, 105643. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105643>

Viers, G. (1953). Le cacao dans le monde. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 6(24), 297-351.

<https://doi.org/10.3406/caoum.1953.1871>

Villaroel, J., Badillo, W., & Briones, B. (2022). *Sustainability of the Cocoa Industry: Cocoa Waste Mucilage Use to Produce Fermented Beverages. Case Study in Los Ríos Province*. <https://www.iieta.org/journals/ijstdp/paper/10.18280/ijstdp.170412>

zu Ermgassen, E. K. H. J., Bastos Lima, M. G., Bellfield, H., Dontenville, A., Gardner, T., Godar, J., Heilmayr, R., Indenbaum, R., dos Reis, T. N. P., Ribeiro, V., Abu, I.-O., Szantoi, Z., & Meyfroidt, P. (2022). Addressing indirect sourcing in zero deforestation commodity supply chains. *Science Advances*, 8(17). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn3132>

## 11 Anexos

### 11.1 Anexo A.

#### *Entrevista Cooperativas*

---

Guía de entrevista

---

Propósito Entrevista: Desarrollar un análisis situacional de los procesos logísticos y postcosecha a las empresas Coomprocar y Coopcacao que permita conocer su estado actual y posibles oportunidades de mejora

---

Lugar:

Entrevistado:

---

Día:

Hora:

---

Variable: Gestión de Proveedores

---

¿Cómo la organización realiza seguimiento a la oferta de  
Pregunta 1: materias primas (cosecha) disponible por sus proveedores,  
teniendo en cuenta los picos de cosecha?

---

Apuntes:

---

¿La organización cuenta con procedimiento de selección de  
Pregunta 2: proveedores de materias primas para la planta de beneficio  
postcosecha?

---

Apuntes:

---

---

Pregunta 3:           ¿Describa el proceso de compra de materias primas llevado a cabo en la organización?

---

Apuntes:

---

Pregunta 4:           ¿Cómo se lleva a cabo la comunicación en la organización con sus proveedores?

---

Apuntes:

---

Pregunta 5:           ¿Cuáles son los factores principales para decidir comprar materias primas a sus proveedores?

---

Variable: Características de Materias Primas

---

Pregunta 1:           ¿La organización, en que fases de procesamiento (fresco, fermentado, seco) recibe las materias primas?

---

Apuntes

---

Pregunta 2:           ¿Describe el método de selección y clasificación de materias primas adquiridas por parte de la organización?

---

Apuntes:

---

Pregunta 3:           ¿Cuáles son los periodos de escasez de materias primas en la organización?

---

Apuntes:

---

---

Pregunta 4: ¿Han sufrido retrasos o adición de operaciones como fermentación y secado por procesos de acondicionamiento de materias primas para los procesos de producción?

---

Apuntes:

---

Pregunta 5: ¿Cuáles son los requisitos que deben cumplir las materias primas para poder ingresar a la planta de transformación?

---

Apuntes:

---

Variable: Transporte de materias primas

---

Pregunta 1: ¿La organización cuenta con vehículos propios para llevar a cabo el proceso de abastecimiento de materias primas?

---

Apuntes:

---

Pregunta 2: ¿Cómo se identifican y vigilan los costos de transporte de materias primas en la organización?

---

Apuntes

---

Pregunta 3: ¿Cuáles son los parámetros que deben cumplir lo vehículos que transportan las materias primas hacia la planta?

---

Apuntes:

---

---

Pregunta 4: ¿Cuáles son los costos de transporte que mayor peso tienen dentro de su operación?

---

Apuntes:

---

Pregunta 5: ¿La cooperativa cuenta con información de ubicación, distancia y producción de cada uno de sus proveedores, garantizando el suministro de materias primas?

---

Apuntes:

---

Variable: Inventario de materias primas

---

Pregunta 1: ¿Cuál es la frecuencia de recepción para el suministro de materias primas?

---

Apuntes:

---

Pregunta 2: ¿Cuáles son los periodos de escasez de materias primas en la organización?

---

Apuntes:

---

Pregunta 3: ¿La organización cómo prevé las necesidades de materia prima en el tiempo?

---

Apuntes:

---

---

Pregunta 4:       ¿Cuál es la tasa de ingreso mínimo de materias primas para el funcionamiento de la planta?

---

Apuntes:

---

Pregunta 5:       ¿Existen protocolos de clasificación de materias primas para los procesos de producción en las plantas postcosecha, cuáles?

---

Apuntes:

---

Variable: Previsión de producción, materias primas y productos

---

Pregunta 1:       ¿La organización cómo pronostica la demanda de productos?

---

Apuntes:

---

Pregunta 2:       ¿La organización cuenta con plan agregado y plan maestro de producción y se cumple?

---

Apuntes

---

Pregunta 3:       ¿La organización cuenta con un plan de requerimiento de materiales?

---

Apuntes:

---

Pregunta 4:       ¿Cuáles son los porcentajes de participación de los productos elaborados en la planta?

---

Apuntes:

---

---

Pregunta 5: ¿Describa la secuencia de los procesos de transformación postcosecha que se llevan a cabo en la organización?

---

Variable: Tiempos y capacidad de producción

---

Pregunta 1: ¿Cuál es la capacidad de fermentación y secado en la cooperativa?

---

Apuntes:

---

Pregunta 2: ¿Cuáles son los procedimientos establecidos para la optimización de los procesos de producción?

---

Apuntes:

---

Pregunta 3: ¿La organización conoce los tiempos de ejecución de los procesos de fermentación y secado de cacao?

---

Apuntes:

---

Pregunta 4: ¿Cuál es el tiempo de fabricación de cada uno de sus productos producidos en la planta de transformación?

---

Apuntes:

---

Pregunta 5: ¿Cuál es la capacidad de almacenamiento (inventario) de materias primas en la planta de transformación postcosecha?

---

Apuntes:

---

## 11.2 Anexo B

### *Encuesta Productores de Cacao Arauca*

1. Nombre y apellido de productor
2. Municipio
3. Nombre de la vereda
4. Nombre de la finca
5. Coordenadas del predio
6. ¿Cuál es el área de cultivo de cacao (hectáreas)?
7. ¿Cuál es la cantidad estimada de mazorcas maduras totales? (cantidad de mazorcas maduras por árbol multiplicado por la cantidad de árboles totales)
8. En su más reciente cosecha, ¿cuántas mazorcas maduras cosechó?
9. En su más reciente cosecha, ¿cuál es el rendimiento estimado de número mazorcas maduras a latas de semilla en baba? ¿cuántas latas salen?
10. En su más reciente cosecha, ¿cuánto salió de kg de grano seco?
11. ¿Cuánto se demora en días el proceso de cosecha (bajar las mazorcas)?
12. Cantidad de horas transcurridas para los procesos de apertura de mazorcas, desgrane y alistamiento en los cajones fermentadores.