

PROPUESTA DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN  
DE RUTAS DE TRANSPORTE DE AGUACATE HASS PARA AGRICULTORES  
MINORISTAS MUNICIPIO DE TIMBÍO-CAUCA.

OSMAN MELÉNDEZ BERMÚDEZ



CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

POPAYÁN

2020

PROPUESTA DE UN MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PROGRAMACIÓN  
DE RUTAS DE TRANSPORTE DE AGUACATE HASS PARA AGRICULTORES  
MINORISTAS MUNICIPIO DE TIMBÍO-CAUCA.

OSMAN MELÉNDEZ BERMÚDEZ

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero industrial

Director de proyecto

M.S.c. HELMER PAZ OROZCO

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

POPAYÁN

2020

## **Nota de aceptación**

El director y los jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran satisfactorio.

---

M.Sc. Helmer Paz Orozco  
Director proyecto

---

P.hD. Gustavo Gatica  
Jurado

Popayán, 5 de marzo de 2020

**Dedicado a**

*A Dios y mi familia por su apoyo y amor en este proceso de aprendizaje.*

## **Agradecimientos**

*A Dios por bendecirme, orientado y brindado la oportunidad de lograr un sueño anhelado y un objetivo más en mi proyecto de vida.*

*A mi madre Margoth Bermúdez Castro, tíos Oscar Bermúdez Castro y Alcibíades Bermúdez Castro, en su esfuerzo y dedicación apoyaron en la formación como profesional y persona.*

*Al M.Sc. Helmer Paz Orozco como director del presente proyecto de grado, por dedicar tiempo en la orientación del desarrollo de la investigación, además de brindarme los elementos necesarios de su conocimiento para llevar a cabo la elaboración del proyecto.*

*A mi familia y docentes muchas gracias.*

## CONTENIDO

<b>Resumen</b> .....	11
<b>Introducción</b> .....	12
<b>1. Generalidades</b> .....	14
1.1. Formulación del problema .....	14
1.1.2. Pregunta de investigación .....	22
1.1.3. Delimitación .....	22
1.2. Justificación .....	25
1.3. Objetivos.....	26
1.3.1. Objetivo general .....	26
1.3.2. Objetivos específicos .....	26
<b>2. Marco referencial</b> .....	27
2.1. Marco teórico .....	27
2.1.1. Costos logísticos .....	27
2.1.2. Problema de Ruteo de Vehículos (VRP).....	32
2.1.3. Variantes del problema de ruteo de vehículos (VRP) .....	33
2.1.4. Métodos de solución VRP .....	34
2.1.4.1 Exactos .....	35
2.1.4.2. Heurísticas.....	35
2.1.4.3. Metaheurística .....	35
2.2. Revisión de literatura .....	35
2.3. Marco legal .....	40
2.4. Marco conceptual .....	41
2.4.1. Clasificación de carreteras.....	41
2.4.2. Costos de transporte.....	42
<b>3. Metodología</b> .....	43
3.1. Tipo y método de investigación.....	43
3.2. Instrumentos de recolección de datos.....	43
3.3. Procesamiento y sistematización de datos .....	44

3.4. Proceso metodológico .....	44
<b>4. Desarrollo de la investigación.....</b>	<b>47</b>
4.1. Cadena productiva de aguacate en Colombia .....	47
4.1.1. Cadena de Suministro de aguacate .....	48
4.1.2. Producción, área sembrada y mercado de aguacate Hass .....	49
4.2. Trabajo de campo.....	51
4.2.1. Análisis de la investigación de campo.....	51
4.3. Modelo matemático .....	67
4.3.1. Selección del modelo matemático .....	68
4.3.2. Supuestos del modelo .....	68
4.3.3. Formulación matemática del modelo.....	69
4.3.4 Parametrización.....	73
<b>5. Resultados.....</b>	<b>85</b>
5.1. Tiempo computacional vs interacciones. ....	85
5.2. Codificación y análisis de las rutas generadas por GAMS .....	86
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>93</b>
<b>7. Trabajos futuros .....</b>	<b>96</b>
Bibliografía.....	97
Anexos .....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Índice desempeño logístico Colombia 2007-2018.....	15
Figura 2. Componentes del costo logístico final.....	16
Figura 3. Costo logístico por tamaño de empresa.....	16
Figura 4. Costo logístico por actividad económica.....	17
Figura 5. Costos logísticos por regiones.....	19
Figura 6. Composición sectorial del PIB Departamental.....	21
Figura 7. Ubicación geográfica Timbio-Cauca.....	24
Figura 8. Localización de los productores en el municipio de Timbio.....	24
Figura 9. Fases y actividades generadoras del costo logístico.....	28
Figura 10. Componentes de los costos de aprovisionamiento.....	28
Figura 11. Costos de administración de inventarios.....	29
Figura 12. Costos de transporte y distribución.....	30
Figura 13. Costos de administración logística.....	32
Figura 14. Representación gráfica del VRP.....	33
Figura 15. Métodos de solución VRP.....	34
Figura 16. Desarrollo metodológico.....	46
Figura 17. Variedades de aguacate en Colombia.....	48
Figura 18. Cadena de suministro aguacate.....	49
Figura 19. Dinámica de producción y área aguacate Hass.....	50
Figura 20. Mercado internacional.....	50
Figura 21. Herramientas del proceso de cosecha.....	52
Figura 22. Proceso de corte.....	53
Figura 23. Diagrama de flujo proceso productivo aguacate.....	54
Figura 24. Calendario de cosecha al año.....	55
Figura 25. Kilogramos cosechados.....	55
Figura 26. Comprador del aguacate.....	56
Figura 27. Porcentaje de kilogramos (Kg) de aguacate vendidos.....	57
Figura 28. Factor que afecta el aguacate.....	57

Figura 29. Propiedad del vehículo utilizado para el transporte .....	58
Figura 30. Capacidad del vehículo utilizado .....	59
Figura 31. Tipología del vehículo .....	59
Figura 32. Vehículo con carrocería de estacas .....	60
Figura 33. Tipo de carrocería .....	60
Figura 34. ¿Se utiliza toda la capacidad del vehículo? .....	61
Figura 35. ¿Comparte el vehículo con otros productores? .....	62
Figura 36. El productor asume el costo de transporte .....	62
Figura 37. ¿Existe algún centro de acopio municipal? .....	63
Figura 38. Vía Timbío-Urubamba 1 .....	65
Figura 39. Vía Urubamba 1-Sambony Alto .....	66
Figura 40. Vía Urubamba 1- Las piedras .....	66
Figura 41. Vía Cinco Días-Campo alegre .....	67
Figura 42. Vehículo configuración C2 .....	74
Figura 43. Configuración vehicular .....	75
Figura 44. Vía pavimentada .....	78
Figura 45. Vía terciaria en mal estado .....	79
Figura 46. Vía terciaria en regular estado .....	80
Figura 47. Perfil de elevación .....	81
Figura 48. Costo por peaje .....	83
Figura 49. Relación tiempo computacional vs interacciones .....	86
Figura 50. Estadísticas del modelo .....	87
Figura 51. Costos de transporte.....	89
Figura 52. Rentabilidad para el productor .....	90
Figura 53. Ruta número 1, secuencia C0-C1-C3-C4-C0 .....	90
Figura 54. Ruta número 2, secuencia C0-C5-C10-C0.....	91
Figura 55. Ruta número 3, secuencia C0-C8-C9-C0.....	91
Figura 56. Ruta número 4, secuencia C0-C2-C7-C0.....	92
Figura 57. Ruta número 5, secuencia C0-C6-C11-C0.....	92
Figura 58. Ubicación centro de acopio (C0).....	93

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de los costos logísticos por actividad .....	17
Tabla 2. Modos y medios de transporte .....	31
Tabla 3. Componentes de los costos de transporte .....	31
Tabla 4. Variantes del VRP.....	33
Tabla 5. Normatividad que regula el transporte en Colombia.....	40
Tabla 6. Características GPS Garmin Etrex Vista .....	44
Tabla 7. Tipo de vehículo contratado por cada agricultor.....	64
Tabla 8. Oferta en kilogramos de aguacate hass.....	74
Tabla 9. Capacidad de carga en toneladas según el tipo de vehículo.....	75
Tabla 10. Factor asociado al estado de la vía.....	76
Tabla 11. Parámetros de velocidad según el tipo de terreno .....	76
Tabla 12. Rendimiento kilómetros por galón .....	77
Tabla 13. Indicadores de costos variables de operación.....	84
Tabla 14. Indicador costo fijo .....	84
Tabla 15. Rutas generadas por GAMS .....	87
Tabla 16. Eficiencia de la capacidad de carga del vehículo utilizado .....	88

## Resumen

El sistema de transporte de carga por carretera representa un factor determinante en la economía de cualquier cadena de abastecimiento (industrial, comercial o de servicios). Con un apropiado manejo de los recursos de transporte incrementará la eficiencia y competitividad de una organización. Por tal razón, la investigación busca la adaptación de un modelo matemático utilizando como referente teórico el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) para la disminución de costos de transporte para un grupo de agricultores de aguacate Hass tipo exportación en el Municipio de Timbío Cauca.

Como novedad para el desarrollo de esta tesis fue formular un modelo matemático que permita minimizar los costos de ruteo teniendo en cuenta la asociación de factores específicos como el estado de la vía, topografía del terreno, tipología del vehículo, velocidad y consumo de combustible con el fin de establecer un costo total de transporte y acercar el modelo de ruteo a las condiciones rurales o contexto propio de la infraestructura vial de la zona de estudio. Para llevar a término la solución del modelo de optimización basado en VRP se formula con base en programación entera mixta y se resuelve mediante el solver CPLEX del software GAMS.

El resultado de esta investigación generó la creación de 5 rutas, con un costo total de transporte de USD 1546,80, obteniendo una reducción del 30% en comparación a los costos asumidos por los productores, generando un costo logístico promedio del 3,2% por kilogramo transportado y aumentando la rentabilidad del fruto vendido en la comercializadora en un 27% del costo vendido en las fincas. El modelo matemático se resuelve en un tiempo computacional de 66 minutos obteniendo una solución factible que permite minimizar los costos y brindar una solución de transporte a los agricultores del Municipio de Timbío.

**Palabras clave:** Alimento perecedero, GAMS, VRP, Programación entera mixta (MIP).

## **Introducción**

El trabajo de investigación presentado a continuación propone la formulación de un modelo de optimización para el sistema de transporte utilizado por los agricultores del Municipio de Timbío, debido al déficit en la ocupación de la capacidad de carga del camión y los altos costos logísticos que representa la movilización de aguacate Hass hacia el mercado de interés.

Para dar solución a la problemática presentada y como interés de este trabajo radica en cómo adaptar un Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) para la disminución de costos de transporte y modelar matemáticamente parámetros que asignen un costo por kilómetro recorrido en vías terciarias y secundarias. Presentado como novedad la asociación de factores como el estado de la vía, topografía, tipología del vehículo, entre otros; con el objetivo de acercar el modelo propuesto a condiciones rurales y obtener un costo total de transporte de acuerdo a la infraestructura vial de la zona.

Además, como trabajo de investigación persigue analizar los resultados obtenidos a través de un modelo matemático de optimización en contraste a los encontrados en el desarrollo del trabajo, para identificar la eficiencia de proponer y utilizar este tipo de métodos para la toma de decisiones. Dado que, utilizar un sistema de transporte eficiente y económico contribuye a una mayor competitividad en el mercado [1].

Teniendo en cuenta que uno de los costos logísticos más representativos en Cadena de Suministro Agroalimentarias (CSA) y Empresariales (SCM) es el costo de transporte, siendo así que autores referentes como S. Chopra y R. Ballou y estudios realizados por el Council of Supply Chain Management Professionals asumen que en promedio este costo está entre el 7% y 10% del costo final del producto [1], [2], [3] y para sector agropecuario en Colombia está por encima del promedio nacional del 13.5% [4].

El trabajo de investigación está organizado en 6 capítulos, descritos de la siguiente manera:

El primer capítulo contiene las generalidades de la investigación, en cuanto al planteamiento del problema, delimitación, justificación y objetivos.

El segundo capítulo describe los elementos teóricos referentes a la revisión bibliográfica, marco teórico y referente para el desarrollo de la investigación.

El tercer capítulo presenta el diseño metodológico utilizado describiendo tipo y método de investigación, instrumentos de recolección de datos y procedimiento para llevar a término el proyecto.

El cuarto capítulo contiene el desarrollo de la investigación, dando a conocer aspectos de la cadena productiva, trabajo de campo realizado y formulación del modelo matemático propuesto.

El quinto capítulo presenta los resultados obtenidos en cuanto al número de rutas que satisface la recolección de aguacate, los costos de transporte generados y una evaluación del modelo considerando el tiempo computacional para obtener una solución óptima.

Finalmente, en el sexto capítulo se presenta las conclusiones, acontecimientos y trabajos futuros que se derivan del presente proyecto.

## Capítulo 1

### 1. Generalidades

#### 1.1. Formulación del problema

El sistema de transporte es uno de los elementos más significativos para la mayoría de las empresas, además de ser uno de los factores más influyentes dentro de la cadena de suministro<sup>1</sup> para cumplir con la satisfacción del cliente [2]. Sin embargo, el costo generado en la distribución de productos o servicios por este sector es uno de los más altos. Por tal motivo, una disminución de los costos de transporte constituiría un beneficio [5]

El transporte automotor de carga terrestre en Latinoamérica mueve el 70% de las mercancías nacionales de la región [6], pero presenta los costos logísticos más altos comparado con regiones pertenecientes a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), siendo así que en América Latina y el Caribe los costos logísticos admiten entre el 18% y 35% del valor del producto, y representa entre el 16% y 26% del Producto Interno Bruto (PIB), en contraste con los países de la OCDE donde los costos logísticos relacionados con el producto están en el 8% y el 9% con relación al PIB [7].

Es por ello que analizando el Índice de Desempeño Logístico (LPI)<sup>2</sup> del Banco Mundial, en el 2018 donde público su versión más reciente de los países más competitivos en tendencias logísticas se observó que Chile tiene el mejor

---

<sup>1</sup> Son todas las actividades para preparar y distribuir un bien o producto, con el objetivo de satisfacer una necesidad de un cliente. Los actores que participan en la cadena de abastecimiento son el fabricante, los proveedores, los transportistas, almacenistas, vendedores al detalle y consumidores finales [2]. En otras palabras, es la planeación estratégica y logística de flujo de información, materias primas y dinero.

<sup>2</sup>Es una medida realizada por el Banco Mundial con el propósito de publicar y describir las tendencias globales en logística. El LPI data del año 2007 y fue diseñado para medir los elementos o eslabones de la cadena de abastecimiento, como el transporte y la facilidad de comercialización [80].

desempeño logístico en Latinoamérica seguido por Panamá y México, a nivel mundial se destacan en los puestos 34, 38 y 51 respectivamente [8].

En cuanto a Colombia en la Figura 1 se puede observar que pasó del puesto 94 en el año 2016 al puesto 58 en el 2018 de 163 países evaluados [8], aumentando su ranking en 36 puestos a nivel mundial.

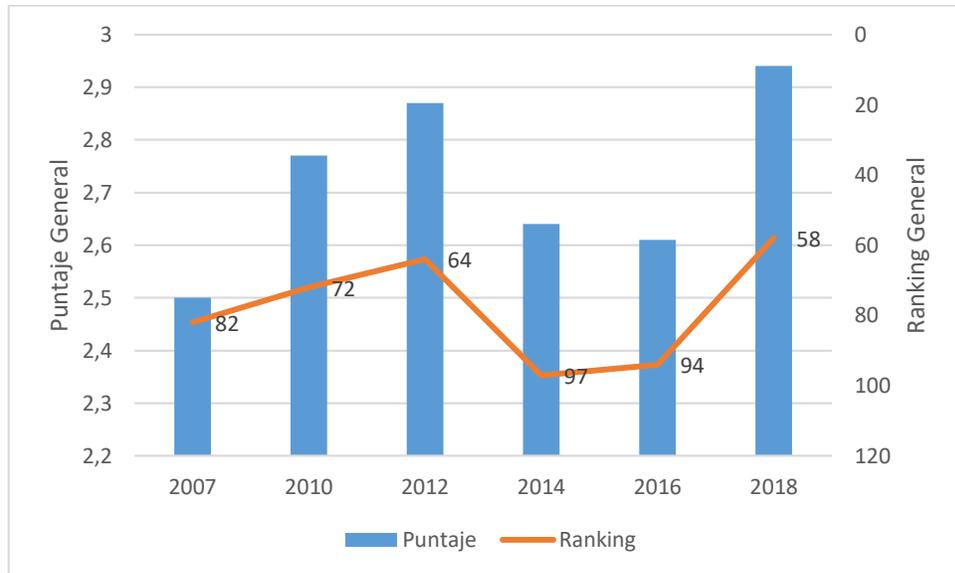


Figura 1. Índice desempeño logístico Colombia 2007-2018

Fuente: adaptado de [8]

Dentro de este contexto y refiriéndose al costo logístico<sup>3</sup> en Colombia, es un costo medido por cuatro componentes observados en la Figura 2, almacenamiento, transporte, administrativos, servicios al cliente y otros servicios, donde el costo más representativo es almacenamiento con el 46,5% y el transporte con 35,2% sobre el costo logístico final [4].

<sup>3</sup> Se refiere a la suma de los costos originados por el flujo y almacenamiento de mercancías desde los proveedores hasta los consumidores finales. En el costo final se incluyen; los costos de abastecimiento, almacenamiento, transporte-distribución y personal involucrado [81].

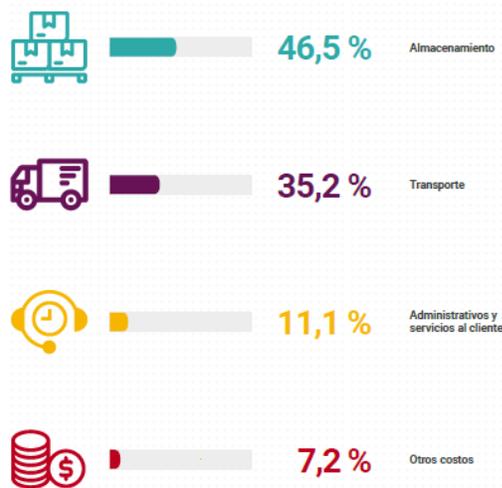


Figura 2. Componentes del costo logístico final

Fuente: adaptado de [4]

Sin embargo, cabe mencionar que los costos logísticos no son iguales para todo tipo de empresa o actividad económica. En la Figura 3 se identificó las microempresas con el costo logístico como porcentaje de las ventas más alto con 24,1%, superior al promedio nacional del 13,5% y por actividad económica en la Figura 4 los sectores que representan los costos logísticos más elevados son construcción y comercio, seguido del sector agropecuario en el tercer lugar con un 12,8%. Minería e industria presentan los costos más bajos.

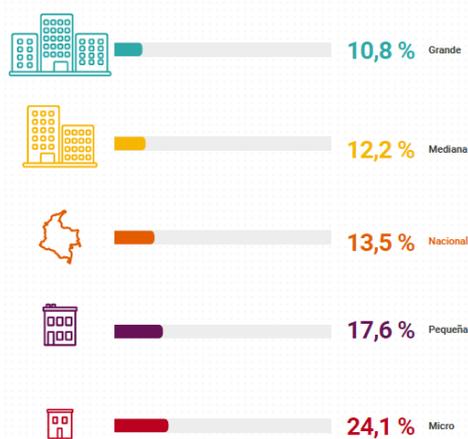


Figura 3. Costo logístico por tamaño de empresa

Fuente: adaptado de [4]

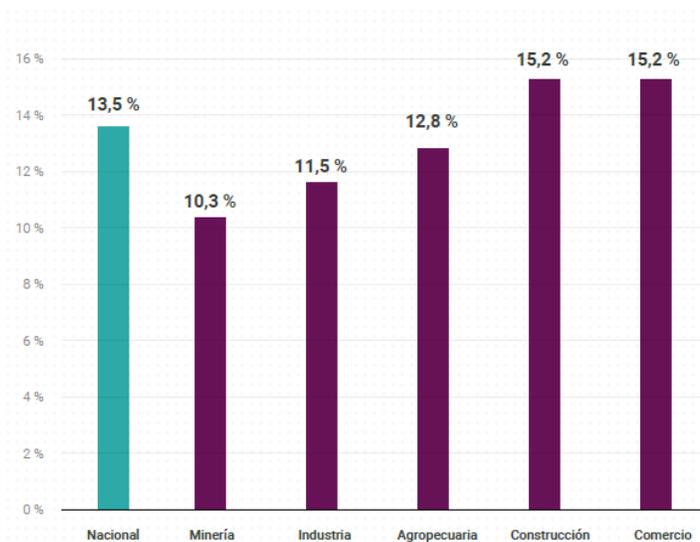


Figura 4. Costo logístico por actividad económica

Fuente: adaptado de [4]

Pero al dividir los costos por actividad económica se puede observar en la Tabla 1 que el costo que tiene mayor magnitud es el transporte, llegando a superar el promedio nacional en las actividades de minería e industria [4]. El sector agropecuario es la tercera actividad que tiene el porcentaje más alto en transporte y la primera en costos de administración y servicios al cliente con el 33,3% y 27,7% respectivamente.

Tabla 1. Componentes de los costos logísticos por actividad

Actividad económica	Almacenamiento	Transporte	Administrativo y servicio al cliente	Otros costos
Nacional	46,50%	35,20%	11,10%	7,20%
Minería	8,80%	46,30%	0,10%	44,80%
Industria	28,60%	46,20%	14,60%	10,60%
Agropecuaria	35,90%	33,30%	27,70%	3,10%
Construcción	77%	13%	8%	2%
Comercio	64%	25,90%	6,80%	3,30%

Fuente: elaboración propia a partir de [4]

Actualmente la cadena de abastecimiento es uno de los temas más importantes en cualquier organización [9] y una de las más estudiadas en cuanto a distribución de mercancías, debido que los costos de transporte se encuentran entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales [1], siendo así que para Colombia el costo logístico final representa el 13,5% como porcentaje de las ventas [4]. Por ejemplo, si un artículo tiene un valor de 16,92 USD en el mercado, el costo logístico fue de 2,28 USD, es por esto que el objetivo de analizar el servicio de transporte es mejorar la eficiencia y la disminución de costos.

Ahora bien, al considerar a nivel nacional el costo logístico es del 13,5% sobre las ventas, a nivel regional se puede encontrar que este porcentaje es superado por algunos Departamentos. Es por ello que según la encuesta nacional de logística [4] el Departamento del Cauca tiene 10,3 puntos porcentuales superior al promedio nacional, siendo así que el costo logístico como porcentaje de las ventas es del 23,8%. Así mismo, junto con los Departamentos de las regiones de Orinoquia, Caribe Occidental y Caribe Central representan los costos logísticos más elevados.

Por lo tanto, de 14 regiones del país, se infiere de la Figura 5 que nueve presentan un costo logístico superior al nacional.

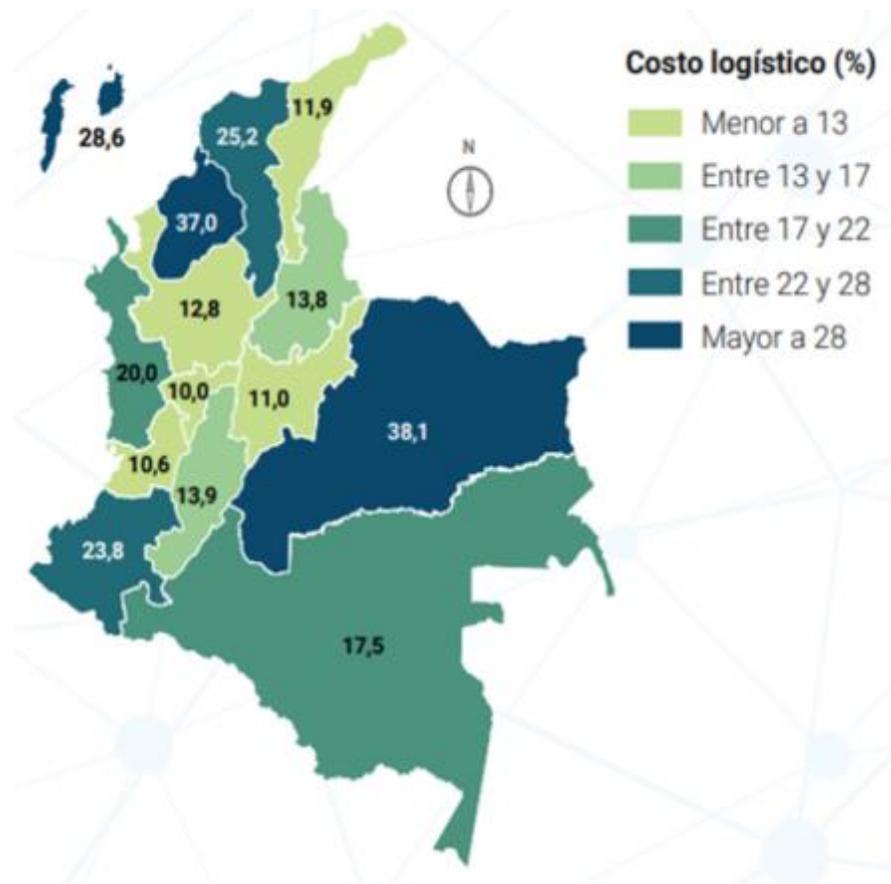


Figura 5. Costos logísticos por regiones.

Fuente: adaptado de [4]

Pero al pensar en las cadenas de suministro para productos agropecuarios o cadenas agroalimentarias, refiriéndose a las fases que van desde la producción a la transformación, comercialización, distribución y consumo [10]; eslabones fuera de contextos urbanos, los estudios relacionados con sistemas de transporte para la recolección de carga en zonas rurales son deficientes. Según [11] la seguridad alimentaria en la planeación de una Cadena de Suministro Agroalimentaria (CSA) no ha sido investigada por la Academia, lo cual evidencia la necesidad de centrar esfuerzos en análisis y diseño de redes en CSA, desde los eslabones de producción y distribución que logren mejorar la calidad, la seguridad de los alimentos y la satisfacción del cliente.

Igualmente, en la revisión del estado del arte y tal como aduce [12] la investigación en cadenas de suministro agroalimentarias son recientes y escasas, en temas de optimización y simulación. Así mismo [13], también concluye el déficit de los estudios relacionados con los procesos logísticos en áreas rurales para disminuir los costos de operación y establece la necesidad de aportar con investigaciones al mejoramiento de las cadenas de abastecimiento agrícolas.

De acuerdo a lo anterior, se encuentra que el campo investigativo en logística de distribución o recolección de productos agrícolas en zonas rurales presenta la oportunidad de realizar estudios de optimización que permitan a productores de zonas campesinas mejorar el desempeño a nivel logístico. Más aun cuando los productores trabajan bajo principios de economía de escala, al disminuir el precio de los productos los recarga los costos de transporte y disminuye más sus ingresos [14].

Por esta razón y analizando que el sector agropecuario es una de las actividades económicas que presenta los costos más elevados de transporte como componente del costo logístico final y que para el 2017 fue una de las actividades que más influyó en el Producto Interno Bruto (PIB) del país aportando el 4,9% por encima de la economía nacional del 1,8% y que para el primer trimestre del 2018 mantuvo un crecimiento positivo del 2% [15]. Le hace evidente al agro colombiano es una de las actividades que aporta al crecimiento de la economía del país, pero una de las economías que presenta un déficit a nivel técnico y logístico en pequeños productores, debido que una de las desventajas para aumentar su competitividad son los altos costos logísticos [16].

Por consiguiente, al observar que el agro es un sector importante y teniendo en cuenta que el Departamento del Cauca es una región tradicionalmente agrícola con una participación de este sector del 12,9 % al Producto Interno Bruto (PIB) departamental observado en la Figura 6, hace que estudios relacionados con esta actividad ayude a promover la competitividad en las economías campesinas.

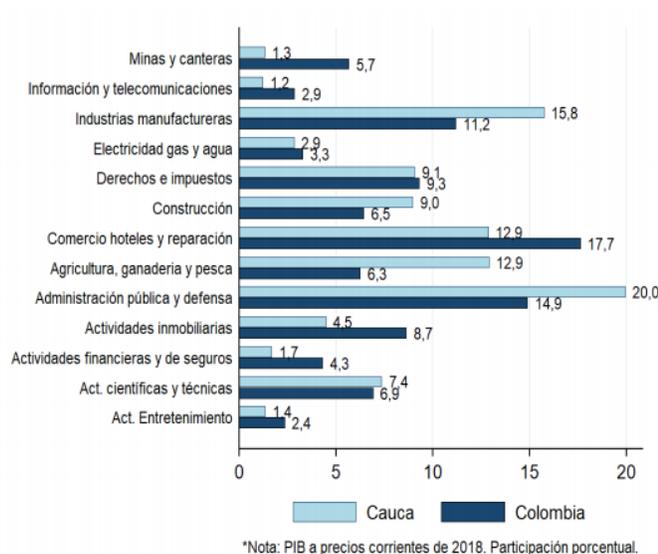


Figura 6. Composición sectorial del PIB Departamental

Fuente: adaptado de [17]

Considerando que el 74% del territorio del municipio de Timbío tiene áreas agrícolas y que una de las dificultades es la comercialización de los productos [18], la optimización de costos y mejoramiento en la toma de decisiones en el servicio de transporte para alcanzar un beneficio económico más rentable sea de interés para los productores. Por esta razón, la presente investigación se desarrollará en el marco de optimizar un proceso logístico de recolección de aguacate Hass tipo exportación para el Municipio de Timbío, una cadena productiva que está en crecimiento debido a la importancia comercial a nivel regional e internacional [19].

Teniendo en cuenta lo anterior, el proyecto de investigación pretende adaptar un modelo de optimización basado en el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) para seleccionar un conjunto de rutas de vehículos entre el centro de acopio de exportación Pacific Fruits S.A.S, ubicado en Rozo Palmira, Departamento del Valle del Cauca y las fincas productoras con el objetivo de minimizar el costo de transporte para recolectar la fruta y proveer un apropiado nivel de servicio utilizando el mínimo de recursos.

Una operación logística que para los productores se hace difícil conocer o seleccionar una ruta que maximice la capacidad del vehículo y minimice costos debido a las largas distancias entre una unidad productiva y otra. Además, uno de los aportes de este trabajo de investigación es optimizar la función objetivo de acuerdo a los costos de operación vehicular (costos variables y fijos) del **Ministerio de Transporte** para calcular el precio final de una ruta según el tipo de terreno (plano, montañoso u ondulado), considerando factores específicos como distancias reales entre las unidades productivas, estado de la vía, tipología del vehículo utilizado y la velocidad teniendo en cuenta la topografía de la zona rural. Permitiendo con estas condiciones acercar el modelo de ruteo a una realidad del contexto propio de la infraestructura vial de la zona de estudio.

La investigación presenta este aporte de un sistema de costo por kilómetro vehicular recorrido no estándar, debido que algunas investigaciones en modelos de ruteo de vehículos muchas veces no tienen en cuenta y sólo se limitan a optimizar el costo por kilómetro recorrido entre  $C_{ij}$  (origen y destino) mediante distancias no reales o euclidianas [20].

### **1.1.2. Pregunta de investigación**

¿Cómo adaptar un modelo de optimización basado en el problema de ruteo de vehículos para minimizar los costos de transporte en condiciones rurales?

### **1.1.3. Delimitación**

- **Temática:** El trabajo de investigación incluye distintos conocimientos de ingeniería industrial, sin embargo, se destaca la investigación de operaciones a través de la modelación matemática para la toma de decisiones y aspectos teóricos de logística.

- **Espacial:** El proyecto de investigación se desarrolló en el Municipio de Timbío Departamento del Cauca, específicamente con 11 productores de aguacate Hass tipo exportación ubicados en la zona rural de las veredas Urubamba, Las piedras, San Pedrito, Sambony Alto, Campo Alegre, Hato Viejo, y Cinco días.

Timbío está ubicado en la parte suroccidental de la República de Colombia, sobre la vertiente occidental de la Cordillera Central con una extensión aproximadamente de 205 kilómetros cuadrados y una altura de 1850 metros sobre el nivel del mar. En cuanto a su economía se caracteriza por ser un sector agropecuario donde se destacan cadenas productivas como el café, ganado bovino y aguacate variedad Hass [18]. Según información del DANE para el año 2018 el Municipio tenía una población de 32.170 personas [21]. En la figura 7, se puede observar la ubicación geográfica, el cual limita por el sur con el Municipio de Rosas, por el occidente con el Municipio del Tambo, por el norte con el Municipio de Popayán y por el oriente con el Municipio de Sotará.

Por consiguiente, en la Figura 8 se puede observar la distribución de los productores localizados en cada una de las veredas mencionadas.

- **Temporal:** El proyecto se realizó en un tiempo de nueve (9) meses del año 2019.



## 1.2. Justificación

De acuerdo a estudios realizados se ha expuesto que una buena planeación de los métodos de distribución genera ahorros del 5% al 20% en los costos de transporte global, dado que los costos de transporte pueden llegar a representar de 10% a 20% del costo final de los productos o bienes [23].

Mejorar la eficiencia mediante la utilización máxima del equipo de transporte y la disminución de los costos logísticos de distribución es una tarea importante, debido que los porcentajes que representa el costo logístico final sobre un bien es demasiado alto. Es por esto, que el trabajo de investigación pretende utilizar técnicas de optimización matemática con el fin de reducir los costos de transporte mediante la programación de rutas, basadas en (VRP).

Según [2] el éxito de una cadena de abastecimiento sin importar el tipo, está vinculado al uso apropiado del transporte. Por esta razón y la necesidad de ser más competitivo en un sistema de transporte ha llevado desde la investigación de operaciones, el desarrollo de modelos de optimización que permita satisfacer el uso adecuado de recursos.

En este contexto, este proyecto busca adaptar un modelo de optimización basado en el problema de ruteo de vehículos para programar un conjunto de rutas de transporte que permita a los productores del Municipio de Timbío distribuir su producto a un menor costo hacia el centro de acopio de exportación (Pacific Fruits S.A.S) y hacer uso de forma más eficiente el sistema de transporte.

Mediante la aplicación de este tipo de modelos de optimización se pretende contribuir a otras investigaciones parámetros o condiciones que puedan ajustarse a casos prácticos en el desarrollo de modelos de transporte.

Finalmente, en la formación como ingeniero industrial el desarrollo de este trabajo de investigación permitirá adquirir y aplicar conocimientos teóricos-prácticos de la temática a trabajar.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Formular un modelo de optimización basado en el problema de ruteo de vehículos para el transporte de aguacate Hass tipo exportación en condiciones rurales del Municipio de Timbío-Cauca, que permita minimizar los costos de transporte.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Diagnosticar el sistema utilizado actualmente para el transporte de aguacate Hass entre las unidades productivas y el centro de acopio de exportación, identificando la infraestructura vial para la movilización de carga.
- Determinar las variables, parámetros y restricciones que caracterizan el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP).
- Adaptar un modelo de optimización que permita el análisis e identificación de los costos de operación vehicular en condiciones rurales.

## Capítulo 2

### 2. Marco referencial

Este capítulo presenta una revisión de literatura como sustento teórico para el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se describe un conjunto de conceptos y métodos que constituyen un fundamento teórico para la investigación. Luego se presenta de manera resumida algunas investigaciones donde se ha planteado y aplicado el Problema de Ruteo de Vehículos, un marco legal y finalmente un marco conceptual donde se expone alguna definiciones y parámetros que enmarca el modelo matemático propuesto.

#### 2.1. Marco teórico

##### 2.1.1. Costos logísticos

El progreso de las empresas y la necesidad de conquistar nuevos mercados a nivel mundial, ha implicado que la gestión logística tome valor en las últimas décadas [24] . Es por ello que los costos logísticos al constituirse como factor importante debido a la incidencia que tienen en la cadena de suministro, a partir de ellos sea posible evaluar la eficiencia de los recursos invertidos.

Según [25] los costos logísticos son la suma de todos los costos influyentes a las funciones de la empresa, que gestionan y controlan los flujos de materiales y flujos de información asociados desde el inicio de la cadena de suministro hasta el cliente final.

A causa de lo anterior, en la Figura 9 representa las fases y actividades que contribuyen al costo logístico final de producir o comercializar un bien.

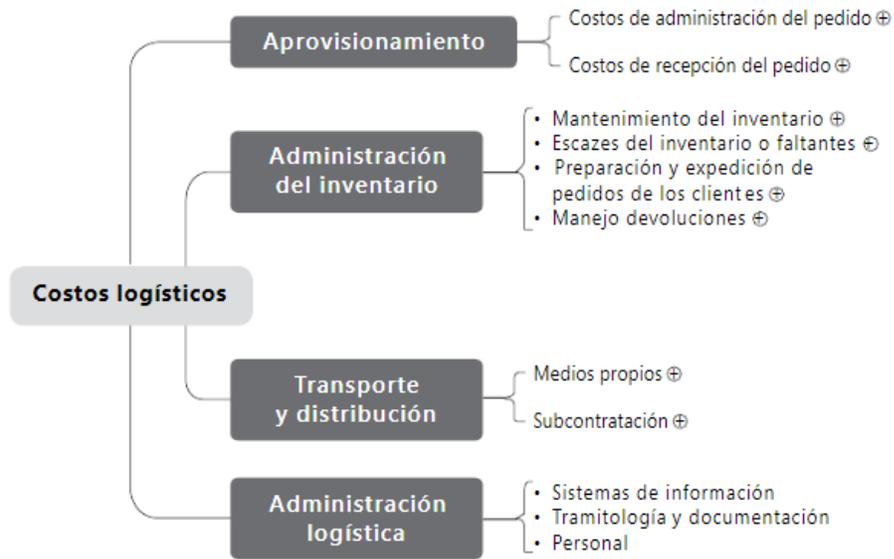


Figura 9. Fases y actividades generadoras del costo logístico

Fuente: adaptado de [24]

A partir de la Figura 9, a continuación, se describe cada costo logístico:

**Costos de aprovisionamiento:** representan el primer gasto de la cadena de abastecimiento, compuesto por todos los costos en que incide una organización en las actividades de suministro de las materias primas o insumos necesarios para la transformación o producción de los productos o servicios [24]. En la Figura 10, se presenta la taxonomía de este costo.



Figura 10. Componentes de los costos de aprovisionamiento

Fuente: adaptado de [24]

**Costos de administración de inventarios:** los costos que constituyen el rubro en aspectos de almacenamiento se pueden observar en la Figura 11. Según [1] los inventarios se definen como “acumulaciones de materia primas, provisiones, componentes, trabajo en proceso y producto terminado que aparecen en numerosos puntos a lo largo del canal de producción y de la logística de una empresa”.

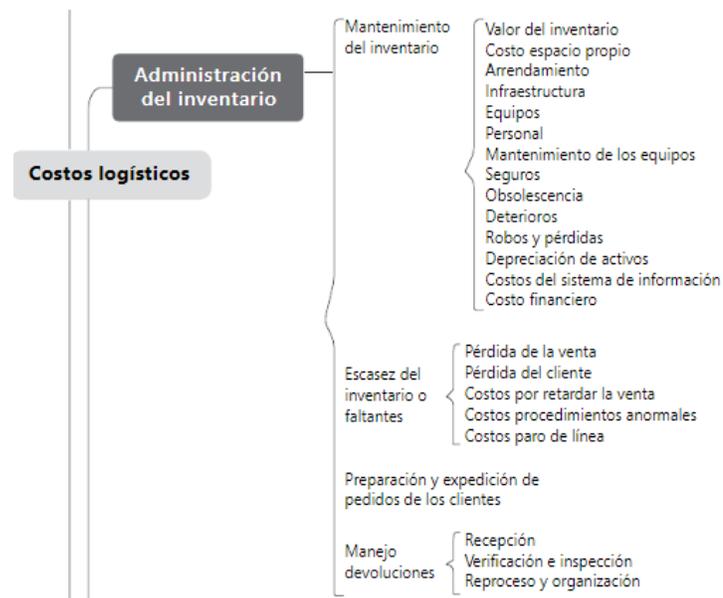


Figura 11. Costos de administración de inventarios

Fuente: adaptado de [24]

**Costos de transporte y distribución:** según [2] define el transporte como el movimiento de bienes o mercancías de un lugar a otro en su recorrido desde el inicio de la cadena de abastecimiento hasta el cliente final. Los costos de transporte y distribución representan el componente más notable de los costos logísticos totales de una empresa [24]

En la Figura 12 se describen los costos asociados al transporte y distribución, donde se puede observar que dependiendo de la flota de transporte se asume los costos, es decir, si la empresa cuenta con medios propios o subcontrata los medios para distribuir sus bienes.

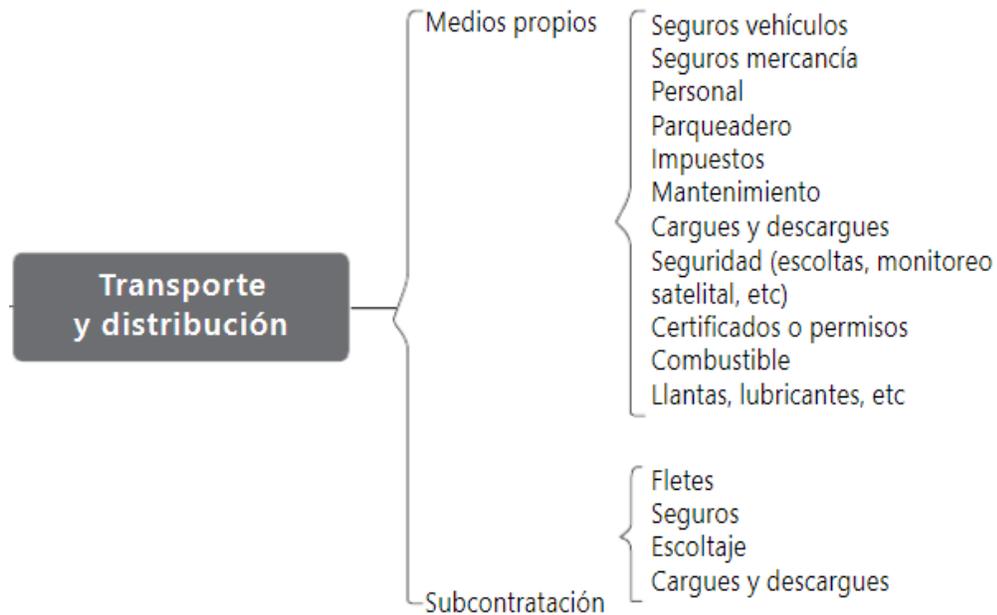


Figura 12. Costos de transporte y distribución

Fuente: adaptado de [24]

Pero al considerar su composición y estructura, conviene diferenciar dos tipos de transporte, que según [26] lo define así:

El transporte de mercancías entre fabricantes y almacenes distribuidores, denominado como "**Larga distancia**".

El transporte de mercancías desde los almacenes distribuidores hacia los consumidores, denominado "**transporte de distribución**".

Es por ello que, según el origen y destino de las mercancías, interactúan diversos modos y medios de transporte. estos se pueden observar en la Tabla 2.

Donde los **modos de transporte** son los sistemas para la movilización de mercancías a través del uso de alternativas como aéreo, marítimo, terrestre y ferroviario y los **medios de transporte** refiriéndose al uso de vehículos necesarios según el modo escogido [27]. Por último, existe el transporte multimodal, refiriéndose al uso de diferentes medios de transporte para movilizar las mercancías desde un punto geográfico a otro.

Tabla 2. Modos y medios de transporte

<b>Modos</b>	<b>Medios</b>
Marítimo	Buques graneleros, buques portacontenedores, buques petroleros, frigoríficos
Fluvial	Barcazas, buque remolcador
Aéreo	Aviones, helicópteros
Terrestre	Camiones sencillos o con semirremolque
Ferrovionario	Tren
Multimodal	Combinación de dos o más modos de transporte.

Fuente: elaborado a partir de [28]

Dado que los costos pueden variar dependiendo del modo y medio de transporte elegido, en el caso del transporte terrestre por camión objeto de la investigación, los costos de utilizar un vehículo se dividen en costos variables y fijos, como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Componentes de los costos de transporte

<b>Costos variables</b>	<b>Costos fijos</b>
Consumo de combustible	Seguros
Consumo de llantas	Salarios y prestaciones básicas
Consumo de filtros	Parqueadero
Mantenimiento y reparaciones	Impuestos de rodamiento
Lavado y engrase	Recuperación de capital
Imprevistos	

Fuente: elaborado a partir de [29]

**Costos de administración logística:** los flujos de información, materias primas y productos terminados que se extienden por las cadenas de abastecimiento cada vez más complicadas solicitan de una dirección que permita lograr los niveles de sincronización, disponibilidad, servicio y respuesta demandados. Por lo tanto se hace ineludible contar con recursos administrativos, tecnológicos y de talento humano que permitan realizar dicho propósito [24].

Los costos generados en este proceso se pueden observar en la Figura 13.



Figura 13. Costos de administración logística

Fuente: adaptado de [24]

### 2.1.2. Problema de Ruteo de Vehículos (VRP)

El origen del problema de ruteo de vehículos (VRP por sus siglas en inglés, Vehicle Routing Problem), data del año 1959 y fue introducido por Dantzig y Ramser, quienes realizaron por primera vez una aplicación y formulación matemática real de la entrega de gasolina. Cinco años después, Clarke y Wright propusieron el primer algoritmo que resulto efectivo para resolverlo, el popular algoritmo de ahorros. Es así que a partir de estos trabajos se dio comienzo a grandes investigaciones [30].

De acuerdo con [31] el VRP consiste en; dado un conjunto de clientes y centros de acopio o depósitos ubicados geográficamente y una flota de vehículos, encontrar un conjunto de rutas a un costo mínimo que comiencen y terminen en los depósitos centrales, de tal manera que atiendan la solicitud del servicio y se visiten a los clientes máximo una vez. En la Figura 14 se puede observar una representación de lo que constituye un Problema de Ruteo.

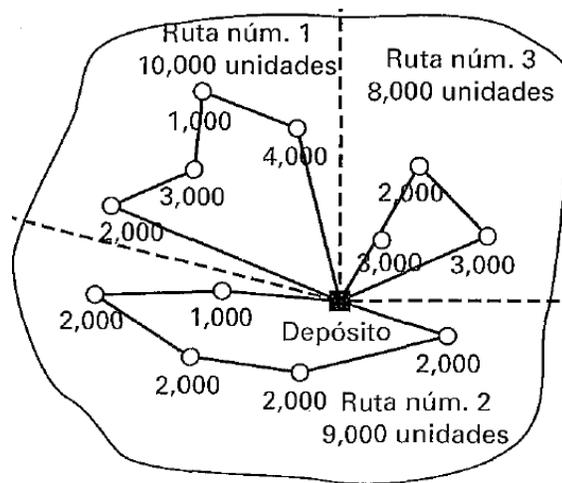


Figura 14. Representación gráfica del VRP

Fuente: adaptado de [1]

### 2.1.3. Variantes del problema de ruteo de vehículos (VRP)

En la práctica investigativa, diversas variantes del VRP han sido abordados con el objetivo de buscar soluciones en casos reales, de tal manera que se ajusten al transporte de distribución. Según [32] se ha identificado un conjunto de variaciones, expuestos en la Tabla 4.

Tabla 4. Variantes del VRP

Variante	Definición	Fuente
CVRP	Es la versión básica del VRP. Los clientes son servidos solo una vez; la demanda es conocida y determinística, la flota es homogénea y se considera un solo depósito. El objetivo es minimizar la flota de vehículos, el número de rutas y el costo total de la distribución.	Toth y Vigo (2002)
MDVRP	Existen diversos depósitos y los clientes deben ser asignados a uno de ellos. Asume las mismas restricciones del CVRP, pero en este caso cada depósito tiene una flota disponible. El objetivo es satisfacer la demanda, minimizando el número de vehículos y el costo total de distribución.	Montoya et al. (2014)

PVRP	A diferencia de los anteriores, asume entregas en un periodo de $t$ días. Es un problema típico en la recolección de basuras. Para cada día $t$ se conoce la demanda de los clientes $i$ . Cada cliente define la frecuencia de recepción de mercancía y es servido por un único vehículo, el cual puede o no regresar al depósito el mismo día. El objetivo es minimizar el tamaño de la flota y cumplir con la demanda.	Eksioglu et al. (2009)
SVRP	Se considera un tiempo de transporte aleatorio. En algunos casos se asignan probabilidades de disponibilidad de los clientes, ente otras variables aleatorias que se pueden presentar en el caso a modelar. Para cada una de esas situaciones surgen unas subvariantes del SVRP, como sucede con el VRP. De igual forma, los objetivos se siguen conservando y en su formulación se incluyen funciones de probabilidad.	Montoya et al. (2014)
VRPB	Un vehículo en ruta primero surte a los clientes y luego regresa para recoger mercancías dentro de la ruta (devoluciones). Las entregas y las devoluciones no deben superar la capacidad del vehículo; la demanda es determinística y la flota puede ser heterogénea. El objetivo es minimizar el tamaño de flota y los costos de distribución.	Tavakkoli et al. (2006)

Fuente: extraído de [32]

#### 2.1.4. Métodos de solución VRP

Debido que el problema de ruteo de vehículos se denomina NP-Hard por su complejidad computacional para obtener soluciones óptimas [31], las técnicas que se pueden observar en la Figura 15 son los métodos de solución más comunes.



Figura 15. Métodos de solución VRP

Fuente: adaptado de [33]

#### **2.1.4.1 Exactos**

Los métodos exactos garantizan una solución óptima, sin embargo, estos sólo pueden ser aplicados en instancias de tamaño pequeño con recomendaciones que no se superen los 50 nodos debido a la alta complejidad que representa obtener una solución en un tiempo computacional razonable [34] [35]. Los problemas VRP solucionados por este método están programación dinámica, programación lineal entera mixta (MIP) o métodos de búsqueda de árbol [36].

#### **2.1.4.2. Heurísticas**

Una heurística es un algoritmo que permite obtener una solución factible en menores tiempos de ejecución, pero sin asegurar la solución exacta. Dentro de este método se clasifican heurísticas constructivas, de mejora y técnicas de relajación [33].

#### **2.1.4.3. Metaheurística**

Una metaheurística es una estrategia heurística general para la solución de una gran variedad de problemas. Sin embargo, no existe un algoritmo confiable, y se caracterizan por realizar un procedimiento de búsqueda para encontrar soluciones de buena calidad [37]. Entre los algoritmos más reconocidos están: Búsqueda Tabú, Recocido Simulado, Algoritmo Genético y Colonia de Hormigas [33].

### **2.2. Revisión de literatura**

En esta sección se realiza una descripción resumida de investigaciones relacionadas con el Problema de Ruteo de Vehículos Capacitado (CVRP).

Titulo	Objetivo	Método	Resultados	Conclusiones
A logistic case, the capacited vehicle routing problem [37]	Determinar el mínimo número de vehículos a utilizar	El problema fue modelado en SALBP-1, utilizando el algoritmo COMSOAL para determinar el número de vehículos y la heurística R para definir las rutas.	Se obtiene que el número de vehículos a utilizar para atender 20 clientes con una demanda en total de 523 unidades son 6. Mediante la aplicación de la heurística R se definió 6 rutas disminuyendo los costos.	Al usar el método COMSOAL, se encontró que fue factible en la solución para encontrar el mínimo número de vehículos, debido que es un método para balancear líneas de ensamble.
Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases [38].	Resolver el problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad y flota homogénea (CVRP).	El método utilizado fue el algoritmo metaheurístico de dos fases: la primera fase diseña las rutas mediante procedimientos heurísticos y metaheurístico y la segunda planifica la flota abordando el problema mediante una analogía del problema de programación de máquinas paralelas idénticas.	Con el objetivo de evaluar el desempeño heurístico y metaheurístico se compararon con los métodos de optimización como algoritmos de ahorros, búsqueda tabú e inserción más próxima multipunto.  Por lo tanto, se reporta que el grado de optimización con la herramienta algorítmica propuesta, presento un resultado satisfactorio en lo que respecta a la distancia recorrida y al poco tiempo computacional de corrida para obtener resultados.	Con base a la metodología propuesta se encontró que respecto al tiempo computacional requerido fue menor de un minuto y un notable mejoramiento en la asignación de camiones, llegando a disminuir el costo fijo de la capacidad instalada de hasta en un 50%.

Titulo	Objetivo	Método	Resultados	Conclusiones
Solving capacitated vehicles routing problems using graph theory [39]	Estudiar y solucionar un CVRP en una empresa aplicando la herramienta informática de teoría de grafos.	Desarrollar el problema mediante el software grafos, teniendo en cuenta la matriz de distancia, generación de nodos, restricciones propias de la empresa como la capacidad del vehículo, días y semanas que se labora y velocidad promedio.	Los resultados obtenidos fue la reducción del número de vehículos utilizados, es decir que al inicio se tenían nueve (9) vehículos y con el modelo propuesto se utilizaron siete (7). Además, con el ahorro de los 2 vehículos se minimizo los costos fijos en: 1 400,89 USD	La aplicación de herramientas informáticas para el procesamiento de problemas de optimización permitió obtener ventajas competitivas y reducción de costos. Así mismo, cabe denotar que la obtención de resultados óptimos dependerá de establecer las restricciones adecuadas del problema.
Revisión y programación de modelos de optimización como una plataforma en GAMS-CPLEX para problemas de ruteo de vehículos [40]	Revisión de modelos de optimización; VRP, FSMVRP y HFVRPTW.	Corregir errores o complementar los modelos para poder codificarlos en el software GAMS.	De acuerdo a las modificaciones se logró mejorar el desempeño de los modelos, simplificando y agregando restricciones que no se contemplan en otras investigaciones.	Al solucionar los modelos con el software GAMS se obtuvieron resultados coherentes y óptimos. Así mismo se evidencio que el tiempo computacional depende del hardware del equipo de cómputo.
Stochastic mathematical model for vehicle routing in collecting perishable products [41]	Solucionar un problema de recogida, a través de un modelo que muestra el comportamiento estocástico en el suministro de flores.	Aborda el enfoque del diseño de ruta a Priori. Donde agrupa (clúster) puntos de recolección por cercanía geográfica, asignan vehículos a las rutas y generan rutas pre-diseñadas.	Se obtiene que, al comparar la situación actual con los resultados del modelo propuesto, este último obtiene mayores beneficios en; aprovechamiento de capacidad del vehículo, distancia recorrida y costos mínimos.	Con el modelo planteado se logró reducir los costos de transporte y aumentar la eficiencia del sistema, de manera que la capacidad de respuesta es mayor que la situación actual de la empresa.

Titulo	Objetivo	Método	Resultados	Conclusiones
Diseño de una red de distribución para un producto de consumo masivo, con enfoque de redes de valor [20]	Diseñar una red de distribución para la localización de centros de acopio y rutas de transporte hasta los municipios con acceso terrestre para la entrega de alimentos de consumo masivo en el territorio colombiano.	El problema se resuelve en tres fases, basado en la técnica "Dividir y Conquistar". La primera fase se utiliza el análisis multivariantes con la técnica de clúster en dos etapas para la definición del número de centros de distribución, en la segunda fase la ubicación de instalaciones por medio del método de centro de gravedad y en la tercera fase el trazado de rutas de transporte basado en la heurística del método de ahorros.	De acuerdo a la metodología, la primera fase reporta que los clientes se agruparon en 6 clúster, para luego en la segunda fase determinar el número de centros de acopio que atenderán la demanda de los municipios, obteniendo en total 25. Finalmente se obtuvieron 385 rutas para atender a los 995 municipios de Colombia.	Aporte principal de la investigación fue trabajar con distancias reales, debido que al calcular las distancias con el método de línea recta (distancia de Manhattan) la función objetivo o la optimización de los costos de transporte no tendrían significancia en la realidad.
Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada (CVRP) usando una técnica meta heurística [42]	Generar soluciones aproximadas para el CVRP usando la heurística de barrido de dos fases	La metodología de solución utilizada fue la heurística constructiva de barrido de dos fases, inicialmente se agrupan un conjunto de clientes que serán satisfechos por un camión dado y luego generar las rutas optimas a través del algoritmo genético de CHu-Beasley.	El algoritmo expuesto se evaluó para 4 tipos de instancias de diferentes autores, donde se calculó y se comparó el GAP promedio y el GAP mínimo. Se reporta la ventaja que tiene la metodología para dar solución aproximadas a instancias de Christofides y Eilon, con Gaps para instancias pequeñas entre 4% - 10% y para las grandes entre 5% y 12%.	La utilización de heurísticas constructivas generó soluciones en un tiempo de computo razonable y en resultados, debido a que se obtuvo la ruta optima de cada camión.

Titulo	Objetivo	Método	Resultados	Conclusiones
Modelo para la solución de un problema de ruteo de vehículos con capacidad y ventanas de tiempo, en el servicio de transporte de canje y correo bancario [43]	Utilizar un modelo para resolver el problema de ruteo de vehículos con capacidad y ventanas de tiempo (CVRPTW), con el fin de minimizar los recursos utilizados en el servicio de transporte.	El método utilizado para la solución del problema (CVRPTW) fue de dos fases; la primera la creación de clústeres solucionado con Visual Basic de Excel y la segunda la solución de rutas por cada uno de ellos, mediante el problema del agente viajero con ventanas de tiempo (TSPTW)	Los resultados fueron de 18 clústeres, definiendo al mismo tiempo 18 rutas, es decir, por cada uno de las agrupaciones se asigna una ruta para suplir la demanda de los 123 clientes. La optimización de las rutas fue de 2, en otras palabras, la situación inicial eran 20 rutas y con el modelo 18.	Se logró mejorar la eficiencia de las rutas con la solución propuesta, además de tener en cuenta que la aplicación de investigación de operaciones permite resolver diferentes problemas.
Optimization of vehicle routing in the distribution of products of a company in the city of Sincelejo-Colombia [44]	Aplicar el problema de ruteo de vehículos con flota homogénea, restricciones de capacidad y tiempo CVRP –HTFC en una empresa de distribución de materiales para la construcción.	El trabajo se solucionó a través del método exacto, codificado en el software GAMS, mediante el algoritmo de Branch and Cut.	La solución del modelo obtiene que, para atender los 115 clientes, se realicen 5 rutas. El tiempo computacional en el software fue de 3558,28 segundos. Finalmente se define que con esta solución la empresa reduce sus costos en el 51%, pasando de tener unos costos iniciales por semana de 47, 323 3 USD a 23, 067 9 USD.	Se evidencia que el software GAMS es capaz de obtener soluciones optimas en instancias de hasta 20 nodos.  Se logró disminuir los costos de transporte y ofrecer un método más eficiente en la distribución de los materiales de construcción.

### 2.3. Marco legal

En la Tabla 5, se consideran algunas normas vigentes en el transporte terrestre de carga en Colombia.

Tabla 5. Normatividad que regula el transporte en Colombia

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
Ley 105 del 30 diciembre de 1993.	Se establecen disposiciones básicas sobre el transporte, se redistribuyen competencias y recursos entre la nación y entidades territoriales, además se dictan otras disposiciones [45]
Resolución 777 de 1995	Por la cual se delega una función y se fija unos requisitos y procedimientos, para conceder o negar permisos para el transporte de carga extra pesada y extra dimensionada por las carreteras nacionales a cargo del Instituto Nacional de Vías [46].
Ley 336 de 1996, estatuto general de transporte	Tiene por objeto unificar los principios y criterios que servirán de fundamento para regular el transporte público aéreo, marítimo, fluvial, férreo, masivo y terrestre [47]
Decreto 173 de 2001	Por el cual reglamenta el servicio público de transporte automotor de carga [48]
Resolución 004100, diciembre 28 de 2004.	Por la cual se establecen los límites de pesos y dimensiones de los vehículos de transporte de carga para la operación normal por las carreteras del país [49].
Resolución 1782 de 2009	Por la cual modifica el artículo 8 de la resolución 4100 del 28 de diciembre de 2004 [50]
Resolución 001384, abril 20 de 2010.	Por la cual se reglamenta los límites de velocidad en las carreteras nacionales, departamentales, distritales y municipales [51].
Resolución 2498 de 2018	Modifica las regulaciones de control de peso a vehículos de transporte de carga rígida de dos ejes [52] .

## 2.4. Marco conceptual

### 2.4.1. Clasificación de carreteras

En Colombia según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS<sup>4</sup>) las carreteras se clasifican por su funcionalidad (primarias, secundarias y terciarias) y por el tipo de terreno (plano, ondulado o montañoso) [53].

#### Según su funcionalidad:

- **Vías primarias:** son aquellas carreteras con acceso a capitales Departamentales que cumplen la función básica de integración de las principales zonas de producción y consumo del país. Este tipo de vías son pavimentadas.
- **Vías secundarias:** son vías que unen las cabeceras municipales entre sí o que vienen de una cabecera municipal y conectan con una carretera principal. Las carreteras pueden ser pavimentadas o en tierra firme.
- **Vías terciarias:** vías de acceso que unen los municipios con sus veredas o veredas entre sí. Funcionan en afirmado.

#### Según el tipo de terreno:

- **Terreno plano:** vías con pendientes longitudinales normalmente menores a tres por ciento (3%). Permite a los vehículos de carga mantener aproximadamente la misma velocidad que vehículos livianos.
- **Terreno ondulado:** presentan pendientes longitudinales que predominan entre el tres y seis por ciento (3%-6%). Este tipo de terrenos obliga a los vehículos pesados a reducir sus velocidades significativamente.

---

<sup>4</sup> Es una agencia de la Rama Ejecutiva del Gobierno de Colombia a cargo de la asignación, regulación y supervisión de los contratos para la construcción de autopistas, carreteras y mantenimiento de las mismas [75].

- **Terreno montañoso:** pendientes longitudinales entre el seis y ocho por ciento (6%-8%). Requiere que vehículos de carga a transitar a velocidades sostenidas en rampa durante distancias considerables.
- **Terreno escarpado:** presenta pendientes longitudinales superiores a ocho por ciento (8%). Obliga a vehículos pesados a operar a menores velocidades sostenidas en rampa que en aquellas a las que opera en terreno montañoso.

#### 2.4.2. Costos de transporte

El **Ministerio de transporte** para asignar un costo por kilómetro recorrido tiene en cuenta los siguientes ítems [54]:

- **Estado de la vía:** la red vial se clasifica en buen, regular y mal estado dependiendo cada uno si esta pavimentada o en afirmado.
- **Tipología del vehículo:** de acuerdo a la resolución 4100 del 28 de diciembre de 2004 establece los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte por carretera para su operación normal en el país, clasificándolos según el número de ejes, sistema de propulsión y carrocería.
- **Parámetros de operación:** valores que miden los aspectos relacionados a la movilización de mercancías entre origen y destino, por ejemplo, tiempos logísticos de cargue y descargue o tiempos de movilización asociados a las distancias y velocidad promedio de la ruta.
- **Estructura de costos de operación vehicular:** un grupo de costos de transporte clasificados en costos variables como peajes, combustible, mantenimiento, entre otros y costos fijos asociados a seguros, prestaciones y salarios, impuestos y parqueaderos.

## Capítulo 3

### 3. Metodología

Este capítulo presenta la metodología y el procedimiento que orientó el cumplimiento de los objetivos para el proyecto de investigación. En primer lugar, se presenta los elementos del diseño metodológico correspondiente al tipo y método de investigación, instrumentos de recolección de datos y procesamiento de la información. Por consiguiente, se presenta las fases para llevar a cabo la investigación, la cual se desarrolló en tres etapas.

#### 3.1. Tipo y método de investigación

Para el proyecto se aplicó una investigación de carácter **descriptivo** con el objetivo de identificar la situación del problema y proponer una mejor solución, además que este tipo de investigación soporta técnicas principales como la encuesta, la observación y revisión bibliográfica [55], elementos importantes en el trabajo desarrollado. El método utilizado fue **cualitativo y cuantitativo**, puesto que la investigación se apoya en la recolección de información y análisis de los mismos.

#### 3.2. Instrumentos de recolección de datos

Para este componente se llevó a cabo un trabajo de campo, el cual tuvo como primer lugar el diseño de una encuesta (Ver anexo 1) donde se plantea un conjunto de preguntas para posteriormente, diligenciar este instrumento con los productores y generar información acerca del aguacate Hass, oferta del producto y condiciones del sistema de transporte.

En segundo lugar, la utilización de un GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para la localización de los productores y el software Google Earth para el reconocimiento de la infraestructura vial que conecta cada finca e identificar el tipo de terreno mediante la opción “perfil de elevación” y la distancia real para el diseño de la red de transporte, aclarando que se deja a un lado las distancias euclidianas.

En la Tabla 6 se describe las características del GPS utilizado en la investigación.

Finalmente se hace uso de fuentes primarias y secundarias para establecer una base teórica y desarrollar el trabajo de investigación.

Tabla 6. Características GPS Garmin Etrex Vista

	<b>Dimensiones</b>	10.7 x 5.6 x 3 cm
	<b>Peso</b>	156 g con baterías
	<b>Precisión de posición</b>	≤ 5 pies

Fuente: Adaptado de [56]

### 3.3. Procesamiento y sistematización de datos

Con el objetivo de analizar los datos obtenidos se aplicó estadística descriptiva para organizar, presentar y concluir la información observada, utilizando el programa Microsoft Excel.

### 3.4. Proceso metodológico

Como se mencionó anteriormente en la sección 3 de este capítulo, para llevar a cabo la investigación se planteó tres fases que orientan la investigación. Este procedimiento se puede observar en la Figura 16. A continuación, se describe cada una de las fases planteadas por cada objetivo.

- **Fase 1.** Esta etapa comprende un trabajo de campo para el reconocimiento del sistema de transporte utilizado por los productores para identificar los costos operacionales que conlleva la movilización de la carga hacia el mercado de interés. Este reconocimiento se realiza por medio de un cuestionario que presenta un conjunto de preguntas abiertas y de selección. Otro factor que se abordó en esta fase fue la recolección de información sobre la infraestructura vial, la georreferenciación de las unidades productivas e identificación del tipo de vías (primarias, secundarias o terciarias). Esto con el fin de recolectar información para la fase 3.
- **Fase 2.** En esta parte de la investigación se realizó una revisión de las extensiones o variantes del Problema de Ruteo de Vehículos (VRP) para identificar el tipo de VRP ajustado a las variables y condiciones del trabajo de estudio. Esta revisión permitió construir una revisión bibliográfica referente para la investigación descrita en la subsección 2.3 del capítulo 2, como también la identificación de los elementos del modelo de optimización basado en el VRP seleccionado y las técnicas de solución.
- **Fase 3.** Luego de la revisión de literatura y selección del VRP para la investigación, se eligió algunos artículos referentes para la construcción del modelo propuesto. Por consiguiente, se recopila información para la parametrización del modelo matemático y luego codificar o ingresar los datos en el software GAMS<sup>5</sup>. La construcción del modelo se realizó teniendo en cuenta las variables y parámetros analizados descritos en la subsección 4.3.4, así como la función objetivo propuesta para estimar los costos de operación vehicular en condiciones rurales.

---

<sup>5</sup> The General Algebraic Modeling System (GAMS) es un programa diseñado para modelar y solucionar problemas de optimización tanto lineales, no lineales y mixtos [83]

Finalmente, con el desarrollo de las fases anteriores que incluye el trabajo de campo, estudio de información y formulación del modelo, se llevó a cabo el análisis de resultados y conclusiones de la investigación.

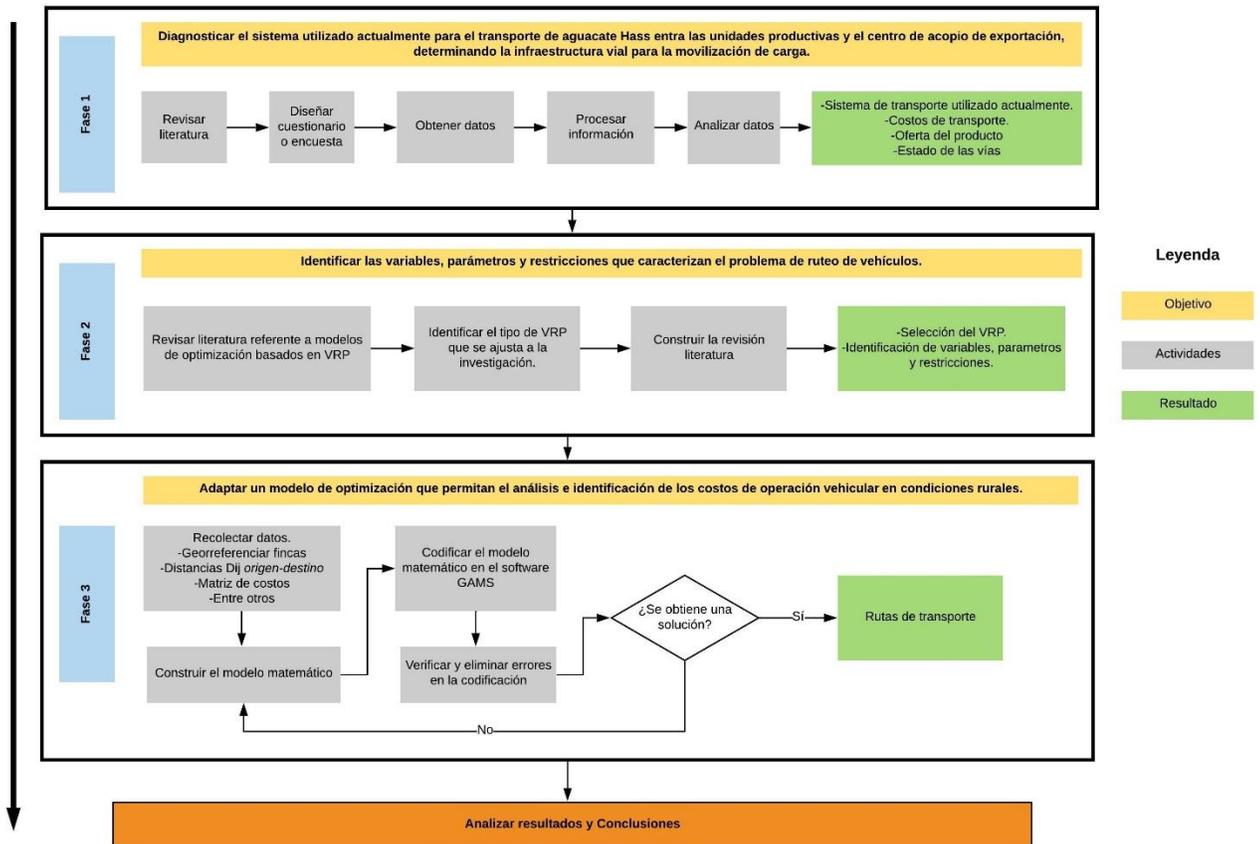


Figura 16. Desarrollo metodológico

Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo 4.**

### **4. Desarrollo de la investigación**

Este capítulo enmarca aspectos relacionados de la cadena productiva, proceso productivo del aguacate Hass realizados por los agricultores e información recopilada a través del trabajo de campo.

#### **4.1. Cadena productiva de aguacate en Colombia**

El cultivo de aguacate durante los últimos años ha ganado importancia socioeconómica debido a la dinámica comercial y social que representa al interior de cada uno de los eslabones de la cadena productiva, debido principalmente a su constante demanda de mano de obra, actividades relacionadas con el transporte, el mercadeo y la venta de la fruta, logrando posicionarse así como una de las cadenas productivas más fructíferas para el desarrollo del país y considerándose el oro verde de Colombia por su alto impacto económico en exportaciones con la variedad Hass [57] [58].

Además, como factor importante en la cadena se destaca la diversidad agroclimática del país, debido que el fruto se puede cultivar desde los 800 hasta los 2.500 metros sobre el nivel del mar (msnm), teniendo como ventaja que el país tiene diferentes regiones que cuentan con las condiciones para su desarrollo. En el país las variedades más representativas de aguacate se pueden observar en la Figura 17, destacándose el Hass.

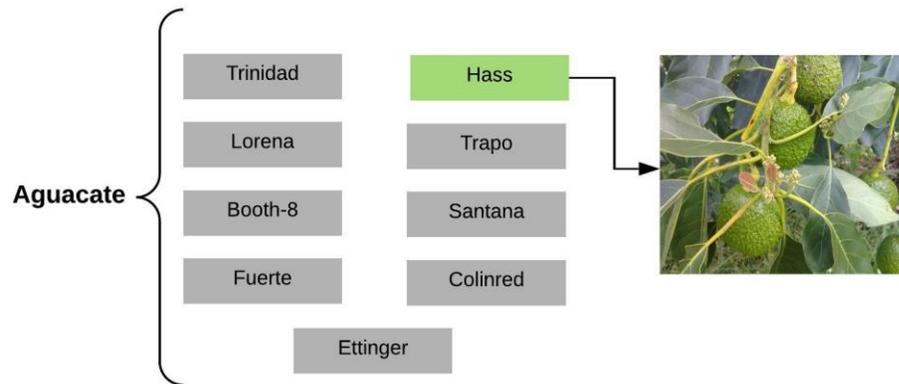


Figura 17. Variedades de aguacate en Colombia

Fuente: Elaboración propia a partir de [59]

#### 4.1.1. Cadena de Suministro de aguacate

La cadena productiva de aguacate en Colombia según el Ministerio de Agricultura está establecida por proveedores de insumos y de materia vegetal, productores, comercializadores, industrias de procesamiento, empresas exportadoras y centros de investigación e instituciones del gobierno nacional [59]. En la Figura 18 se realiza una caracterización resumida de los actores participes en la Cadena de Suministro (CS) de aguacate Hass, teniendo como principales eslabones producción, transformación, comercialización y consumo.

Teniendo en cuenta la composición de la cadena se puede analizar que los productores y el transporte son los actores que juegan un papel más importante dentro de la cadena, debido que en primer lugar el agricultor inicia el proceso para obtener un fruto de buena calidad y en segundo lugar el transporte cumple con la movilización del fruto entre eslabones.

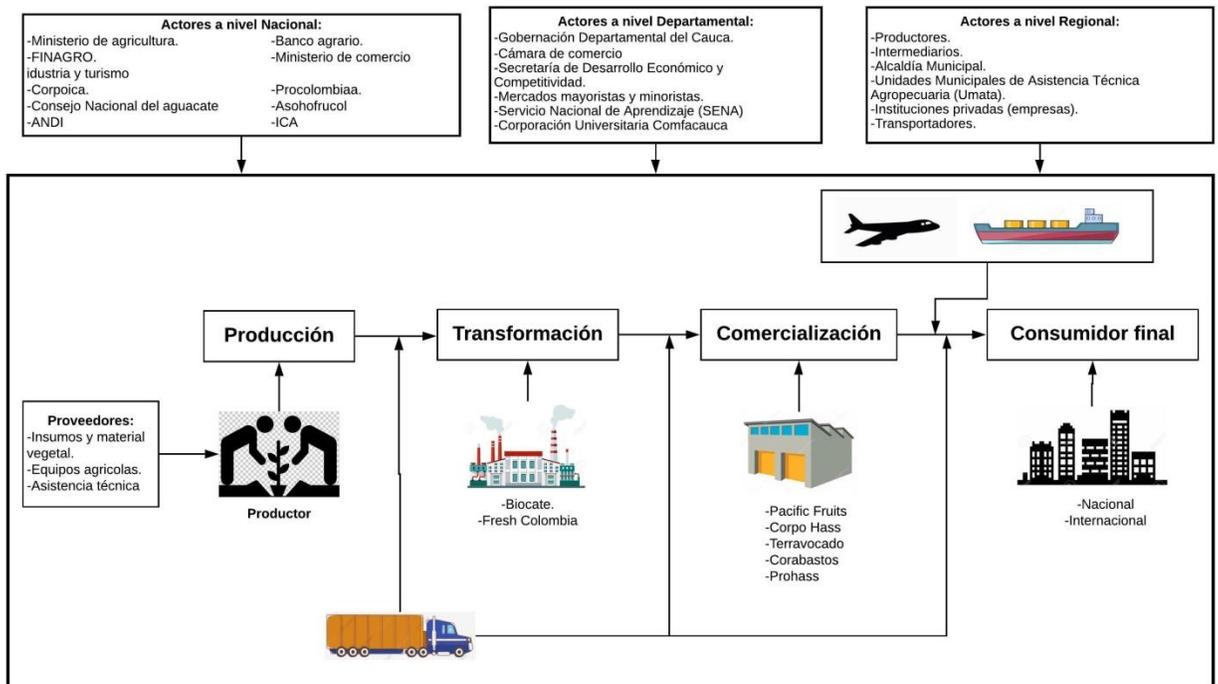


Figura 18. Cadena de suministro aguacate

Fuente: elaboración propia a partir [57], [60].

#### 4.1.2. Producción, área sembrada y mercado de aguacate Hass

Se estima que la variedad de aguacate Hass en el país corresponde al 25% del total de área sembrada con aproximadamente 19.221 hectáreas y una producción de 116.162 toneladas en 2018 [60]. Siendo así, que en los últimos cinco años esta variedad ha venido en aumento como se puede observar en la Figura 19, donde se puede evidenciar un crecimiento en producción del 21,74% para el año 2019 comparado con el año 2018.



Figura 19. Dinámica de producción y área aguacate Hass

Fuente: adaptado de [60]

Considerando el nivel de producción a nivel nacional, los principales departamentos que lideran este componente son el Eje Cafetero, Tolima, Cauca, Antioquia, Huila y Valle del Cauca [61] y a nivel Cauca el Municipio de Timbío se ubica como la cuarta región con mayor producción de esta variedad de aguacate [62].

Finalmente, a nivel mundial Colombia se ubica como el tercer país con mayor producción y con un mercado de exportación a ocho países [60], los cuales se pueden observar en la Figura 20.

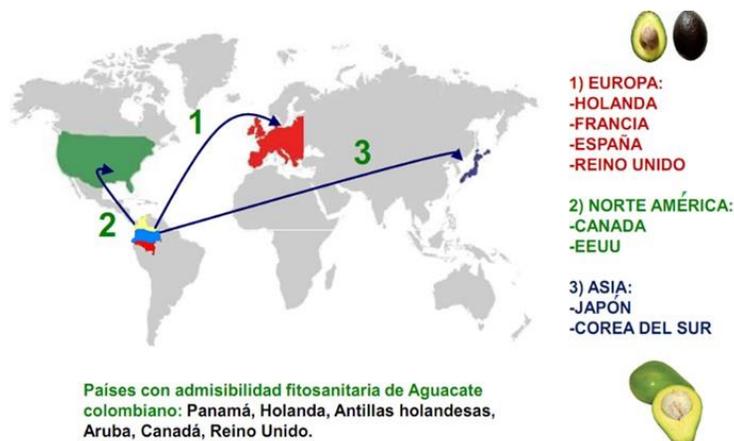


Figura 20. Mercado internacional

Fuente: adaptado de [57]

## **4.2. Trabajo de campo**

En este estudio se aplicó el diligenciamiento de las encuestas, la recolección de las coordenadas para determinar la ubicación de las unidades productivas y un reconocimiento de la infraestructura vial. Esta salida de campo se programó para adquirir información de la cadena productiva de aguacate Hass y los costos del transporte utilizado por los productores para responder al objetivo *“Diagnosticar el sistema utilizado actualmente para el transporte de aguacate Hass entre las unidades productivas y el centro de acopio de exportación, determinando la infraestructura vial para la movilización de carga”*.

La aplicación de las encuestas se realizó a once (11) productores de un total de 28 que tiene el Municipio de Timbío. Debido que la población objetivo para la investigación se dirigió a los productores que comercializan el fruto para exportación.

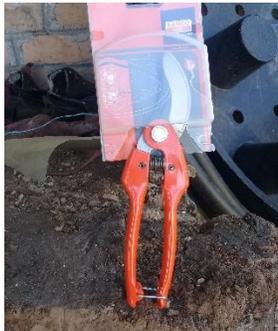
### **4.2.1. Análisis de la investigación de campo.**

En esta sección se describirá la información recolectada, teniendo en primer lugar los procesos de la cadena productiva y después el análisis de los datos obtenidos en la encuesta realizada.

#### **4.2.1.1 Proceso productivo aguacate Hass**

En este apartado se identificó que el nivel de producción depende de la tecnificación y cuidado con el cultivo, es decir, la aplicación de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), además de reconocer que por cada hectárea el máximo de árboles es de 204 y el rendimiento del cultivo al año aproximadamente es de 15000 kilogramos dependiendo del nivel de insumos que el agricultor utilice.

El proceso de cosecha inicia en primer lugar con una prueba fisiológica o de composición para determinar si el fruto está listo para ser recolectado. Después de esta prueba, el productor realiza la desinfección de la herramienta de corte, canastillas y recipientes para cada trabajador, este último se utiliza mientras el trabajador corta el fruto en el árbol para luego depositarlo en la canastilla. En la Figura 21 se puede observar los elementos utilizados en este proceso.



18(a)



18(b)



18(c)

Figura 21. Herramientas del proceso de cosecha

Fuente: Elaboración propia

En el proceso de cosecha uno de las características que determina la calidad del fruto es la manera de cortar, es decir, para evitar daños o maduración temprana los trabajadores deben realizar el corte en dos fases; primero se corta el pedúnculo a una distancia aproximada de siete (7) centímetros desde el inicio del aguacate hasta la rama del árbol donde se desprende el fruto, y por último se hace el segundo corte en el que se debe dejar aproximadamente unos 0,5 centímetros. En la Figura 22 se puede observar el proceso de corte.



Figura 22. Proceso de corte

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el proceso de recolección en el cultivo, el fruto es transportado en canastillas hasta la finca, lugar donde se selecciona el fruto por calibre<sup>6</sup> o para descartar frutos con enfermedades u otro factor no apto para el mercado de exportación. Esta decisión depende del comprador, puesto que algunas veces el intermediario o mayorista accede a la compra total de la cosecha.

Finalmente, el fruto es pesado y almacenado en un lugar adecuado de la finca con un tiempo aproximado de 48 ha 72 horas hasta ser transportado, debido que las condiciones en el lugar de acopio de la finca no son las óptimas para conservar el fruto.

En la Figura 23 se puede observar un flujograma donde se presenta las actividades desde el proceso de cosecha hasta el transporte.

---

<sup>6</sup> Se refiere a la determinación de tamaño a partir de las medidas de peso de cada fruto ICONTEC-END 098 [84]. Por ejemplo, un aguacate que pese entre 80-123 gramos el calibre asignado será 32. De esta forma, el precio por kilogramo depende de esta característica.

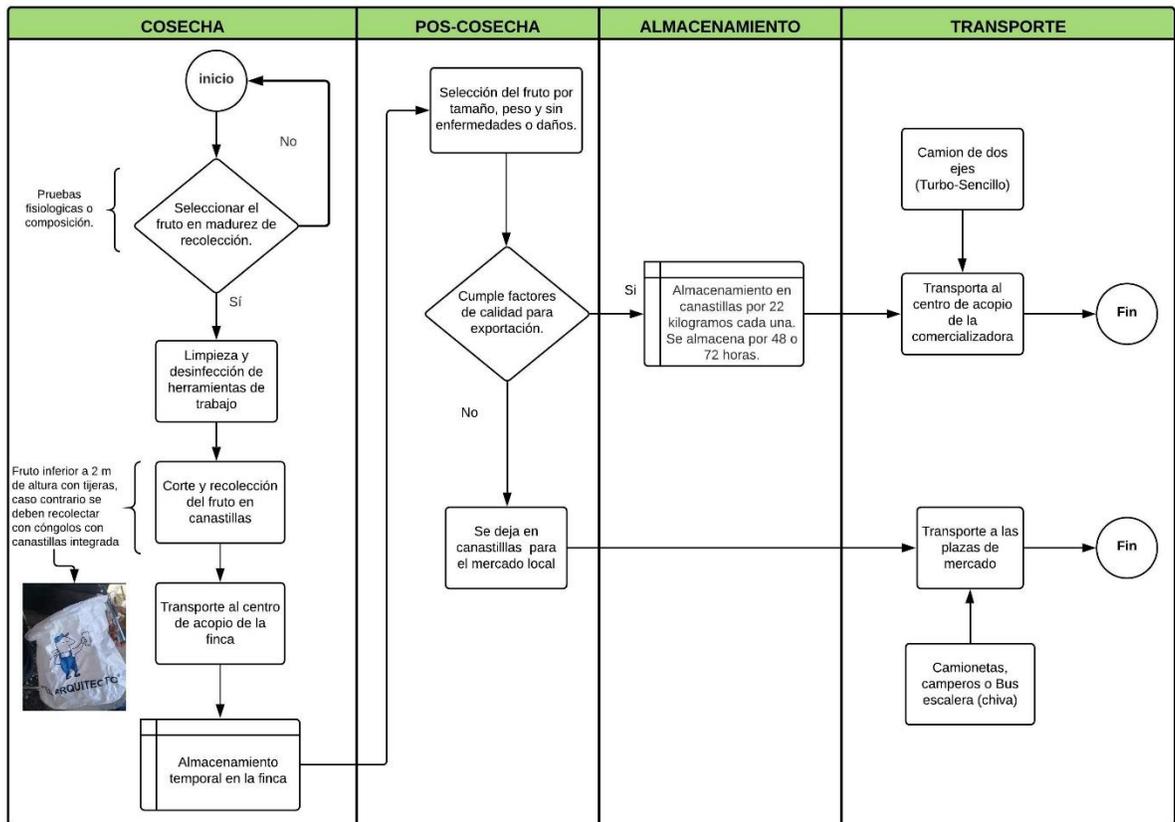


Figura 23. Diagrama de flujo proceso productivo aguacate

Fuente: adaptado de [63], [64]

#### 4.2.1.2. Tabulación de la encuesta

A continuación, se presenta los resultados de la encuesta realizada a cada uno de los productores, para identificar la información más relevante y realizar un diagnóstico de los resultados.

## 1. ¿El calendario de cosecha de la fruta es?

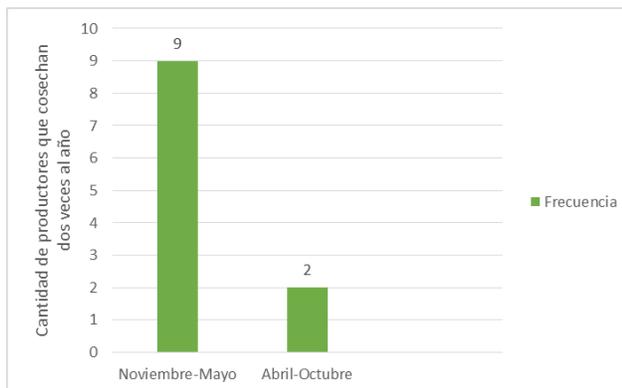


Figura 24. Calendario de cosecha al año

Fuente: elaboración propia

En la Figura 24 se puede observar que al año el cultivo de aguacate se cosecha dos veces, siendo así que nueve (9) de los productores realizan una cosecha en los meses de noviembre y mayo, y los otros dos agricultores en los meses de abril y octubre.

## 2. ¿Cuántos kilogramos de aguacate Hass cosechó en el último periodo?

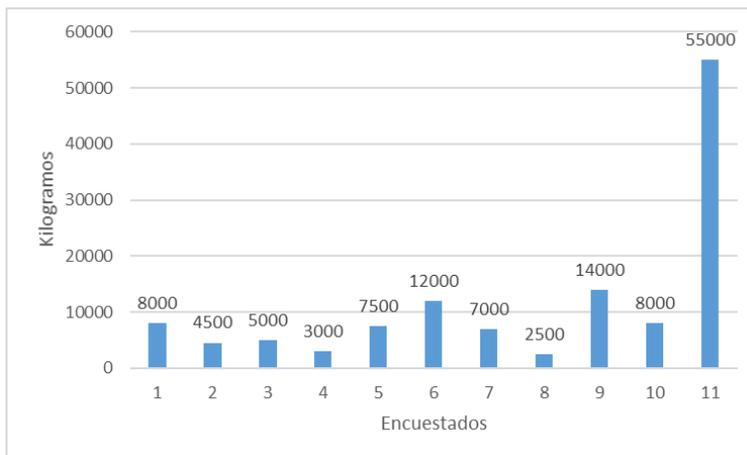


Figura 25. Kilogramos cosechados.

Fuente: elaboración propia

En la Figura 25 se presenta los kilogramos cosechados en el último periodo correspondiente al mes de noviembre de 2019, en el cual se puede observar una alta variación en la producción de aguacate por productor, evidenciando desde los 2.500 a 55.000 kilogramos por cosecha. En esta pregunta, al depender de las hectáreas que tiene el agricultor para el rendimiento del aguacate, se aclara que solamente uno de ellos tiene una extensión 12 hectáreas que corresponde al volumen de 55.000 kilogramos. Los demás tienen una extensión de una hectárea.

### 3. ¿A quiénes le vende el producto cosechado?

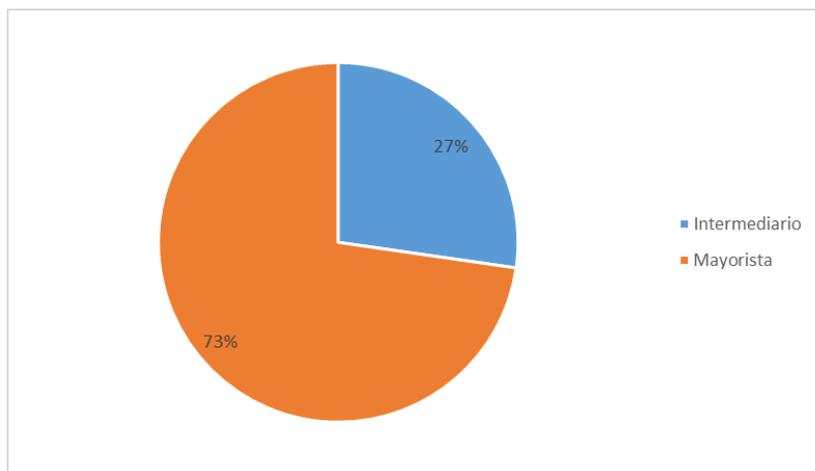


Figura 26. Comprador del aguacate

Fuente: elaboración propia

En la Figura 26 se observa que el 73% de los agricultores venden el producto a mercados mayoristas. En este punto se identificó que algunos productores venden el aguacate a comercializadoras como Pacific Fruits y Las Lajas ubicadas en el Departamento del Valle y otras del Eje cafetero o Antioquia.

#### 4. ¿De los kilogramos cosechados que cantidad exporta o se vende?

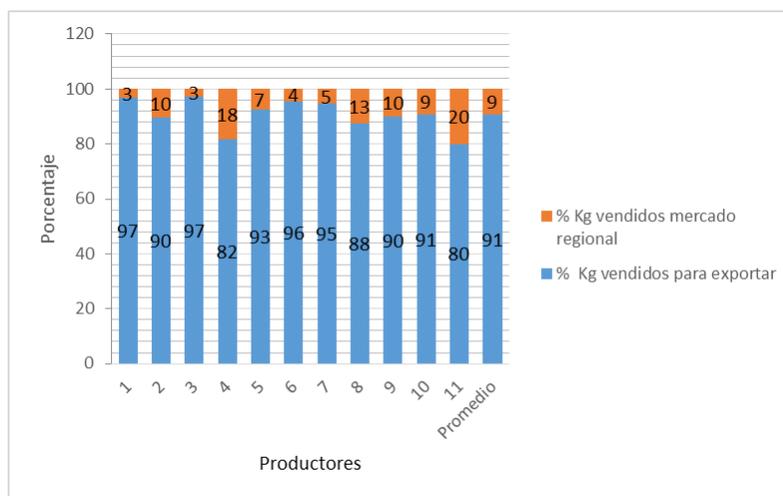


Figura 27. Porcentaje de kilogramos (Kg) de aguacate vendidos

Fuente: elaboración propia

En la Figura 27 se evidencia que en promedio el 91% de la cosecha de aguacate Hass de cada productor se dirige para consumo extranjero y el 9% para plazas de mercado o nacional.

#### 5. ¿Qué factor considera usted que afecta la calidad del aguacate

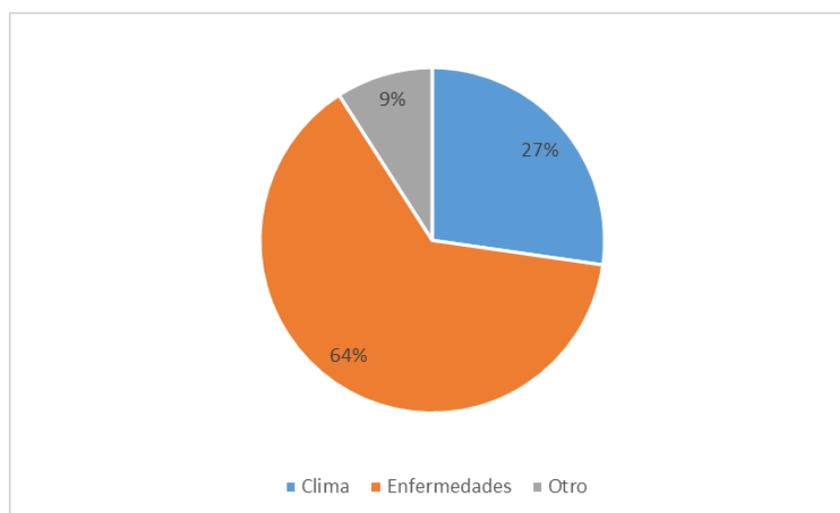


Figura 28. Factor que afecta el aguacate

Fuente: elaboración propia

En la Figura 28 se pudo identificar que el 64% de los agricultores consideran que el factor que más afecta la calidad del aguacate son las enfermedades o plagas y un 27% las condiciones climáticas como vientos fuertes que provoca la caída del fruto del árbol o sequias por los veranos.

**6. ¿El sistema de transporte para distribuir el aguacate hacia el mercado de interés es?**

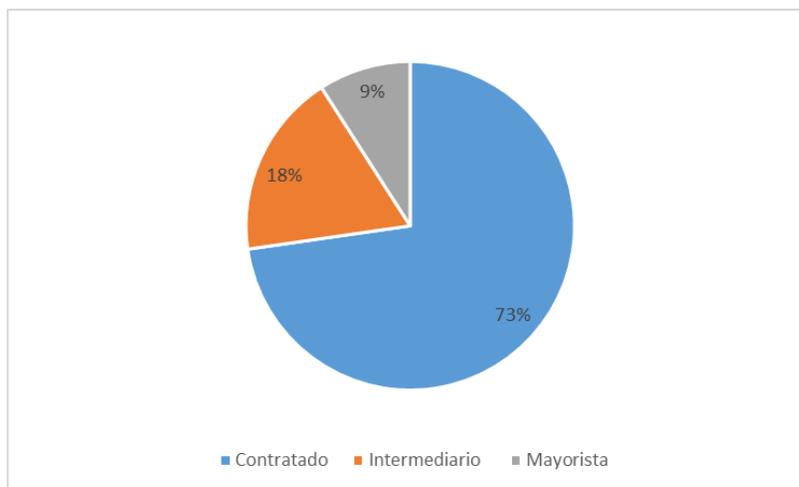


Figura 29. Propiedad del vehículo utilizado para el transporte

Fuente: elaboración propia

En la Figura 29 se puede observar que el 73% de los productores contrata un vehículo para transportar el fruto hacia el mercado de interés o comercializadora. El 18% y 9% contesta que el transporte es del intermediario o mayorista con la condición de pagar el kilogramo de aguacate un poco más económico o un descuento a la hora de realizar el pago por la cosecha vendida por ir hasta las unidades productivas. También se identificó que si los productores reúnen cierta cantidad de aguacate el comprador no cobra el flete del producto.

### 7. ¿Qué capacidad tiene el camión utilizado para el transporte?

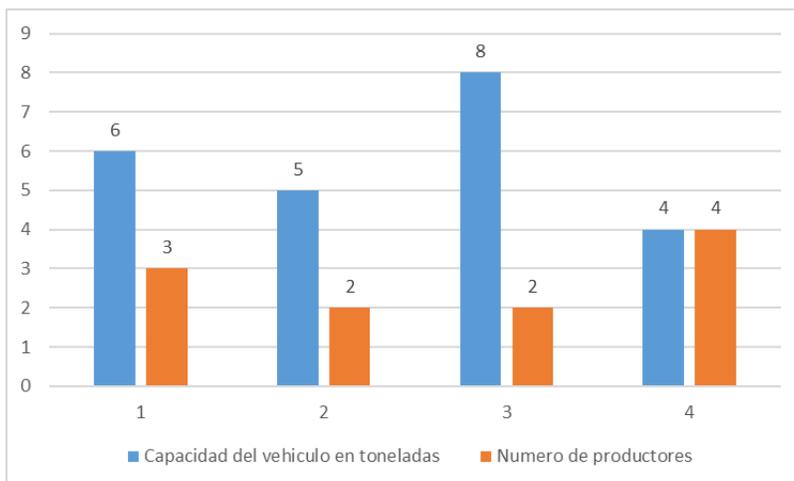


Figura 30. Capacidad del vehículo utilizado

Fuente: elaboración propia

En la Figura 30 se puede observar que cuatro (4) de los productores contratan un vehículo de cuatro (4) toneladas para movilizar el aguacate, otros tres productores contratan un vehículo de seis toneladas y finalmente dos agricultores de cinco y ocho toneladas.

### 8. ¿En qué tipo de vehículo transporte el producto?

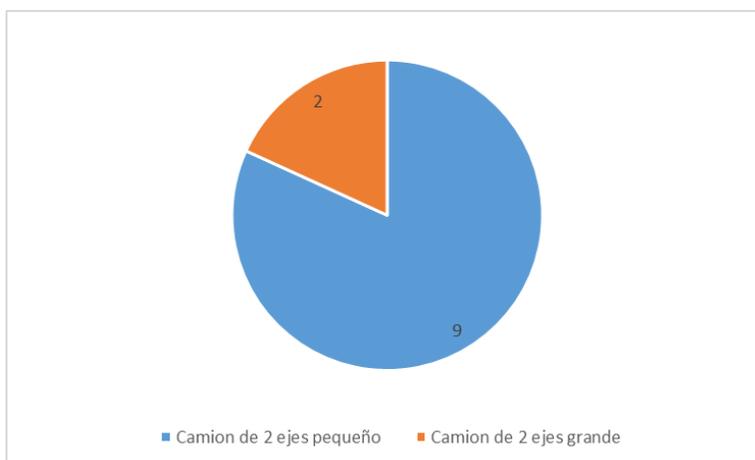


Figura 31. Tipología del vehículo

Fuente: elaboración propia

En la Figura 31 se observa que nueve de los productores contratan un vehículo de dos ejes pequeños o turbos y únicamente dos productores un vehículo de dos ejes grande o camiones. En este punto se tiene en cuenta que vehículos de tamaño más grande no acceden por la infraestructura o mal estado de la red vial de la zona.

En la Figura 32 se presenta el tipo de vehículo contratado por los agricultores.



Figura 32. Vehículo con carrocería de estacas

Fuente: adaptado de mercado libre

### 9. ¿Qué tipo de carrocería es?

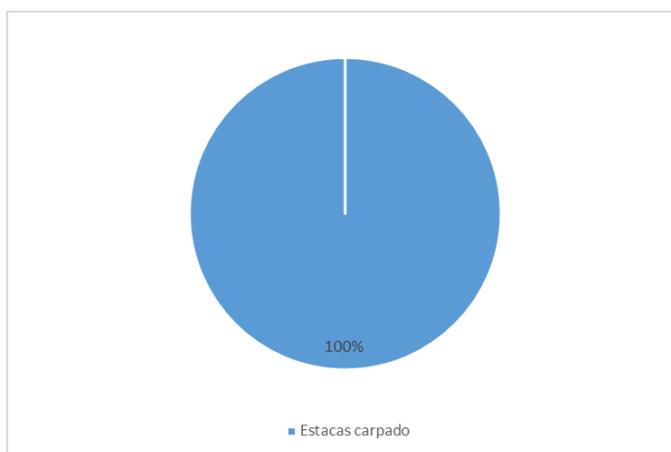


Figura 33. Tipo de carrocería

Fuente: elaboración propia

En la Figura 33 se puede observar que los vehículos contratados o utilizados para el transporte del aguacate son vehículos con carrocería de estacas y carpados para proteger el fruto.

**10. ¿Los kilogramos de aguacate que se transportan utilizan toda la capacidad del vehículo?**

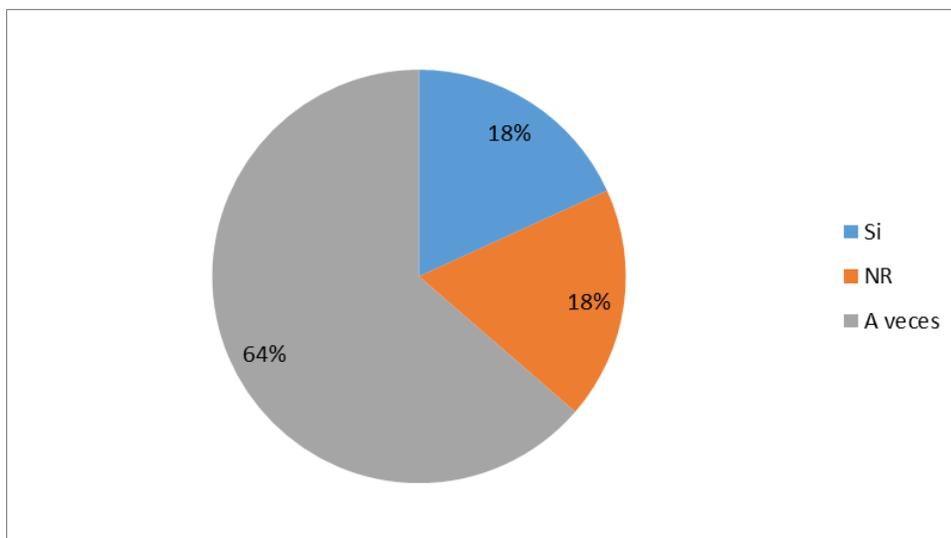


Figura 34. ¿Se utiliza toda la capacidad del vehículo?

Fuente: elaboración propia

En la Figura 34 se puede observar que el 64% de los agricultores transportan el fruto independientemente de tener el total de la capacidad del vehículo. Es decir, el productor realizaba el viaje en algunas cosechas con el 60% o 70% de la capacidad del vehículo. Los agricultores que respondieron no sabe no responde (NR) es porque algunas veces se vendía el fruto a un intermediario y el vehículo recogía más producto en otras fincas.

### 11. ¿Comparte el vehículo con otros productores?

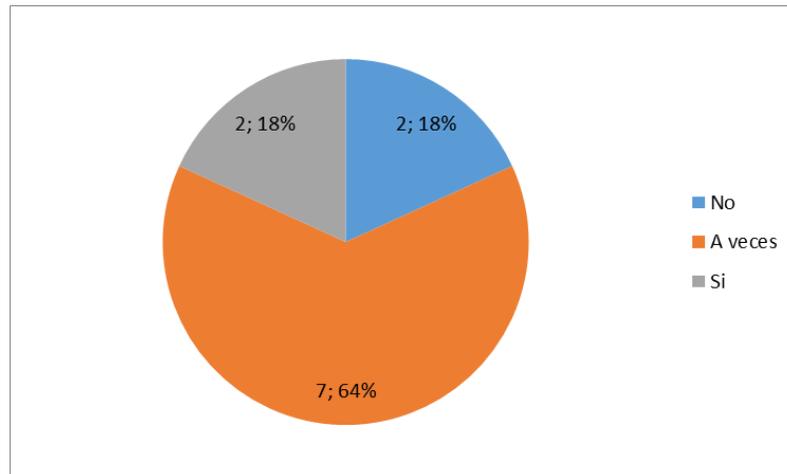


Figura 35. ¿Comparte el vehículo con otros productores?

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 35 se puede observar que el 64% de los encuestados respondieron que algunas veces se compartía el vehículo, de lo contrario los viajes se realizaba individualmente.

### 12. ¿Usted asume el costo de transporte del producto y qué valor tiene?

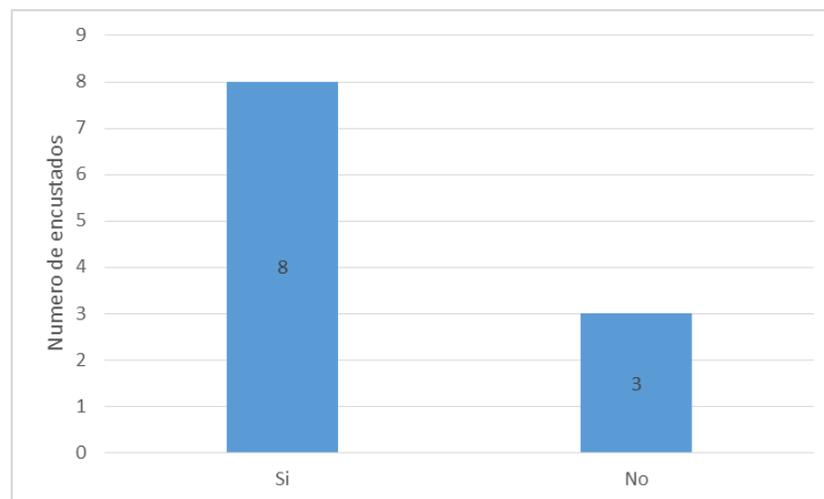


Figura 36. El productor asume el costo de transporte

Fuente. Elaboración propia

En la Figura 36 se puede observar que ocho (8) de los productores asumen el costo de transporte por movilizar el aguacate hacia al mercado de interés, representando un costo por viaje entre \$COP 500.000 y \$COP 1.200.000. El costo que asume depende de la capacidad del vehículo contratado y distancia entre la unidad productiva y el centro de acopio de exportación.

Cuando el agricultor no asume el costo es porque el comprador accede con su transporte hasta las fincas y entre ellos realizan un acuerdo que consiste en fijar un precio por el kilogramo de aguacate. El Kilógramo de aguacate con esta condición se paga entre los \$COP 2.400 y \$COP 3.000 pesos.

### 13. ¿Existe un centro de acopio de aguacate en el municipio o cerca?



Figura 37. ¿Existe algún centro de acopio municipal?

Fuente: elaboración propia

En la Figura 37 se observó que el 100% de los productores contestaron que no existía un centro de acopio municipal, evidenciando por parte de ellos la necesidad de uno para más facilidad de transportar el aguacate hasta un lugar más cercano y tener un lugar fijo para la compra de la fruta.

#### 4.2.1.3. Diagnóstico

Con la información recolectada se identificó que hay un déficit en la utilización de la capacidad del vehículo debido que el 64% de los productores transportan el producto independientemente si el vehículo completaba la carga o no, además de observar que el 73% contrata un vehículo asumiendo un costo por viaje entre \$COP 500.000 y \$COP 1.200.000, aclarando que el costo que asume el agricultor es por separado y muy pocas veces en asociación con otros productores.

En la Tabla 7 se puede observar la relación del vehículo que atiende o contrata el agricultor y el valor del flete que asume. Así el costo total de transporte que asumen los once productores es de \$COP 7.450.000

Tabla 7. Tipo de vehículo contratado por cada agricultor

Agricultor o encuestado	Capacidad del vehículo en toneladas	Costo de transporte \$COP
Nelson López	4	500.000
José Rubier	8*	1.200.000
Elver Morales		
Mireya Dorado	4	600.000
Nancy Hurtado	6	900.000
Armando Díaz	5	750.000
Ciro Gómez	4	700.000
Tulio Urbano	4	500.000
Eduardo Narváez	6	1.000.000
Mery Anaya	5	600.000
Felipe Angulo	6	700.000

\*El vehículo es contratado por los dos agricultores.

Respecto al nivel de acceso para los vehículos de carga a las unidades productivas según los productores y por las condiciones de las vías se determinó que el tipo de vehículo que accede no es mayor a dos ejes. En las Figuras 38-41 se puede observar el estado de las vías que conecta el Municipio con las veredas donde están ubicados los once agricultores, donde se puede evidenciar la dificultad que puede ocasionar al conductor de un vehículo de carga para mantener un eficiente nivel de manejo y en ocasiones una velocidad constante. Esto debido al zigzag que realizan los conductores para evitar pasar por los huecos o zanjas que se originan por las lluvias o falta de mantenimiento por parte de las autoridades Municipales. El porcentaje que representa las vías terciarias es del 53% del total de vías del Municipio [18].

En el anexo 2 se presenta evidencias del trabajo de campo para diligenciar las encuestas con los productores del Municipio de Timbío.



38(a)



38(b)

Figura 38. Vía Timbío-Urubamba 1

Fuente: elaboración propia



39(a)



39(b)

Figura 39. Vía Urubamba 1-Sambony Alto

Fuente: elaboración propia



40(a)



40(b)

Figura 40. Vía Urubamba 1- Las piedras

Fuente: elaboración propia



41(a)



41(b)

Figura 41. Vía Cinco Días-Campo alegre

Fuente: elaboración propia

### 4.3. Modelo matemático

Una vez identificado los costos de transporte y el déficit en la utilización de la capacidad del vehículo por parte de los productores por medio del trabajo de campo (Ver subsección 4.2.1.3 Diagnóstico), en esta sección se presenta el modelo matemático propuesto basado en el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP por sus siglas en inglés) con el objetivo de optimizar el sistema de transporte utilizado.

Con la información recolectada, se realizó una revisión de literatura en VRP con base en las variables de la problemática para adaptar el modelo matemático y poder tener un sustento teórico del modelo propuesto.

#### **4.3.1. Selección del modelo matemático**

El modelo matemático propuesto está basado en el Problema de Ruteo de Vehículos Capacitado (CVRP), donde el objetivo principal es minimizar los costos de transporte y atender la demanda de los clientes, para la investigación la producción de aguacate Hass realizada en un periodo determinado de los once productores.

#### **4.3.2. Supuestos del modelo**

A continuación, se describe los supuestos para la formulación del modelo. Algunos supuestos son propios del CVRP y otros son de la información recolectada en el trabajo de campo.

- Todos los vehículos que parten del centro de acopio deben regresar al mismo.
- La suma de la cantidad de aguacate y el peso de las canastillas no puede exceder la capacidad del vehículo.
- Los productores deben ser visitados una sola vez por el vehículo asignado.
- La matriz de costos es simétrica y está asociada a condiciones propias del tipo de terreno (ondulado, montañoso o plano).
- Todos los vehículos son de dos ejes con una capacidad de nueve (9) toneladas. Se seleccionó este tipo de vehículos porque los parámetros referentes para la investigación están determinados por el Ministerio de transporte.
- La oferta de aguacate está dada en kilogramos y se determinó a través del trabajo de campo, preguntando la cantidad aproximada que tiene el agricultor de cosechar en un periodo de dos días.
- El modelo propuesto solo puede ser utilizado para una planeación de rutas por cosecha.

### 4.3.3. Formulación matemática del modelo

En esta parte se presenta los índices, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones del modelo a partir de los supuestos enunciados y características de la investigación. A continuación, se describe las características que se tuvieron en cuenta en la investigación:

- *Función objetivo*: minimización de los costos operativos de ruteo de vehículos asociados a las condiciones del estado de la vía, consumo de combustible y tipo de terreno determinados por el Ministerio de transporte.
- *Parámetros*: es la información de los costos operativos de transporte desde los nodos origen hasta los nodos destino ( $C_{ij}$ ), velocidad promedio de la ruta según el tipo de terreno, entre otros.
- *Restricciones*: ecuaciones asociadas a la capacidad de los vehículos, eliminación de sub tours y propias del CVRP.

Para el desarrollo de la matriz de costos de transporte se toma como referencia los parámetros que tiene en cuenta el Ministerio de transporte (ver subsección 2.4.2). Los parámetros considerados para obtener la matriz de costos son costos de operación, tipología del vehículo, tipo de terreno, estado de la vía y velocidad consideraciones para acercar el costo por kilómetro a las vías del sector rural.

De esta forma el modelo matemático propuesto basado en el problema de Ruteo de Vehículos Capacitado (CVRP) para la recolección de aguacate Hass en el Municipio de Timbío tiene como base la programación lineal entera mixta y el modelo diseñado por Golden; quien utiliza la formulación de tres índices (The three-index vehicel flow) con base en dos variables binarias:  $X_{ijk}$  variable que indica cuando un vehículo  $k$  viaja directamente del cliente  $i$  al cliente  $j$ .  $Y_{ik}$  variable que determina si el cliente  $i$  es atendido por el vehículo  $k$  [66] [67].

Por último, para complementar el modelo propuesto y como sustento teórico se tiene en cuenta las siguientes referencias [30], [68], [36], [69], [70], [71], [63].

Por consiguiente, la formulación del modelo se describe de la siguiente manera:

### Conjuntos

$N = \{0, 1, 2, \dots, m\}$  Conjunto de todos los nodos (centro de acopio y agricultores).

$K = \{1, 2, \dots, n\}$  Conjunto de todos los vehículos.

$A = \{(i, j); i, j \in N, i \neq j\}$  Conjunto de todos los arcos.

### Parámetros e índices

$k = 1, \dots, n$  es el índice que representa el vehículo

$i = 1, \dots, m$  es el índice que representa los agricultores

$i = 0$  representa el centro de acopio (Pacific Fruits)

$O_i$  Oferta del agricultor  $i$ ,  $i = 1, \dots, m$  [Kg]

$Q_k$  Capacidad del vehículo  $k$ ,  $k = 1, \dots, n$  [Kg]

$T_{kij}$  Tiempo estimado del vehículo en viajar de  $i$  a  $j$ ;  $i, j = 0, \dots, m$  [horas]

$VTP_{kij}$  Velocidad promedio del vehículo en terreno plano. [Km/h]

$\%TP_{ij}$  Porcentaje de ruta en terreno plano

$VTO_{kij}$  Velocidad promedio del vehículo en terreno ondulado. [Km/h]

$\%TO_{ij}$  Porcentaje de ruta en terreno ondulado

$VTM_{kij}$  Velocidad promedio del vehículo en terreno montañoso. [Km/h]

$\%TM_{ij}$  Porcentaje de ruta en terreno montañoso

$f_{ij}$  Factor para el estado de la vía entre el nodo  $i$  al nodo  $j$

$ICC_{kij}$  Indicador de consumo de combustible según el tipo de terreno entre  $i$  a  $j$ ;  $i, j = 0, \dots, m$  [\$/km]

$CV$  Costo variable por kilómetro recorrido

$CF$  Costo fijo vehicular

## Variables de decisión

- $X_{ijk}$  Variable binaria igual a 1 si el arco  $(i, j)$  es atravesado por el vehículo  $k$ ; 0 en caso contrario
- $y_{jk}$  Variable binaria igual a 1 si el nodo  $j$  es atendido por el vehículo  $k$ , 0 en caso contrario.

## Función objetivo

$$\text{Min } C = \sum_{i,j,k} [ \{ (VTP_{kij} * \%TP_{ij} * f_{ij}) + (VTO_{kij} * \%TO_{ij} * f_{ij}) + (VTM_{kij} * \%TM_{ij} * f_{ij}) \} * ICC_{kij} * T_{kij} ] * X_{ijk} + \sum_{i,j,k} \left\{ \frac{1.05 * (CV + CF)}{(1 - 0.133)} \right\} * X_{ijk}$$

La función objetivo está conformada por dos componentes. En primer lugar, se presenta uno de los aportes de esta investigación que es el costo variable asociado a las condiciones rurales de la red vial, teniendo en cuenta la velocidad promedio según el tipo de terreno (plano, ondulado, montañoso), consumo de combustible y el tiempo promedio en viajar del nodo  $i$  al nodo  $j$ . En segundo lugar, el costo total de operación vehicular asociado a costos variables por otros conceptos (sin incluir el consumo de combustible) y el costo fijo por la utilización de los vehículos. Este último componente parte de la formulación del **Ministerio de transporte** para calcular el costo de un vehículo de transporte de carga en Colombia.

## Restricciones

El siguiente grupo de ecuaciones (1) y (2) limitan el número de rutas por vehículo a una. La primera hace referencia al número de veces que un vehículo sale del nodo  $i$  y la segunda el número de veces que llega al nodo  $j$ .

$$\sum_i^N X_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in N, k \in K \quad (1)$$

$$\sum_j^N X_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in N, k \in K \quad (2)$$

La restricción (3) asegura que todos los vehículos comiencen y terminen su recorrido en el centro de acopio o nodo 0.

$$\sum_i^N \sum_j^N X_{0jk} = \sum_i^N \sum_j^N X_{ijk} \quad \forall k \in K \quad (3)$$

La restricción (4) asegura la continuidad del modelo, es decir, si el vehículo visita el nodo  $j$ , este debe abandonarlo para pasar a otro nodo.

$$\sum_i^N X_{ijk} - \sum_j^N X_{ijk} = 0 \quad \forall i \in N, k \in K \quad (4)$$

La restricción (5) asegura que el número de vehículos utilizados o que parten del centro de acopio o nodo 0, no exceda la flota de vehículos disponible.

$$\sum_k^K \sum_i^N X_{ijk} \leq K \quad (5)$$

La restricción (6) asigna el nodo  $j$  al vehículo  $k$  que pasa por ese nodo.

$$\sum_i^N X_{ijk} \geq y_{jk} \quad \forall i = 1, \dots, n; k \in K \quad (6)$$

La restricción (7) asegura que cada agricultor es asignado exactamente a un solo vehículo.

$$\sum_k^K y_{jk} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \in N \quad (7)$$

La restricción (8) asegura que la suma de la cantidad de aguacate recolectado en una ruta no exceda la capacidad del vehículo

$$\sum_j^N O_i * y_{jk} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

Por último, la restricción (9) funciona como ecuación para eliminar los sub-tours.

$$U_i - U_j + (N * X_{ijk}) \leq (N - 1) \quad \forall i, j \in N \quad (9)$$

#### 4.3.4 Parametrización

En esta sección se describe la información y datos recolectados para el anterior modelo matemático. Los parámetros fueron determinados mediante fuentes primarias y secundarias.

**4.3.4.1 Oferta:** el parámetro se determina mediante la consulta: ¿Aproximadamente cuantos kilogramos recolecta en un tiempo de dos días? Esta cantidad está sujeta a varias variables como el número de hectáreas, rendimiento del cultivo y mano de obra, pero para determinar este valor se tiene en cuenta solamente la mano de obra, es decir, entre más trabajadores contrata el productor, más aguacate obtiene. En la Tabla 8, se presentan los valores de entrada para el modelo incluyendo el peso de la canastilla. Los nombres de los agricultores, su ubicación y respectivo código para identificar los productores se pueden observar en el anexo 3.

Tabla 8. Oferta en kilogramos de aguacate hass.

Código	Cantidad (Kg)	Código	Cantidad (Kg)
C1	2450	C7	4200
C2	4300	C8	1200
C3	1600	C9	4500
C4	3500	C10	4100
C5	4500	C11	5000
C6	2450		

Fuente: elaboración propia

**4.3.4.2. Tipo de vehículos:** los vehículos seleccionados para ingresar al modelo fueron cinco (5) camiones de tipología C2, un vehículo de dos ejes con 6 llantas (dos direccionales y 4 eje tracción) el cual se puede observar en la Figura 42.

Este vehículo tiene una capacidad de 9 toneladas y se escogió por tres razones, la primera porque los parámetros para la investigación están determinados por el **Ministerio de transporte**, en segundo, porque la cantidad de oferta que hay disponible puede ser satisfecha por el número de vehículos mencionados y finalmente, debido a las condiciones de las vías, este tipo de camiones accede con mayor facilidad.



Figura 42. Vehículo configuración C2

Fuente: adaptado de Mercado libre

En la Figura 43 se puede observar las configuraciones de los vehículos de carga en Colombia. En la tabla 9 se presenta la configuración, tipo de vehículo y su capacidad de carga.

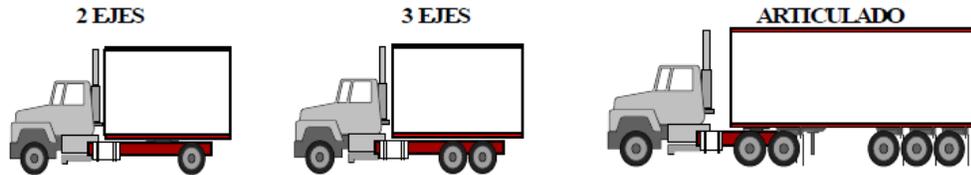


Figura 43. Configuración vehicular

Fuente: adaptado de [72]

Tabla 9. Capacidad de carga en toneladas según el tipo de vehículo

Configuración	Tipo de vehículo	Capacidad de carga en toneladas
C2	Camión dos ejes sencillo	9
C3	Camión tres ejes, doble troque	16
C3-S3	Camión tres ejes, con semirremolque tres ejes	34

Fuente: adaptado de [73]

#### 4.3.4.3. Velocidad promedio del vehículo:

Con el fin de establecer la velocidad promedio de cada arco  $\{(i, j); i, j \in N, i \neq j\}$ , se utilizó la fórmula (10) designada por el **Ministerio de transporte** [54]. En esta ecuación se tiene en cuenta un factor asociado a las características del estado de la vía presentado en la Tabla 10 y las velocidades según el tipo de terreno en la Tabla 11.

$$VPR_{kij} = (VTP_{kij} * \%TP_{ij} * f_{ij}) + (VTO_{kij} * \%TO_{ij} * f_{ij}) + \dots + (VTM_{kij} * \%TM_{ij} * f_{ij}) \quad (10)$$

Donde:

$VPR_{kij}$	Velocidad promedio del vehículo en viajar de $i$ a $j$ ; $i, j = 0, \dots, m$ [Km/h]
$VTP_{kij}$	Velocidad promedio del vehículo en terreno plano. [Km/h]
$\%TP_{ij}$	Porcentaje de ruta en terreno plano
$VTO_{kij}$	Velocidad promedio del vehículo en terreno ondulado. [Km/h]
$\%TO_{ij}$	Porcentaje de ruta en terreno ondulado
$VTM_{kij}$	Velocidad promedio del vehículo en terreno montañoso. [Km/h]
$\%TM_{ij}$	Porcentaje de ruta en terreno montañoso
$f_{ij}$	Factor para el estado de la vía entre el nodo $i$ al nodo $j$

Tabla 10. Factor asociado al estado de la vía

Característica	Factor
Vía pavimentada	1
Vía sin pavimentar en excelentes condiciones	0,9
Vía sin pavimentar en buenas condiciones	0,8
Vía sin pavimentar en regulares condiciones	0,5
Vía sin pavimentar en malas condiciones	0,25
Vía intransitable	0

Fuente: adaptado de [74]

Para determinar el factor correspondiente al estado de la vía que conecta cada vereda se utilizó información del anexo 4, presentado al final del documento, datos suministrados por la Secretaria de Infraestructura del Departamento del Cauca [74].

Tabla 11. Parámetros de velocidad según el tipo de terreno

Tipo de terreno	Velocidad promedio (Km/hora)
Plano	53
Ondulado	30
Montañoso	15

Fuente: adaptado de [54]

#### 4.3.4.4. Indicador de consumo de combustible ICC

Para el costo de cada kilómetro recorrido por el vehículo se utilizó la fórmula (11) del **Ministerio de transporte**, teniendo en cuenta el precio del galón de gasolina para el año 2019 (\$COP 9666) y el rendimiento por kilómetro según el tipo de terreno para vehículos de dos ejes (C2) observado en la tabla 12.

$$ICC = \frac{\text{Precio } \left(\frac{\$}{\text{Gal}}\right)}{\text{Consumo } \left(\frac{\text{Km}}{\text{Gal}}\right)} \quad (11)$$

Tabla 12. Rendimiento kilómetros por galón

Configuración/Tipo de terreno	C2 (Km/Gal)
Plano	12,7
Ondulado	10,1
Montañoso	7,81

Fuente: adaptado de [54]

#### 4.3.4.5. Calculo tiempo promedio

Para calcular el tiempo que se demora en viajar el vehículo en cada arco  $\{(i, j); i, j \in N, i \neq j\}$ , se utiliza la ecuación (12)

$$T_{kij} = \frac{D_{ij}}{VPR_{kij}} \text{ [horas]} \quad (12)$$

Donde:

$D_{ij}$  Distancia de  $i$  a  $j$ ;  $i, j = 0, \dots, m$  [Km]  
 $VPR_{kij}$  Velocidad promedio del vehículo en viajar de  $i$  a  $j$ ;  $i, j = 0, \dots, m$  [Km/h]

#### 4.3.4.6. Matriz de distancias

Las distancias entre cada nodo representan un componente necesario para el desarrollo del modelo, debido a la relación que tiene con los costos variables de transporte del vehículo. Por lo tanto, en este punto la ecuación de distancias euclidianas se descarta, debido a la importancia para la investigación de obtener distancias reales. De ahí que, las distancias fueron calculadas al mismo tiempo que se realizaba la aplicación de las encuestas por medio de la herramienta *rutas* del GPS utilizado.

En el anexo 5, se encuentran las distancias correspondientes a los kilómetros que hay en vía pavimentada y terciaria que conecta cada nodo, esto con el fin de asociar el factor según la característica del estado de la vía considerado en la subsección 4.3.4.3. Las Figuras 44-46 representan el tipo de vía encontradas en el trabajo de campo. Así, en la Figura 44 se puede observar una vía primaria que conecta el Municipio de Timbío con Pacific Fruits.



44(a)



44(b)

Figura 44. Vía pavimentada

Fuente: elaboración propia

En las Figuras 45, se puede observar el deterioro que tienen la carretera por las lluvias y falta de mantenimiento para transitar con vehículos de carga, dando lugar a vías en mal estado.



45(a)



45(b)



45(c)



45(d)

Figura 45. Vía terciaria en mal estado

Fuente: elaboración propia

Por consiguiente, en la Figura 46 se puede observar una red vial en regular estado, que para el Municipio corresponde aproximadamente a 70.2 Kilómetros en este estado [18].



46(a)



46(b)



46(c)



46(d)

Figura 46. Vía terciaria en regular estado

Fuente: elaboración propia

#### 4.3.4.7. Tipo de terreno

Como se mencionó anteriormente en la subsección 4.2.1, los tipos de terreno se encuentran asociados al porcentaje de pendiente que hay en cada tramo. Por tal razón se identificó el tipo de terreno utilizando la pendiente de cada arco  $(i,j)$  proporcionada por Google Earth, el cual brinda información del perfil de elevación de la ruta que conecta cada nodo, correspondiente a la elevación en metros y porcentaje de pendiente cada cierta cantidad de kilómetros.

Por otro lado, también se puede calcular mediante la ecuación (13) que es la diferencia de alturas entre el inicio y final de cada arco, dividido la distancia horizontal. Por último, para determinar los valores de pendiente de cada arco, se utiliza el promedio para unificar a un solo valor.

$$\%P = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (13)$$

Por ejemplo, en la Figura 47 se puede observar la información proporcionada por el software Google Earth, el cual identifica mediante la opción “perfil de elevación” el porcentaje de pendiente (flecha roja) que hay en el arco que conecta cada unidad productiva. Finalmente, este procedimiento se realiza para cada arco  $\{(i,j); i,j \in N, i \neq j\}$ .

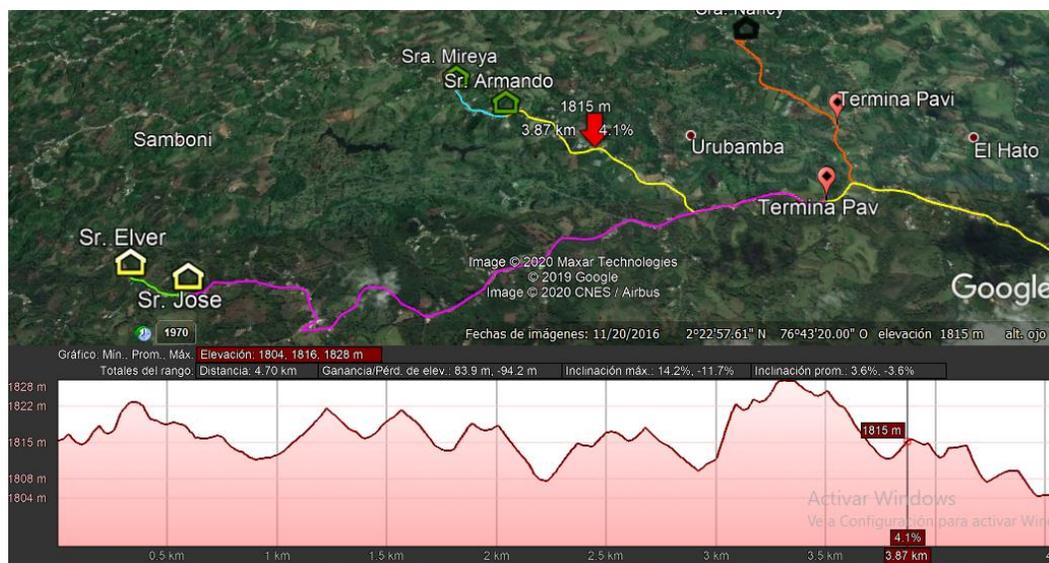


Figura 47. Perfil de elevación

Fuente: elaboración propia utilizando Google Earth.

#### 4.3.4.8. Matriz de costos de operación vehicular

La determinación de los costos de transporte en cada arco es el principal insumo para la función objetivo del modelo propuesto, es por ello que, en primer lugar, se presenta la asociación de criterios como:

- **Tipología del vehículo:** el cálculo de los costos se realiza con base en vehículos de tipología C2.
- **Estado de la vía:** para identificar el estado se toma como referencia la información suministrada por la Secretaria de Infraestructura del Cauca, presentado en el anexo 4, donde se encuentra las conexiones entre veredas, prioridad y estado.
- **Tipo de terreno:** se obtuvo a través de la identificación realizada en la matriz de pendientes presentado anteriormente.
- **Velocidad promedio de la ruta, indicador de consumo de combustible y tiempo promedio:** estos parámetros se calculan a partir de la información presentada previamente.

De tal forma, que al considerar estos criterios facilite el cálculo para determinar el precio por kilómetro de cada uno de los tramos  $C_{ij}$  (origen-destino), a través del primer componente de la función objetivo (color azul, verde y marrón) presentado en la formulación del modelo.

En segundo lugar, existe otra matriz de costos considerando el coste de operación calculados a partir del modelo referente o ecuación (14) del **Ministerio de transporte** [72]. En la función objetivo está representado de color rojo.

$$\text{Costos de operación vehicular} = \frac{1.05 * (CV + CF)}{(1 - 0.133)} \quad (14)$$

Donde:

$$\text{Costo Variable (CV)} = \frac{(ICV * D_{ij}) + \text{valor peajes}}{\text{capacidad del vehículo}} \quad (15)$$

$$\text{Costo Fijo (CF)} = \frac{\left(\frac{ICF}{NRM}\right)}{\text{capacidad del vehículo}} \quad (16)$$

*ICV = indicador costo variable*  
*ICF = indicador costo fijo*  
*NRM = Número de recorridos al mes*

A continuación, se describe los costos considerados en la investigación:

**Costo peaje:** para conocer el valor que tiene que pagar el vehículo se hace uso de la plataforma del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) disponible en [75]. En la Figura 48 se puede observar la información suministrada por la plataforma, en la cual se obtiene el administrador del peaje y el costo por categoría del vehículo. El costo que incurre en vías primarias es de \$COP 32.100. Este costo se obtiene al multiplicar tres peajes por un costo de \$COP 10.700 que tiene cada uno.

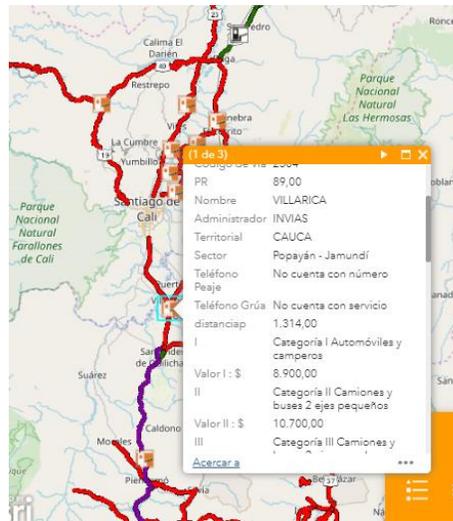


Figura 48. Costo por peaje

Fuente: adaptado de [75]

### **Indicador Costo Variable (ICV) e Indicador Costo Fijo (ICF)**

Estos valores se obtuvieron de los costos de referencia que tiene en cuenta el **Ministerio de transporte** para vehículos de tipología C2. En la Tabla 13 y 14 se presenta los componentes para cada uno respectivamente.

Una vez determinado los costos, un vehículo de tipología C2 tiene un Indicador Costo Variable (ICV) de \$COP 503,94 pesos por kilómetro y un costo fijo (ICF) al mes de \$COP 3.194.019. Para la investigación el ICF se utiliza la ecuación (17) dividiendo el valor total (ICF) sobre 30 días. La ecuación (17) se asume porque el vehículo será contratado por un solo día.

$$\text{Costo fijo por día} = \frac{ICF}{\text{días mes}} \quad (17)$$

Tabla 13. Indicadores de costos variables de operación

Componente	Costo por kilómetro (\$/Km)
Consumo de llantas	115,67
Consumo de lubricantes	56,6
Consumo de filtros	25,72
Mantenimiento y reparaciones	254,74
Lavado y engrase	20,56
Imprevistos	30,65
<b>Total ICV</b>	<b>503,94</b>

Fuente: adaptado de [73]

Tabla 14. Indicador costo fijo

Componente	Costo \$COP
Seguros	337.729
Impuestos rodamiento	79.771
Parqueaderos	154.770
Salarios y prestaciones	1.316.704
Recuperación de capital	1.305.045
<b>Total ICF/mes</b>	<b>3.194.019</b>

Fuente: adaptado de [73]

## Capítulo 5

### 5. Resultados

Para la investigación el modelo propuesto fue desarrollado en el sistema de modelado para programación matemática y optimización GAMS utilizando el solver CPLEX, donde se usó el algoritmo de ramificación y acotamiento ejecutado en un Intel Core i5 de 2,5 GHz con 4 GB de RAM y un sistema operativo de 64 bits Windows 10. Esto debido a la importancia que relaciona la computadora con el tiempo computacional en resolver un problema [76].

En primer lugar, se validó el modelo propuesto para un problema de 5, 8 y 10 nodos con cinco vehículos cada uno. Esto para observar el tiempo computacional y el número de interacciones necesarias que emplea GAMS para obtener una solución óptima [77]. En segundo lugar, se presenta los resultados del modelo matemático en cuanto a las rutas generadas y el costo de transporte asociado.

#### 5.1. Tiempo computacional vs interacciones.

Considerando la evaluación del modelo propuesto se puede observar en la Figura 49 que para un problema de cinco nodos la solución óptima encontrada se resuelve en 1.12 segundos y para 8 nodos se resuelve en 984 segundos empleando 3 y 7 interacciones respectivamente. Sin embargo, se evidencia que a medida que aumenta el número de nodos (productores más centro de acopio) el software GAMS consume un mayor tiempo computacional y realiza un mayor número de interacciones para encontrar una solución óptima.

Respecto al problema de 10 nodos, se debe tener en cuenta que su tiempo de ejecución programado fue de 2000 segundos, contrario a los otros dos problemas de 1000 segundos. Se menciona lo anterior debido que GAMS devuelve unos códigos en el cual informa el escenario de la solución obtenida, por ejemplo, cuando GAMS devuelve el código 3, informa que el optimizador no ha sido capaz

de encontrar una solución óptima en el tiempo disponible de ejecución; de modo que el tiempo se debe aumentar [78].

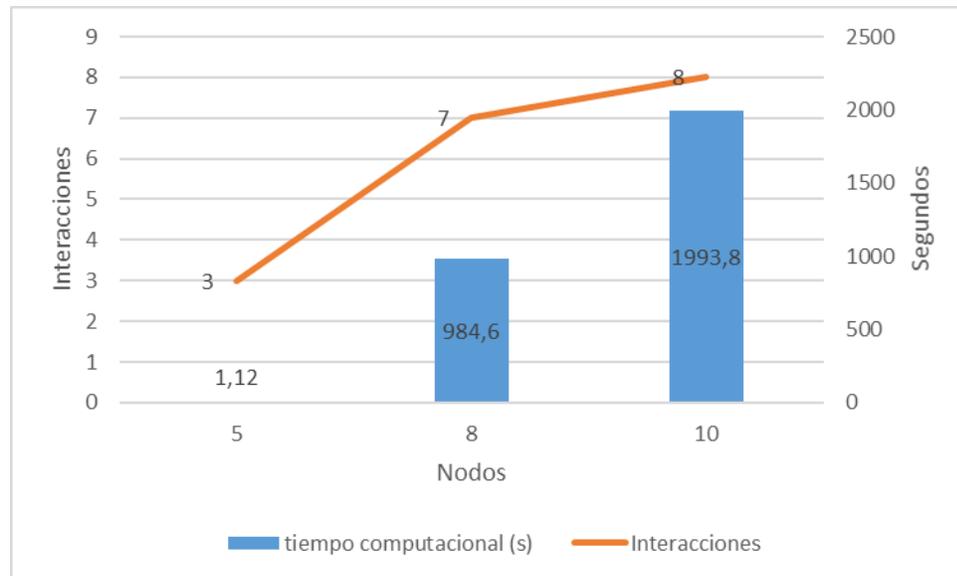


Figura 49. Relación tiempo computacional vs interacciones

Fuente: elaboración propia

## 5.2. Codificación y análisis de las rutas generadas por GAMS

Una vez realizada la codificación y parametrización en la herramienta que se puede observar en el anexo 6, la duración promedio de ejecución del modelo propuesto para obtener una solución fue de 66 minutos empelando 10 interacciones, el cual no se realizó ninguna otra operación en el computador para no interrumpir la capacidad de desarrollo.

Por consiguiente, en la Figura 50 el modelo de ruteo de vehículos con flota homogénea donde se consideraron 12 productores, produce 737 variables simples y 725 variables discretas.

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	10	SINGLE EQUATIONS	803
BLOCKS OF VARIABLES	4	SINGLE VARIABLES	737
NON ZERO ELEMENTS	6,396	DISCRETE VARIABLES	725

Figura 50. Estadísticas del modelo

Fuente: elaboración propia

Después de obtener el número de variables, la solución del modelo ajustado a las condiciones de la investigación obtenida por el software GAMS determina la realización de 5 rutas con un costo total de transporte de \$COP 5.283.481 pesos.

A continuación, se describe las rutas generadas, el costo de transporte por ruta y porcentaje de ocupación del vehículo.

Tabla 15. Rutas generadas por GAMS

# Ruta	Ruta	Productores visitados	Costo por ruta \$COP
1	C <sub>0</sub> -C <sub>1</sub> -C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub> -C <sub>0</sub>	Nelson, Elver, Mireya	1.189.472
2	C <sub>0</sub> -C <sub>5</sub> -C <sub>10</sub> -C <sub>0</sub>	Nancy, Mery	1.022.320
3	C <sub>0</sub> -C <sub>8</sub> -C <sub>9</sub> -C <sub>0</sub>	Tulio, Eduardo	1.012.192
4	C <sub>0</sub> -C <sub>2</sub> -C <sub>7</sub> -C <sub>0</sub>	José, Ciro	1.036.674
5	C <sub>0</sub> -C <sub>6</sub> -C <sub>11</sub> -C <sub>0</sub>	Armando, Felipe	1.022.823
Total			5.283.481

Fuente: elaboración propia

Nota: En el anexo 3, se presenta el nombre completo de cada productor.

En la Tabla 15, se observa las rutas óptimas que genera el software GAMS, en el cual se evidencia que la ruta con más productores visitados es la ruta número 1, además de obtener que a cada ruta se asigna un vehículo para satisfacer la recolección de fruta.

Para analizar el porcentaje de eficiencia en la capacidad de carga en las rutas por cada vehículo se presenta la Tabla 16.

Tabla 16. Eficiencia de la capacidad de carga del vehículo utilizado

# Ruta	Recorrido	Oferta	Cantidad recolectada	Capacidad disponible	% total de ocupación
1	C0	0		9000	83.9%
	C1	2450	2450	6550	
	C3	1600	4050	4950	
	C4	3500	7550	1450	
2	C0	0		9000	95.6%
	C5	4500	4500	4500	
	C10	4100	8600	400	
3	C0	0		9000	63.3%
	C8	1200	1200	7800	
	C9	4500	5700	3300	
4	C0	0		9000	94.4%
	C2	4300	4300	4700	
	C7	4200	8500	500	
5	C0	0		9000	82.8%
	C6	2450	2450	6550	
	C11	5000	7450	1550	

Fuente: elaboración propia

Observando la Tabla 16, se puede concluir que el mayor porcentaje de utilización de la capacidad de carga del vehículo se obtiene en las rutas 2 y 4 y la menor ocupación en la ruta 3. Para las rutas 1 y 2 se obtiene una eficiencia de 83.9% y 95.6% respectivamente.

Ahora bien, analizando los resultados obtenidos por medio de la herramienta aplicada en contraste al sistema de transporte utilizado por los agricultores en el que cada uno contrata un vehículo para movilizar su producto se evidencia la disminución de costos que puede traer la utilización de métodos de optimización. En la Figura 51 se puede observar el porcentaje de disminución que se obtiene es aproximadamente del 29% (USD 1546.98) frente a los costos totales que asumen los productores de USD 2182.42

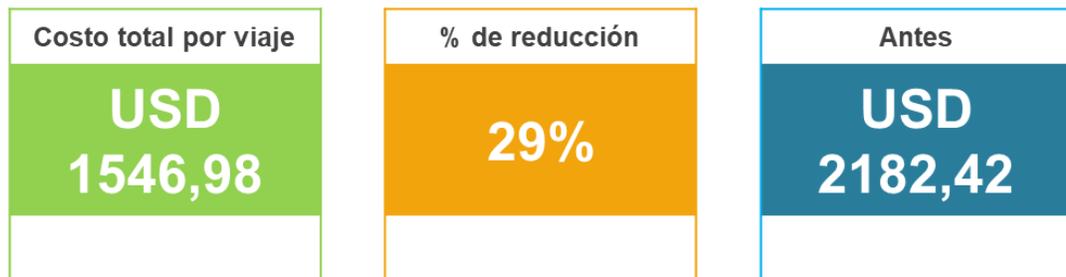


Figura 51. Costos de transporte

Fuente: elaboración propia

Sin embargo, aunque el desarrollo del modelo propuesto no generó una solución exacta, si obtiene una solución intermedia (no óptima, pero factible) que permite minimizar los costos y brindar una buena solución de transporte a los agricultores del municipio de Timbío.

Por consiguiente, realizando un supuesto de implementar alguna ruta generada en práctica, se analizó que seleccionando la ruta número dos que tiene un porcentaje de utilización en la capacidad de carga del vehículo del 95,6% para los productores con identificación C5 y C10 pueden asumir un costo de 132,16 pesos por kilogramo (\$/Kg) transportado.

Por ejemplo, en el Anexo 3 se puede observar que el productor C5 moviliza 4500 kilogramos y a un costo de 132,16 (\$/kg) pagaría un total de \$COP 594.720 pesos en contraste de pagar \$COP 900.000 por un vehículo, resultado de la investigación de campo donde el productor transporta muchas veces el producto independientemente si el vehículo ocupa toda la capacidad.

Finalmente, como se puede observar en la Figura 52 a un costo promedio de USD 1.22 por kilogramo vendido de aguacate en el centro de acopio Pacific Fruits, el porcentaje promedio que representa movilizar el producto sería del 3.2% y generaría una contribución para los productores que venden el producto a intermediarios a un bajo costo (0.88 USD/Kg) una rentabilidad del 27% por transportar el fruto a la comercializadora.



Figura 52. Rentabilidad para el productor

Fuente: elaboración propia

En las Figuras 53-57 se presenta las rutas generadas por el software GAMS correspondientes a la Tabla 15. En la Figura 58 se presenta la ubicación del centro de acopio (C0), debido a la reducción que tenían las figuras de cada ruta para observar los puntos.

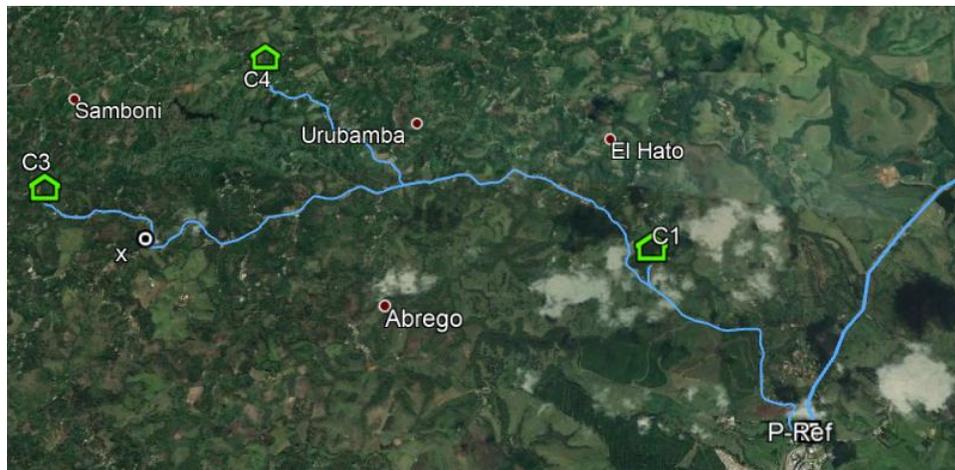


Figura 53. Ruta número 1, secuencia C0-C1-C3-C4-C0

Fuente: elaboración propia utilizando Google Earth

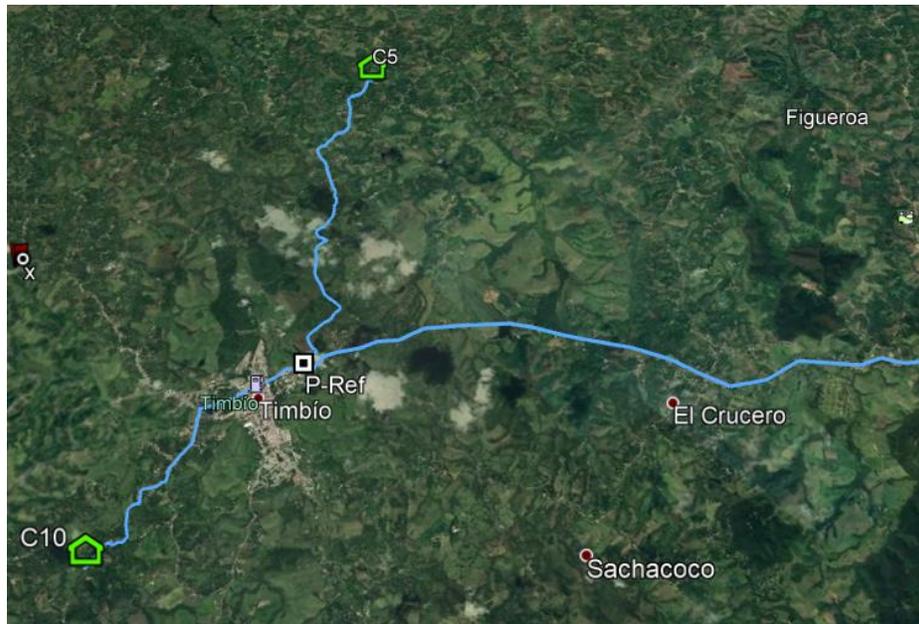


Figura 54. Ruta número 2, secuencia C0-C5-C10-C0

Fuente: elaboración propia utilizando Google Earth

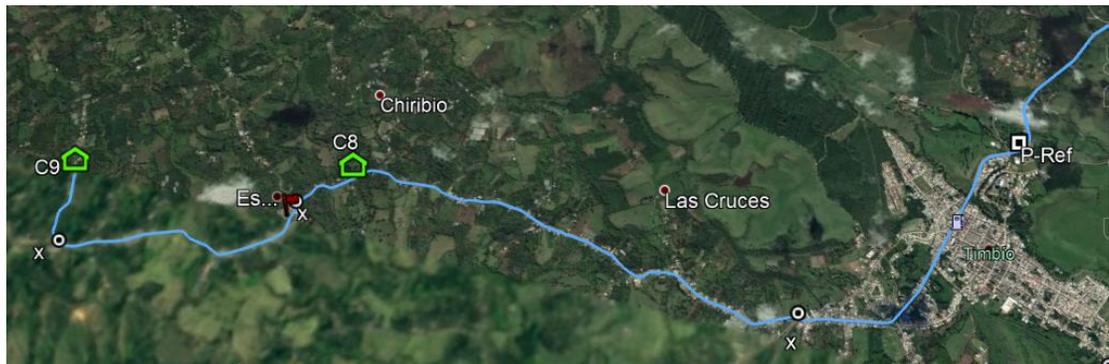


Figura 55. Ruta número 3, secuencia C0-C8-C9-C0

Fuente: elaboración propia utilizando Google Earth

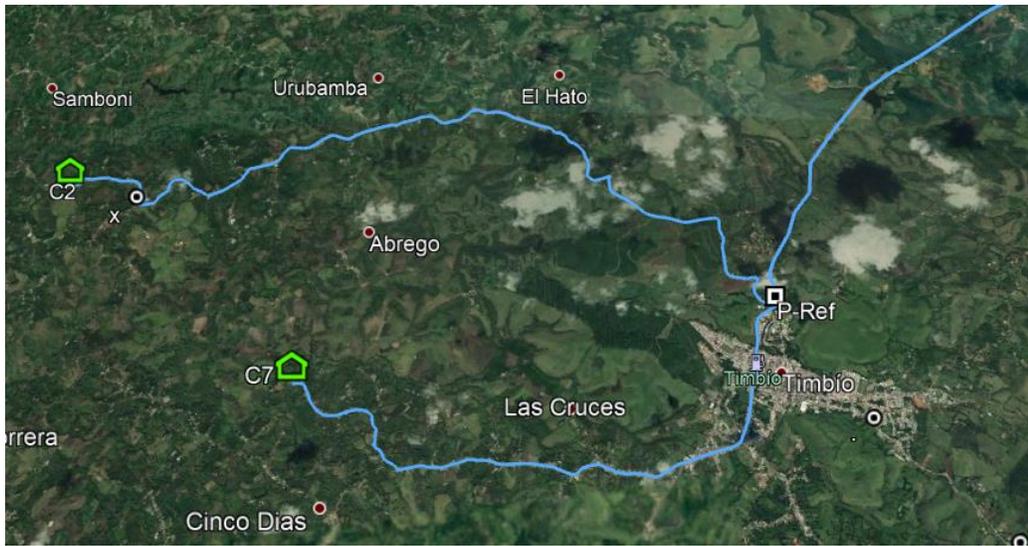


Figura 56. Ruta número 4, secuencia C0-C2-C7-C0  
Fuente: elaboración propia utilizando Google Earth

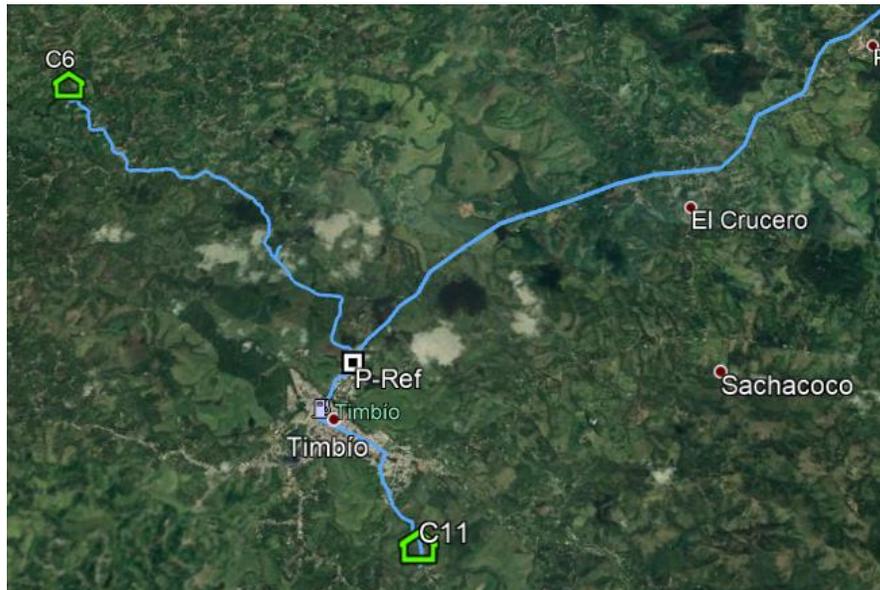


Figura 57. Ruta número 5, secuencia C0-C6-C11-C0  
Fuente: elaboración propia utilizando Google Earth

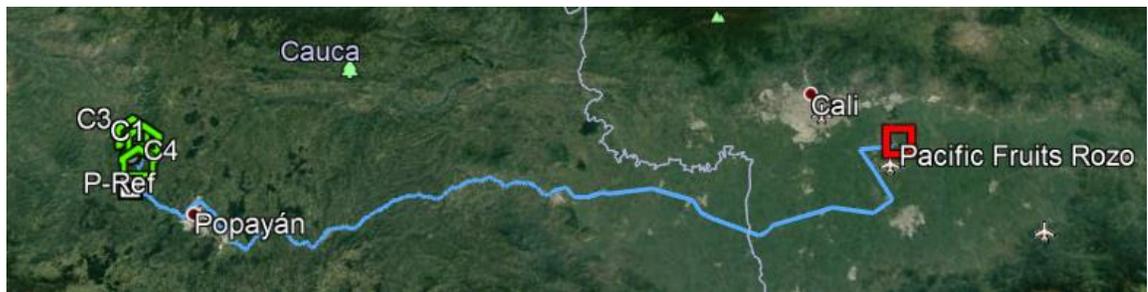


Figura 58. Ubicación centro de acopio (C0).

Fuente: elaboración propia utilizando Google Earth

## 6. Conclusiones

Mediante la investigación se logró identificar una cadena productiva importante para los agricultores debido al sustento familiar que ofrece el cultivo de aguacate, pero con un déficit en la optimización de recursos de transporte utilizado actualmente y los altos costos que debe asumir para movilizar el fruto. De modo que al identificar esta problemática se planteó una propuesta de formular un modelo de optimización basado en el Problema de Ruteo de Vehículos para minimizar los costos de transporte en condiciones rurales obteniendo una reducción aproximadamente del 29% en consideración con los costos que asumían la totalidad de los agricultores y aumentar la rentabilidad del 27% por kilogramos vendido en el centro de acopio (Pacific Fruits).

Por consiguiente, dando cumplimiento a los objetivos planteados en la presente investigación se describe lo acontecido en cada uno de ellos:

Se identificó una red de transporte donde cada productor contrataba un vehículo generando un déficit en la utilización de la capacidad y altos costos de transporte. Además de analizar que la movilización de la carga se realizaba por medio de vehículos de tipología C2 debido a la facilidad de sus dimensiones para transitar por vías terciarias.

Se identificó que el fruto después del proceso de poscosecha y el sistema de transporte de carga utilizado no mantiene una cadena de frío obligando al productor no almacenar el aguacate por más de dos días y movilizarlo en vehículos de carrocería de estacas. También se encontró que el 100% de los productores tienen la necesidad de un centro de acopio más cercano para poder vender o consolidar la carga, debido que el único que cumple con esta característica es Pacific Fruits ubicado en el Valle del Cauca (centro de acopio utilizado en la investigación – con una distancia de 120 kilómetros desde Timbío)

Respecto a la red vial terciaria se analizó que, al considerar esta condición para determinar la velocidad promedio que puede viajar un vehículo se reduce en un 50% respecto a la considerada por el Ministerio de transporte, debido que las características como los huecos, zanjas que se originan por la lluvia en la vía, topografía del terreno dificultan mantener una velocidad constante, además de analizar que es un factor determinante para establecer el tiempo que puede demorar de ir de una finca a otra.

En cuanto a revisión de literatura se identificó la diversidad de variantes y métodos de solución para formular y resolver un Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), pero debido a las características de la presente la investigación se optó por formular un VRP capacitado con programación lineal entera mixta resuelto a través de un algoritmo de ramificación y corte mediante el software GAMS para obtener una solución óptima en un tiempo computacional razonable.

También se analizó que la presente investigación comparada con otras investigaciones que consideran un costo por kilómetro estándar, el trabajo realizado puede realizar un aporte debido que los costos de transporte están sujetos a muchas variables y más aún cuando las vías pertenecen al sector rural donde están en tierra firme y repercuten en el consumo de combustible, velocidad e incluso en la depreciación del vehículo.

Una vez codificado el modelo matemático propuesto en la herramienta y solucionado se evalúa el tiempo computacional que requiere para obtener una solución óptima, en el cual se observó que a medida que se aumentan más nodos los recursos necesarios en cuanto a interacciones y tiempo para resolver el modelo se incrementa, elementos necesarios para comprobar si el modelo propuesto tenía lógica frente a otras investigaciones que mencionan lo mismo [36], [76] .

Según la solución obtenida en la investigación se logró reducir los costos de transporte en un 30%, además de analizar que el modelo propuesto optimiza el nivel de eficiencia en la capacidad de carga y el número de vehículos utilizados. Es decir, de utilizar once vehículos se disminuyó a cinco optimizando el modelo actual de los productores y generando en promedio un 85% de eficiencia en ocupar la capacidad de carga en cada ruta.

Por consiguiente, el trabajo de investigación genera una ventaja competitiva debido que los resultados del modelo propuesto evidencian que la integración o asociación de los productores para transportar el fruto contribuye a operar en una logística colaborativa donde se minimizan gastos y se aumenta la rentabilidad. De tal forma que al año este modelo propuesto pueda generar un ahorro del 28% (\$COP 31.700.886) considerando que en promedio se realicen seis viajes utilizando los cinco vehículos en las dos cosechas, comparado a seguir utilizando el modelo actual donde cada productor asume un costo individual generando al año un costo de transporte de \$COP 44.700.000.

Con esta propuesta se pudo determinar que el porcentaje que representa movilizar un kilogramo de aguacate es del 3,2% del costo por kilogramo vendido, además de generar una contribución del 27% para aquellos que venden el producto a intermediarios. Por otra parte, el modelo propuesto permitirá conllevar otro tipo de gastos debido que, al minimizar los costos de transporte, el excedente que se pagaba anteriormente puede ser utilizado en otras inversiones para el cultivo.

Teniendo en cuenta que el tiempo computacional (66 minutos) pueda superar un valor aceptable para un problema con 12 nodos, se evidencia la eficiencia del método exacto para encontrar una buena solución en modelos de programación entera mixta. Aunque para la presente investigación el tiempo computacional se pueda considerar admisible y obtiene una solución cercana a la óptima, es necesario tener en cuenta que para problemas mayores no sea óptimo este tipo de métodos o el modelo propuesto.

Finalmente, como novedad en el desarrollo del proyecto se logró obtener un costo de ruteo con base a la infraestructura vial de la zona rural, además de analizar la relación que tienen las diferentes características de una vía respecto al costo de operación vehicular, debido que aspectos asociados al estado de la vía, topografía del terreno, tipología del vehículo y velocidad que puede transitar, son factores determinantes para conocer el costo por kilómetro recorrido.

## **7. Trabajos futuros**

Como trabajos futuros sería importante analizar la consistencia de los resultados obtenidos en esta investigación utilizando algoritmos meta heurísticos para la resolución del modelo matemático propuesto, además de considerar un comportamiento de la oferta con parámetros estocásticos, debido que las cantidades de este tipo de frutos es difícil de conocer con anterioridad. Aunque debido a su complejidad de solución y baja aplicabilidad, según [79] este tipo de modelos ofrece un amplio campo de trabajo para posteriores investigaciones.

En segundo lugar, debido a la falta de un centro de acopio para consolidar la carga sería interesante realizar un modelo matemático basado en el Problema de Localización y de Ruteo (LRP) para conocer los costos que conllevaría este tipo de propuestas.

## Bibliografía

- [1] R. H. Ballou, *Logística y Administración de la Cadena de Suministro*, Mexico: Pearson educación, p.219, 2004.
- [2] S. Chopra y P. Meindl, *Administración de la cadena de suministro: Estrategia, planeación y operación*, Mexico: Pearson educación, 2013.
- [3] Council of Supply Chain Management Professionals, [En línea]. Available: [https://cscmp.org/iMISO/CSCMP/..](https://cscmp.org/iMISO/CSCMP/)
- [4] Departamento Nacional de Planeación DNP, «Encuesta Nacional de Logística,» 2018.
- [5] D. A. A. Porras, *Diseño óptimo de rutas para una empresa que brinda servicios de paquetería, mensajería y logística*, San Nicolas de los Garza, Nuevo Leon, 2014.
- [6] J. A. Barbero y P. Guerrero, *El transporte automotor de carga en américa latina*, 2017.
- [7] Banco de Desarrollo de América Latina, *Perfil Logístico de América Latina*, 2017.
- [8] Asociación Nacional de Comercio Exterior (ANALDEX), *Índice de desempeño logístico en Colombia y Latinoamérica*, 2018.
- [9] R. Carro Paz y D. Gonzáles Gómez, *Logística Empresarial*.
- [10] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, «FAO,» [En línea]. Available: <http://www.fao.org/energy/agrifood-chains/es/>. [Último acceso: 25 Julio 2019].
- [11] M. L. Reina y W. Adarme, «Logística de distribución de productos perecederos: estudios de caso Fuente de Oro (Meta) y Viotá (Cundinamarca),» *Colombiana de Ciencias Hortícolas*, vol. 8, nº 1, pp. 80 - 91, 2014.

- [12] L. M. T. Barrera, *Diseño de la cadena de suministro agroalimentaria de la berenjena en Cordoba-Colombia mediante la integracion del modelo SCOR y el enfoque de optimizacion*, Cartagena, 2016.
- [13] «Modelos y configuraciones de cadenas de suministro en productos perecederos,» *Científica Ingeniería y Desarrollo*, vol. 32, nº 1, 2014.
- [14] J. S. M. Grisales, *Localización de Plataformas Logísticas Rurales y Diseño de un Sistema de Ruteo para la Consolidación de la carga de Pequeños y Medianos Productores del Sector Frutícola en el departamento de Boyacá*, Bogotá D.C, 2018.
- [15] Ministerio de Agricultura, «Minagricultura,» 16 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-sector-agropecuario-mantiene-un-crecimiento-positivo-con-una-variacion-de-2-en-el-primer-trimestre-de-2018.aspx>. [Último acceso: 26 Julio 2019].
- [16] Dinero, «Colombia puede convertirse en una de las grandes despensas del mundo,» *Dinero*, 9 Septiembre 2018.
- [17] Ministerio de Comercio, «Perfiles Económicos Departamentales, Departamento del Cauca,» 2019.
- [18] Alcaldía Municipal de Tímbo Cauca, «Plan de Desarrollo 2016-2019,» Tímbo, 2016-2019.
- [19] Portafolio , «Aguacate Hass Colombiano llegará a otro mercado,» *Portafolio*, 24 Julio 2019.
- [20] W. M. De la Pava Torres y J. E. Cardenas, *Diseño de una red de distribución para un producto de consumo masivo, con enfoque de redes de valor*, Bogotá D.C, 2016.
- [21] Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, «Población CNPV 2018 - Dane,» 2018.
- [22] Toda Colombia, «<https://www.todacolombia.com>,» [En línea]. Available: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/cauca/municipios-division-politica.html>. [Último acceso: 2019].

- [23] I. D. G. Calvillo, *El problema de ruteo de vehículos*, 2010.
- [24] J. E. Escalante Gómez y R. Uribe Marin, *Costos Logísticos*, Bogotá D.C: Ecoe Ediciones, 2014.
- [25] Logispyme, [En línea]. Available: <https://logispyme.com/2013/03/18/el-coste-logistico/>. [Último acceso: 3 Agosto 2019].
- [26] A. L. I. Lopez, «Logispyme,» 25 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://logispyme.com/2013/03/25/coste-de-transporte/>. [Último acceso: 1 Agosto 2019].
- [27] Ventura Group, «Ventura Group,» [En línea]. Available: <https://www.venturagroup.com/modos-y-medios-de-transporte-para-la-importacion-y-exportacion/>. [Último acceso: 7 Agosto 2019].
- [28] R. Bloch, «Características de los diversos modos de transporte de mercaderías,» *Desafío Exportar*, nº 83, 2012.
- [29] Ministerio de transporte, República de Colombia, *Estructura de Costos de Operación Vehicular*, 2006.
- [30] A. Olivera, *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, Montevideo, Uruguay, 2004.
- [31] P. Toth y D. Vigo, *Vehicle Routing Problems, Methods, and Applications.*, Philadelphia: Mathematical Optimization Society, 2002.
- [32] W. A. Sarache Castro y M. M. Morales Chávez, *Localización, transporte e inventarios. Tres decisiones estructurales en el diseño de cadenas de abastecimiento*, Bogotá, D.C: Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [33] L. B. Rocha Medina, E. C. Gonzáles La Rota y J. A. Orjuela Castro, «Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución,» *Ingeniería*, vol. 16, nº 2, pp. 35 - 55, 2011.
- [34] M. G. J.-Y. P. Nabila Azi, «An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles,» *ScienceDirect*, vol. 202, pp. 756-763, 2010.

- [35] L. C. Coelho y G. Laporte, «Classification, models and exact algorithms for multi-compartment delivery problems,» *ScienceDirect*, vol. 242, nº 3, pp. 854-864, 2015.
- [36] G. Laporte, «The traveling salesman problem: an overview of exact and approximate algorithms,» *ScienceDirect*, vol. 59, nº 2, 1992.
- [37] J. H. Restrepo y P. D. Medina V, «A logistic case, the capacited vehicle routing problem,» *Scientia et Technica*, nº 38, 2008.
- [38] J. M. Daza, J. R. Montoya y F. Narducci, «Resolución del Problema de Enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases,» *EIA*, nº 12, pp. 23 - 38, 2009.
- [39] A. Correa Espinal, J. Cogollo Flórez y J. Salazar López, «Solving capacitated vehicles routing problems using graph theory,» *Avances en Sistemas e informática*, vol. 8, nº 3, pp. 27-32, 2011.
- [40] C. E. Torres Perez, E. Olivares Benitez y J. L. Martinez Flores, *Revisión y programación de modelos de optimización como una plataforma en GAMS-CPLEX para problemas de ruteo de vehículos*, Acapulco, Guerrero, Mexico, 2011.
- [41] E. C. Gonzalez L, W. Adarme Jaimes y J. A. Orjuela Castro, «Stochastic mathematical model for vehicle routing problema in collecting perishable products,» *DYNA*, vol. 82, nº 189, pp. 199-206, 2015.
- [42] J. P. Orrego Cardozo, D. Ospina Toro y E. M. Toro Ocampo, «Solución al problema de ruteo de vehículos con capacidad limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística,» *Scientia Et Technica*, vol. 21, nº 3, pp. 225-233, 2016.
- [43] A. D. Segura Peñuela y A. K. Padua Dueñas, *Modelo para la solución de un problema de ruteo de vehículos con capacidad y ventanas de tiempo, en el servicio de transporte de canje y correo bancario*, Bogotá D.C, 2018.
- [44] G. P. Mendoza Ortega, C. J. Vergara Rodriguez , M. Ortiz Rodriguez y J. Gamarra Atencia, «Optimization of vehicle routing in the distribution of products of a company in the city of Sincelejo-Colombia,» *International Multi-*

*Conference for Engineering, Education and Technology*, 2018.

- [45] Agencia Nacional de Infraestructura, *Ley 105 del 30 diciembre de 1993.*, 2016.
- [46] Allianz Technology SE, [En línea]. Available: [https://www.allianz.co/v\\_1479423600000/media/files-empresas/transporte/resoluciones/Resolucion\\_777\\_de\\_1995.pdf](https://www.allianz.co/v_1479423600000/media/files-empresas/transporte/resoluciones/Resolucion_777_de_1995.pdf).
- [47] Agencia Nacional de Infraestructura, *Ley 336 de 1996, estatuto general de transporte*, 2016.
- [48] Ministerio de transporte , [En línea]. Available: <https://www.mintransporte.gov.co/preguntas-frecuentes/74/transporte-automotor---transporte-de-carga/>.
- [49] Ministerio de transporte, *Resolución 004100 del 28 Diciembre de 2004*, 2004.
- [50] Ministerio de transporte , *Resolución 1782 de 2009 Ministerio de transporte*, 2009.
- [51] Ministerio de transporte, *Resolución 001384 del 20 Abril de 2010*, 2010.
- [52] Asociacion Nacional de Comercio Exterior, ANALDEX, *Resolución 2498 de 2018 del Ministerio de Transporte – modificación de regulaciones al control de peso a vehículos de transporte de carga rígida de dos ejes*, 2018.
- [53] Instituto Nacional de Vias, *Manual de diseño geométrico de carreteras*, Bogotá, D.C, 2008.
- [54] ANDI, *Manual básico de gestión de transporte de carga por carretera.*, Bogotá, D.C, 2018.
- [55] C. A. B. Torres, *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*, Colombia: Pearson Educación, 2010.
- [56] Garmin , *Manual del usuario serie Etrex HC navegador personal*, 2007.
- [57] Minagricultura, «<https://sioc.minagricultura.gov.co>,» Sistema de información

- de gestión y desempeño de organizaciones de cadenas, 11 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Pages/default.aspx>.
- [58] S. Echavarría, «El nuevo oro verde de Colombia,» *Semana*, 30 Noviembre 2019.
- [59] Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario FINAGRO, «Ficha de inteligencia aguacate,» 2018.
- [60] «Cadena de aguacate, indicadores e instrumentos,» Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2019-10-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>.
- [61] Instituto Colombiano Agropecuario, «El ICA, principal jalonador de las exportaciones de aguacate Hass colombiano al mundo,» 31 Agosto 2019.
- [62] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural , «Agronet,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=4#>.
- [63] D. F. G. Novoa, *Propuestas de buenas práctica logísticas para una cadena de valor agropecuaria en el municipio de Timbío-Cauca*, Bogotá, D.C, 2019.
- [64] Grupo de investigación SEPRO, *Cartilla prueba piloto aguacate Hass*, Bogotá, D.C, 2018.
- [65] S. Irnich, P. Toth y D. Vigo, «The family of vehicle routing problems,» de *Vehicle Routing Problems, Methods and Applications*, 2014.
- [66] R. Baldacci, P. Toth y D. Vigo, «Exact algorithms for routing problems under vehicle capacity constraints,» *Springer*, vol. 175, pp. 213-245, 2010.
- [67] B. L. Golden, T. Magnanti y H. Nguyen, «Implementing vehicle routing algorithms,» *Networks* , vol. 7, pp. 113-148, 1977.
- [68] C. Miller, A. Tucker y R. A. Zemlin, «Integer programming formulation of traveling salesman problems,» *Journal of the ACM*, vol. 7, nº 4, pp. 326-329,

1960.

- [69] P. Toth y D. Vigo, *Vehicle Routing Problems, Methods and Applications*, Bologna, Italy, 2014.
- [70] J. D. Galarcio, M. P. Buelvas, P. A. Nisperuza, J. M. López y H. E. Hernández, «Una nueva metaheurística aplicada al problema de ruteo de vehículos capacitados (CVRP) para la distribución de productos perecederos,» *Ingeniería e innovación* , vol. 5, nº 1, pp. 60-72, 2017.
- [71] J. C. Q. Chamorro, *Propuesta metodológica para la recolección de leche en Colombia caso de estudio: provincia de Sugamuxi (Boyacá)*, Bogotá D.C., 2013.
- [72] Ministerio de transporte, *Modelo para la determinación de costos de referencia*, Bogotá, D.C, 2016.
- [73] Ministerio de transporte, «Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga SICE-TAC,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/359/sistema\\_de\\_informacion\\_de\\_costos\\_eficientes\\_para\\_el\\_transporte\\_automotor\\_de\\_carga\\_sicetac/](https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/359/sistema_de_informacion_de_costos_eficientes_para_el_transporte_automotor_de_carga_sicetac/).
- [74] C. A. Arcos, S. A. Mosquera y S. C. Villada, «Evaluación de rutas para el transporte de productos perecederos en el sector rural,» *Facultad de ciencias agropecuarias*, 2008.
- [75] INVIAS, «<https://www.invias.gov.co/>,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.invias.gov.co/index.php/listado-tarifas-peajes-2>.
- [76] N. E. Teoh, S. G. Ponnambalam y G. Kanagaraj, «Differential evolution algorithm with local search for capacitated vehicle routing problem,» *International Journal Computation*, vol. 7, nº 5, 2016.
- [77] H. M. M. Escobar, *GAMS, ejemplos introductorios*, 2009.
- [78] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. García y N. Alguacil, *Formulación y resolución de modelos de programación matemática en ingeniería y ciencia*, Ciudad Real, España, 2002.

- [79] E. C. Gonzales la Rotta, M. Becerra Fernández y O. Gonzáles Yazo, «Estado del arte del problema de ruteo de vehículos con componentes estocásticos,» *ResearchGate*, 2018.
- [80] Consejo Nacional de Competitividad, 2016. [En línea]. Available: <http://www.competitividad.org.do/wp-content/uploads/2016/08/%C3%8Dndice-de-Desempe%C3%B1o-Log%C3%ADstico-2016.pdf>. [Último acceso: 26 Junio 2019].
- [81] C. A. P. Rueda, *Costos logísticos*, Asunción, Paraguay.
- [82] H. A. Taha, *Investigación de Operaciones*, Mexico: Pearson Educación, 2012.
- [83] GAMS, «The General Algebraic Modeling System,» [En línea]. Available: <https://www.gams.com/products/introduction/>. [Último acceso: 6 Agosto 2019].
- [84] ICONTEC , *Especificación normativa disponible END-094*, Bogotá, D.C, 2018.

## Anexos

**Anexo 1.** Encuesta para productores de aguacate Hass del municipio de Timbocauca

Nombre y apellidos: \_\_\_\_\_

Vereda: \_\_\_\_\_

**1. El calendario de cosecha de la fruta es:**

Trimestral

Semestral

Cada año

Otro: \_\_\_\_\_

**2. ¿Cuántos kilogramos de aguacate Hass cosechó en el último periodo?**

\_\_\_\_\_

**3. ¿A quiénes le vende el producto cosechado?**

Intermediario

Mayorista

Otro: \_\_\_\_\_

**4. ¿De los kilogramos cosechados que cantidad exporta o se vende?**

\_\_\_\_\_

**5. ¿Qué factor considera usted que afecta la calidad del aguacate?**

Enfermedades

Manipulación

Transporte

Otro: \_\_\_\_\_

**6. ¿El sistema de transporte para distribuir el aguacate hacia el mercado de interés es?**

Propio

Contratado

Otro: \_\_\_\_\_

**7. ¿Qué capacidad tiene el camión utilizado para el transporte?**

≤ 3

≤ 6

≤ 8

**8. ¿En qué tipo de vehículo transporte el producto?**

Camioneta

Camión pequeño de dos ejes (C2-turbo)

Camión grande de dos ejes (C2-sencillo)

Otro: \_\_\_\_\_

**9. ¿Qué tipo de carrocería es?**

Estacas

Furgón

Furgón refrigerado

Otro: \_\_\_\_\_

**10. ¿Los kilogramos de aguacate que se transportan utilizan toda la capacidad del vehículo?**

Sí  No  A veces

**11. ¿Comparte el vehículo con otros productores?**

Sí  No  A veces

**12. ¿Usted asume el costo de transporte del producto y qué valor tiene?**

Sí  No  \$COP: \_\_\_\_\_

**13. ¿Existe un centro de acopio de aguacate en el municipio o cerca?**

Sí  No

**14. Observaciones acerca del sistema de transporte:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Anexo 2. Evidencias fotográficas trabajo de campo.



**Anexo 3. Nombre, ubicación y oferta de cada productor.**

Código	Agricultor o encuestado	Coordenadas		Municipio o Vereda	Oferta en Kg
		Latitud	Longitud		
C0	Centro de acopio	N 3°33'39.19"	W 76°24'48.78"	Rozo, Palmira	0
C1	Nelson López	N 2°22'20.9"	W 76°41'45.0"	Hato	2450
C2	José Rubier	N 2°22'21.97"	W 76°44'34.87"	Sambony Alto	4300
C3	Elver Morales	N 2°22'25.14"	W 76°44'46.37"	Sambony Alto	1600
C4	Mireya Dorado	N 2°23'15.72"	W 76°43'50.34"	Urubamba 1	3500
C5	Nancy Hurtado	N 2°23'32.95"	W 76°42'44.0"	Las Piedras	4500
C6	Armando Díaz	N 2°23'07.5"	W 76°43'38.9"	Urubamba 1	2450
C7	Ciro Gómez	N 2°21'11.74"	W 76°43'19.29"	San Pedrito	4200
C8	Tulio Urbano	N 2°20'41.49"	W 76°42'56.74"	Cinco Días	1200
C9	Eduardo Narváez	N 2°20'23.96"	W 76°43'47.80"	Cinco Días	4500
C10	Mery Anaya	N 2°19'37.38"	W 76°40'45.71"	Campo Alegre	4100
C11	Felipe Angulo	N 2°20'27.02"	W 76°40'12.56"	Hato Viejo	5000

## Anexo 4. Estado de la red vial del municipio de Timbio

	CÓDIGO DE LA VÍA	NOMBRE DE LA VÍA	ORDEN DE PRIORIDAD	RANGO	ESTADO	LONGITUD TOTAL
1	20KB08	CRUCE RUTA 2001 (LAS PIEDRAS)-QUINTERO-TUNURCO-CRUCERO LA ZULIA	1	ESTRATÉGICO	MALO	2,380
2	25KA86-1	EL RETIRO LOS LAGOS-TIMBÍO	2	ESTRATÉGICO	REGULAR	4,409
3	15960	EL HATO-LAS PIEDRAS	3	ESTRATÉGICO	REGULAR	7,892
4	15970	CRUCE RUTA 25CC03(LA CABAÑA)-SILOE-EL CHARCO(CRUCE RUTA 2001)	4	ESTRATÉGICO	REGULAR	14,074
5	25KA83	CRUCE RUTA 2503 (BARROBLANCO)-CRUCE RUTA 25CC10 (EL ARADO)	5	ESTRATÉGICO	REGULAR	0,797
6	25KA84	CRUCE RUTA 2503 (SECTOR CARLOS ALBÁN)-LA AVANZADA	6	ESTRATÉGICO	REGULAR	3,800
7	25KA86	CRUCE RUTA 2503 (TIMBÍO)-EL RETIRO-LA AVANZADA-SACHACOCO-LOS ROBLES (CRUCE RUTA 2503)	7	ESTRATÉGICO	REGULAR	8,240
8	25KA87	CRUCE RUTA 2503 (LOS ROBLES)- CRUCE RUTA 25CC13 (SECTOR LOS RIVERA)	8	ESTRATÉGICO	REGULAR	1,201
9	25KA88	CRUCE RUTA 2503-LA HONDA-LAS VERANERAS-GUAYABAL	9	ESTRATÉGICO	REGULAR	7,840
10	15965	ENCENILLO-CAMPOSANO-BUENOS AIRES-EL LIMON	10	ESTRATÉGICO	REGULAR	13,396
11	25KA02-2	CRUCE RUTA 25CC02 (EL HATO)-SAMBONI	11	ESTRATÉGICO	REGULAR	5,708
12	25KA79	CRUCE RUTA 2503 (LAS CRUCES)-NARANJAL-SANTA MARIA (CRUCE RUTA 2503)	12	ESTRATÉGICO	REGULAR	7,308
13	25KA90	CRUCE RUTA 25CC03 (MI BOHIO)-LA MARTICA	13	ESTRATÉGICO	MALO	2,535
14	25KA89	CRUCE RUTA 2503 (MI BOHIO)- LOS DOS BRAZOS (CRUCERUTA 25CC14)	14	ESTRATÉGICO	REGULAR	1,950
15	15965-1	VÍA EL TEMPLETE	15	ESTRATÉGICO	REGULAR	0,978
16	15965-3	VIA CAMPOSANO	16	ESTRATÉGICO	REGULAR	1,585
17	15965-4	RAMAL BUENO AIRES	17	ESTRATÉGICO	REGULAR	0,496
18	20KB09	EL ZARZAL-CABUYAL-CRUCE RUTA 25CC03(LA CABAÑA)	18	ESTRATÉGICO	REGULAR	5,320
19	25KA02-2-2	RAMAL URUBAMBA 2-LA LOMA	19	ESTRATÉGICO	REGULAR	0,632
20	25KA10-1	CRUCE RUTA 2503 (CINCO DÍAS)-SAN PEDRITO	20	ESTRATÉGICO	BUENO	1,787
21	25KA10-2	CRUCE RUTA 2503 (CINCO DÍAS)-SAN PEDRO	21	ESTRATÉGICO	REGULAR	3,224
22	25KA10-11	CRUCE RUTA 2503(CINCO DIAS)-PORVENIR	22	ESTRATÉGICO	REGULAR	6,871
23	25KA88-1	RAMAL LA HONDA -VERANERAS	23	ESTRATÉGICO	BUENO	0,373
24	25KA03-2	TUNURCO-LA CHORRERA	24	ESTRATÉGICO	REGULAR	3,350
25	25KA12-2-1	VÍA CAMPOALEGRE	25	ESTRATÉGICO	REGULAR	3,231
26	25KA03-1	CRUCE RUTA 2503 (EL HATO)- CUCHICAMA	26	MEDIO	MALO	3,947
27	15965-2	RAMAL LA HONDA	27	MEDIO	REGULAR	2,842
28	15970-1	RAMAL LA LAGUNA	28	MEDIO	REGULAR	1,160

	CÓDIGO DE LA VÍA	NOMBRE DE LA VÍA	ORDEN DE PRIORIDAD	RANGO	ESTADO	LONGITUD TOTAL
29	20KB09-4	EL CIPRES-LA ZULIA	29	MEDIO	MALO	2,502
30	25KA02-2-4	RAMAL PALMICHAL	30	MEDIO	REGULAR	1,510
31	25KA03-1-1	CUCHICAMA-TUNURCO	31	MEDIO	REGULAR	2,281
32	25KA03-2-1	CRUCERO LA CHORRERA-CUCHICAMA	32	MEDIO	REGULAR	1,600
33	25KA12-2	CRUCE RUTA 25CC12-CAMPOALEGRE-EL ALTILLO-CRUCE RUTA 2503 (B/ BOYACÁ TIMBIO)	33	MEDIO	REGULAR	3,000
34	25KA12-2-2	RAMAL PEDRO PABLO	34	MEDIO	REGULAR	0,700
35	25KA79-5	RAMAL LA LOMA 2	35	MEDIO	REGULAR	1,330
36	25KA79-7	RAMAL SANTA MARÍA	36	MEDIO	MALO	1,350
37	25KA85	CRUCE RUTA 2503 (LA MARQUEZA)-EL DESCANSO	37	MEDIO	REGULAR	0,704
38	25KA10-10	CRUCE RUTA 2503 (ALTO SAN JOSÉ)-PORVENIR	38	MEDIO	REGULAR	0,824
39	25KA80	CRUCE RUTA 2503(LAS CRUCES)-INSTITUCION EDUCATIVA LAS CRUCES	39	MEDIO	REGULAR	1,224
40	25KA88-3	RAMAL II LAS VERANERAS	40	MEDIO	REGULAR	1,310
41	25KA10-4	CRUCE RUTA 2503 (CINCO DÍAS)-LA ALFONSA	41	MEDIO	REGULAR	1,543
42	25KA78	CRUCE RUTA 2503-VEREDA QUILICHAO	42	MEDIO	REGULAR	3,303
43	15970-2	RAMAL LA CABAÑA	43	MEDIO	MALO	0,520
44	15970-3	RAMAL PALENQUE	44	MEDIO	REGULAR	0,750
45	15970-4	RAMAL CABAÑA BAJA	45	MEDIO	MALO	1,600
46	15970-5	RAMAL LAS HUERTAS	46	MEDIO	REGULAR	0,995
47	15970-9	RAMAL LOS MELQUINN ERAZO	47	MEDIO	MALO	0,690
48	15970-10	RAMAL GUABAL BAJO	48	MEDIO	REGULAR	0,930
49	25KA79-1	RAMAL EL NARANJAL 1	49	MEDIO	REGULAR	0,467
50	25KA79-6	RAMAL SANTA MARÍA 2	50	MEDIO	REGULAR	0,810
51	25KA12-2-1-1	RAMAL LOS CARVAJAL	51	BAJO	REGULAR	0,695

	CÓDIGO DE LA VÍA	NOMBRE DE LA VÍA	ORDEN DE PRIORIDAD	RANGO	ESTADO	LONGITUD TOTAL
52	25KA88-2	RAMAL I LAS VERANERAS	52	BAJO	REGULAR	2,740
53	25KA90-1	RAMAL CASA COMUNAL	53	BAJO	MALO	0,683
54	25KA02-2-1	RAMAL HUECO LINDO	54	BAJO	MALO	1,094
55	25KA02-2-5	RAMAL LOS ACOSTA	55	BAJO	REGULAR	0,870
56	25KA02-2-6	RAMAL LA PLAYA	56	BAJO	MALO	1,931
57	25KA79-2	RAMAL SECTOR BAJO	57	BAJO	REGULAR	1,550
58	25KA79-3	RAMAL LAS CRUCES	58	BAJO	REGULAR	0,870
59	25KA79-4	RAMAL EL NARANJAL 2	59	BAJO	REGULAR	0,640
60	25KA82-1	RAMAL TROPICAL	60	BAJO	REGULAR	0,491
61	15970-2-1	RAMAL CANCHA DE FUTBOLL LA CABAÑA	61	BAJO	MALO	0,354
62	25KA82	CRUCE RUTA 25CC03-VEREDA TROPICAL	62	BAJO	REGULAR	0,447
63	25KA02-1	CRUCE RUTA 2502-LA CAROLINA	63	BAJO	MALO	1,623
64	25KA02-3	CRUCE RUTA 25CC02 (URUBAMBA)-LA FLORESTA	64	BAJO	REGULAR	0,739
65	25KA81	CRUCE RUTA 2503(EL DESECHO)-LAS CRUCES	65	BAJO	REGULAR	0,529
66	20KB09-1	CRUCERO CABUYAL-CRUCERO EL ZARZAL	66	BAJO	REGULAR	1,266
67	20KB09-3	RAMAL LOS PACHECOS	67	BAJO	REGULAR	0,940
68	25KA02-5-1	RAMAL EL CAIRO	68	BAJO	REGULAR	1,528
69	25KA10-3	CRUCE RUTA 2503 (CINCO DÍAS)-EL ROBLE	69	BAJO	MALO	0,437
70	25KA10-5	CRUCE RUTA 2503-CANCHA CINCO DÍAS	70	BAJO	REGULAR	0,153
71	25KA10-6	CRUCE RUTA 2503-LAS PIEDRAS	71	BAJO	REGULAR	1,058
72	25KA10-7	CRUCE RUTA 2503-LOS NARANJOS	72	BAJO	REGULAR	0,327
73	25KA10-8	CRUCE RUTA 2503-RAMAL LA FINCA	73	BAJO	REGULAR	1,018
74	25KA10-9	RUTA 2503-CANCHA SAN JOSÉ	74	BAJO	REGULAR	0,364

## Anexo 5. Matriz de distancias

Km DE RUTA PAVIMENTADA												
	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
C0		180,4	182,54	182,54	182,54	182,83	182,54	181,97	181,97	181,97	180,59	181,38
C1	180,4		2,14	2,14	2,14	2,43	2,14	6,57	6,57	6,57	5,19	5,98
C2	182,54	2,14		0	0	0,79	0	8,51	8,51	8,51	7,13	7,92
C3	182,54	2,14	0		0	0,79	0	8,51	8,51	8,51	7,13	7,92
C4	182,54	2,14	0	0		0,79	0	8,51	8,51	8,51	7,13	7,92
C5	182,83	2,43	0,79	0,79	0,79		0,79	8,8	8,8	8,8	7,42	8,21
C6	182,54	2,14	0	0	0	0,79		8,51	8,51	8,51	7,13	7,92
C7	181,97	6,57	8,51	8,51	8,51	8,8	8,51		0	0	3,57	5,777
C8	181,97	6,57	8,51	8,51	8,51	8,8	8,51	0		0	3,57	5,777
C9	181,97	6,57	8,51	8,51	8,51	8,8	8,51	0	0		3,57	5,777
C10	180,59	5,19	7,13	7,13	7,13	7,42	7,13	3,57	3,57	3,57		4,374
C11	181,38	5,98	7,92	7,92	7,92	8,21	7,92	5,777	5,777	5,777	4,374	

Km DE RUTA EN TIERRA FIRME												
	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
C0		0,21	4,67	5,06	3,02	1,22	2,54	2,09	0,891	3,331	1,76	0
C1	0,21		4,67	5,06	3,23	1,22	2,75	2,09	0,891	3,331	1,76	0
C2	4,67	4,67		0,39	2,59	5,885	2,11	6,76	5,561	8,001	6,43	4,67
C3	5,06	5,06	0,39		2,98	6,275	2,5	7,15	5,951	8,391	6,82	0,39
C4	3,02	3,23	2,59	2,98		4,27	0,48	5,32	4,121	6,561	4,99	3,23
C5	1,22	1,22	5,885	6,275	4,27		3,79	3,31	2,111	4,551	2,98	1,22
C6	2,54	2,75	2,11	2,5	0,48	3,79		4,837	3,638	6,078	4,507	2,747
C7	2,09	2,09	6,76	7,15	5,32	3,31	4,837		2,421	4,851	3,85	2,09
C8	0,891	0,891	5,561	5,951	4,121	2,111	3,638	2,421		2,44	2,651	0,891
C9	3,331	3,331	8,001	8,391	6,561	4,551	6,078	4,851	2,44		5,091	3,331
C10	1,76	1,76	6,43	6,82	4,99	2,98	4,507	3,85	2,651	5,091		1,76
C11	0	0	4,67	0,39	3,23	1,22	2,747	2,09	0,891	3,331	1,76	

## Anexo 6. Codificación del modelo matemático en GAMS.

```

SET
I NODO TIPO I /I0*I11/
K TIPO DE VEHICULO K /K1*K5/;

SCALAR N CANTIDAD DE NODOS /12/;
SCALAR M NUMERO DE VEHICULOS /5/;

PARAMETERS

CP(K) CAPACIDAD DEL VEHICULO K
/
K1      9000
K2      9000
K3      9000
K4      9000
K5      9000
/

O(J) OFERTA DEL PRODUCTO EN LA UNIDAD PRODUCTIVA DEL AGRICULTOR J
/
I0      0
I1      2450
I2      4300
I3      1600
I4      3500
I5      4500
I6      2450
I7      4200
I8      1200
;

TABLE C(I,J) COSTO ASOCIADO A LAS CARACTERISTICAS DE LA RUTA ENTRE EL NODO I AL
      I0      I1      I2      I3      I4      I5      I6      I7      I8
I0      0      137463  142486  142783  141230  140081  140865  140089  139176
I1      137463  0      6576   6953   5185   3525   4722   177735  7205
I2      142486  6576   0      483   2501   6446   2037   14745  13587
I3      142783  6953   483   0      2878   6822   2414   15122  13964
I4      141230  5185   2501   2878   0      4886   365   13355  12197
I5      140081  3525   6446   6822   4886   0      4423   11694  10536
I6      140865  4722   2037   2414   365   4423   0      12888  11731
I7      140089  8362   14745  15122  13355  11694  12888  0      2338
I8      139176  7205   13587  13964  12197  10536  11731  2338  0
I9      141033  9561   15944  16320  14553  12892  14087  4684  2356
I10     138787  6711   13094  13471  11703  10043  11237  7165  6007
I11     138049  5774   12157  8024   10767  9106   10300  7597  6439
;

TABLE CTO(I,J) COSTO DE OPERACION VEHICULAR DE LA RUTA ENTRE EL NODO I AL NODO J
      I0      I1      I2      I3      I4      I5      I6      I7      I8
I0      0      278043  282071  282309  281064  280142  280771  280148  279417
I1      278043  0      171971  172209  171092  170043  170799  173100  172369
I2      282071  171971  0      168053  169396  171889  169103  177134  176403
I3      282309  172209  168053  0      169634  172127  169341  177372  176641
I4      281064  171092  169396  169634  0      170903  168108  176256  175524
I5      280142  170043  171889  172127  170903  0      170610  175206  174474
I6      280771  170799  169103  169341  168108  170610  0      175961  175229
I7      280148  173100  177134  177372  176256  175206  175961  0      169293

```