

**SOLUCIÓN DE PROBLEMA DE RUTEO CON FLOTA HETEROGENEA DE
UNA EMPRESA DEL SECTOR AVÍCOLA USANDO EL ALGORITMO DE
CLARKE & WRIGHT**



**Universidad
del Valle**

Facultad de Ingeniería

**Presentado por:
Miguel Eduardo López Ramos
Andrés Fernando Puyo Bazallo**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2018**

**SOLUCIÓN DE PROBLEMA DE RUTEO CON FLOTA HETEROGENEA DE
UNA EMPRESA DEL SECTOR AVÍCOLA USANDO EL ALGORITMO DE
CLARKE & WRIGHT**

Trabajo de Grado

**Presentado por:
Miguel Eduardo López Ramos
Andrés Fernando Puyo Bazallo**

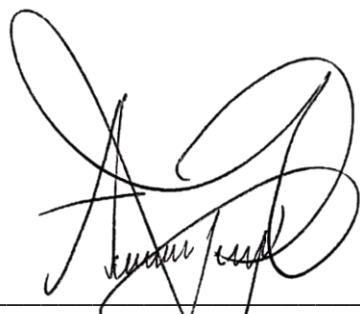
**Director:
Ing. Álvaro José Torres Penagos**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2018**

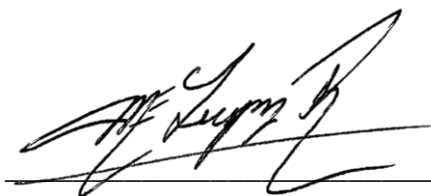
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Quienes suscriben, Andrés Fernando Puyo Bazallo, identificado con cédula de ciudadanía 1.114.832.178 y código 201360421 y Miguel Eduardo López Ramos, identificado con cédula de ciudadanía 1.115.085.840 y código 201360001, estudiantes de décimo semestre del programa de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle sede Buga, hacen constar que son los autores del trabajo de grado titulado: **SOLUCIÓN DE PROBLEMA DE RUTEO CON FLOTA HETEROGENEA DE UNA EMPRESA DEL SECTOR AVÍCOLA USANDO EL ALGORITMO DE CLARKE & WRIGHT, Guadalajara de Buga, 2018** y de la herramienta de Excel utilizada para la obtención de los resultados, los cuales fueron elaborados únicamente y exclusivamente bajo la dirección del Ing. Álvaro José Torres Penagos, docente de la Universidad del Valle. En tal sentido, hacemos constancia de la originalidad del trabajo, obtención e interpretación de resultados y elaboración de conclusiones, dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores que fueron usados en este documento se encuentran debidamente referenciados en el texto.

Se deja constancia de lo anterior en Guadalajara de Buga, a los 10 días del mes de noviembre de 2018.



Andrés Fernando Puyo Bazallo
cc. 1.114.832.178
Código: 201360421



Miguel Eduardo López Ramos
cc. 1.115.085.840
Código: 201360001

RESUMEN

En el siguiente trabajo de grado se presenta una propuesta de un sistema de ruteo con flota mixta usando el método de Clarke & Wright para una empresa avícola en el municipio de Guadalajara de Buga, Valle. Para esto se realiza una caracterización del estado actual en la cual se describen las actividades del proceso, los recursos y los costos asociados a éste teniendo en cuenta tanto los costos variables como fijos de cada de los vehículos que realizan las entregas de los productos a cada uno de los clientes. Posteriormente se realiza la propuesta de un método ruteo usando el método los ahorros. En esta etapa se evalúa la mejor forma de selección de los vehículos de tal forma que se disminuyan los costos, evaluando los costos de la selección en orden descendente y ascendente en cuanto a capacidad y costos variables y posteriormente se muestran los resultados de la ejecución del modelo. Por último, se realiza una comparación de los resultados obtenido en la caracterización frente a los resultados del método de los ahorros y se determina los beneficios de la utilización de este último.

PALABRAS CLAVE: Ruteo, MFVRP, heurístico, algoritmo, método de los ahorros, costos variables y fijos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO 1: PROBLEMA DEL TRABAJO DE GRADO	9
1.1. Descripción de la situación problemática	9
1.2. Pregunta de investigación	11
1.3. Objetivos	12
1.3.1. Objetivo general.....	12
1.3.2. Objetivos específicos	12
1.4. Justificación.....	13
1.5. Marco teórico.....	14
1.5.1. Componentes	14
1.5.2. Variación del problema	14
1.5.3. Métodos de solución.....	16
1.5.4. Sistema de costos	18
1.5.5. Estado del arte.....	21
1.6. Metodología.....	25
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	27
2.1. Actividades de planeación.....	28
2.2. Actividades de ejecución.....	29
2.3. Actividades de verificación	30
2.4. Actividades de ajuste, correctivas y/o preventivas:	30
2.5. Personal, recursos y documentación del proceso	30
2.6. Costos	32
2.6.1. Enfoque de costos de transportes	32
2.6.2. Clasificación de los costos.....	32
2.7. Consideraciones y supuestos:.....	36
2.8. Resultados	38
CAPÍTULO 3: DESARROLLO	43
3.1. Modelo matemático	43

3.2. Método propuesto	46
3.3. Simulación de las rutas	49
3.4. Orden de selección de vehículos	53
3.5. Ejecución del modelo	59
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	65
4.1. Discusión y análisis de los resultados	65
4.1.1. Distancias	65
4.1.2. Costos	66
4.1.3. Ocupación.....	68
4.1.4. Indicadores	69
4.2. Tendencia de los resultados.....	70
4.3. Conclusiones.....	72
4.4. Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS	74
ANEXOS	76
ANEXO 1: Código en VBA.....	76
ANEXO 2: Costos fijos de vehículos.....	80
ANEXO 3: Costos variables de vehículos.....	82

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad de carga de los vehículos.....	31
Tabla 2. Costos relacionados a las rutas.....	33
Tabla 3. Costos relacionados a los vehículos.....	33
Tabla 4. Costos fijos vehículo NPR.....	34
Tabla 5. Costos variables vehículo NPR.....	35
Tabla 6. Relación costos generales.....	36
Tabla 7. Distancia y costos del recorrido vehículo KODIAK.....	39
Tabla 8. Costos totales del periodo evaluado.....	40
Tabla 9. Promedio de tasa de ocupación de los vehículos.....	41
Tabla 10. Resultados selección de vehículos de mayor a menor capacidad.....	54
Tabla 11. Resultados selección de vehículos de menor a mayor capacidad.....	55
Tabla 12. Resultados obtenidos mes de noviembre.....	60
Tabla 13. Resultados obtenidos mes de diciembre.....	61
Tabla 14. Resultados obtenidos mes de enero.....	61
Tabla 15. Resumen de costos.....	68

INTRODUCCIÓN

La competencia constante de entre las empresas por aumentar sus utilidades y la satisfacción al cliente hace que éstas busquen constantemente generar una ventaja competitiva que les permita estar por encima de las demás. Asimismo, las empresas buscan reducir sus costos tanto como sea posible, y así poder aumentar sus ingresos.

La distribución de los productos es un elemento fundamental para cualquier compañía puesto que de esta forma es como logra cumplir con gran parte de las expectativas de los clientes. Para lograr esto, cada empresa debe contar con un sistema de transporte efectivo. Según Ballou (2004), los costos de transporte consumen entre uno y dos tercios de los costos logísticos de las organizaciones. Es por este motivo que se torna indispensable buscar la forma de aumentar la eficiencia del sistema de transporte de las compañías tanto como sea posible.

El problema de ruteo de vehículos o VRP (Por sus siglas en inglés) es uno de los más estudiados en la optimización de operaciones logísticas y uno de los más comunes. Este problema consiste en determinar las mejores rutas para visitar a todos los clientes de una empresa buscando generalmente disminuir los costos de transporte.

Debido a la gran cantidad de variables y restricciones presentes en este problema, han surgido variaciones que buscan resolver un problema con características propias. Dentro de estas características especiales se incluyen ventanas de tiempo, capacidades homogéneas, múltiples depósitos, capacidades heterogéneas y flotas compuestas por diferentes vehículos, entre otras.

El presente documento trata justamente sobre una propuesta para abordar el problema de ruteo de con flota mixta o MFVRP (*Mixed Fleet VRP*) aplicado al contexto de una empresa avícola que distribuye sus productos a nivel nacional. Para realizar dicha labor, cuenta con una flota compuesta por cinco tipos de vehículos diferentes, con diferentes capacidades, costos fijos y costos variables.

CAPÍTULO 1: PROBLEMA DEL TRABAJO DE GRADO

1.1. Descripción de la situación problemática

La empresa caso de estudio pertenece al sector avícola y está ubicada en Guadalajara de Buga, ésta ofrece dos líneas de productos: pollitas ponedoras de las razas Lohman y H&N, y pollo de engorde de las razas Ross y Cobb. Esta empresa distribuye sus productos a nivel nacional por vía terrestre con vehículos propios. La planeación de estas rutas se hace de manera intuitiva, basándose en la experiencia de la persona encargada y por políticas de la empresa es permitido que los clientes generen pedidos a último momento, incluso una vez que ya se haya llevado a cabo la planeación de las rutas. Dado que en ocasiones no se halla la forma de incluir estos nuevos pedidos dentro de las rutas establecidas, se genera un aumento en los costos de los fletes provocado por el despacho de vehículos relativamente vacíos. Se observa la necesidad de la creación de un sistema de asignación de rutas apropiado, de tal forma que se pueda realizar la programación de las rutas nuevamente y así incluir los pedidos de último momento, generando un mejor aprovechamiento de la capacidad.

La empresa cuenta con diferentes granjas ubicadas en el Valle del Cauca. De estas se envían huevos fértiles a la planta de incubación ubicada en el Municipio de Mediacanoa. Una vez que el departamento de ventas concreta los pedidos con los diferentes clientes, el huevo fértil es incubado y el pollo nace 21 días después, momento en el cual se procede con la distribución del producto. Con base en estos nacimientos se programan las rutas dos veces por semana. Los clientes son en promedio 117 por cada nacimiento, se encuentran distribuidos en 9 zonas a lo largo del territorio nacional y se dividen de la siguiente manera: zona costa alta y baja, Antioquia, Huila, Valle, Cundinamarca, Bucaramanga, Quindío y Pasto. La distribución de los pedidos normalmente se hace por zonas, procurando que un vehículo visite única y exclusivamente los clientes de una sola zona, a excepción de Medellín, costa alta y costa baja, ya que en ocasiones los vehículos atienden la zona de Medellín antes de continuar hacia las zonas de la costa.

Actualmente se cuenta con siete granjas que tienen capacidad para albergar 350.000 reproductoras de las razas Ross y Cobb. También se dispone con tres granjas con capacidad para 150.000 reproductoras de las razas Lohman y H&N. Estas granjas se encuentran ubicadas en las veredas Cordobita (Yotoco), Puente

Tierra (Yotoco), El Dorado (Yotoco) y en los municipios de Mediacanoa, Guacarí y Restrepo. Adicionalmente, la planta de incubación cuenta con capacidad para producir 30.000.000 y 12.000.000 de pollito de engorde y ponedoras, respectivamente.

Para la distribución del producto, se encuentran disponibles 18 vehículos de diferentes características y capacidades, los cuales se dividen de la siguiente manera: 3 camiones Chevrolet NPR (1 con capacidad para 264 cajas de producto y 2 con capacidad de 352 cajas), 8 camiones Chevrolet NQR con capacidad para 352 cajas, 4 camiones Chevrolet FRR con capacidad para 396 cajas, 2 camiones Chevrolet FTR ambos con capacidad para 440 cajas y un Chevrolet Kodiak con capacidad para 440 cajas. Es necesario recalcar que cada en cada caja se pueden transportar 100 unidades de producto.

Por otra parte, la planeación de las rutas para satisfacer a los diferentes clientes la hace el jefe de transporte de la empresa dos veces por semana. La planeación realizada el día viernes se hace para las rutas a cubrir los días lunes y martes; por su parte, para las rutas de los días jueves y viernes se realiza la planeación el día miércoles. Como se mencionó anteriormente, la planeación se hace de manera intuitiva de acuerdo a los conocimientos de la persona y a la información que el área comercial le suministra en cuanto a pedidos.

Lo ideal de un sistema de ruteo eficiente es lograr un correcto aprovechamiento de la capacidad de los vehículos en cada uno de los viajes, recorriendo las mínimas distancias posibles y generando los menores costos, además de suplir la totalidad de la demanda de cada uno de los clientes y entregar el producto en las mejores condiciones.

El jefe de transporte manifiesta que se presenta una relación inversa en cuanto al porcentaje de ocupación de los vehículos y el costo de transporte por unidad de producto. Al realizar una comparación del promedio de los indicadores mencionados anteriormente para todas las zonas durante el periodo enero - junio de 2017 entre dos de los vehículos más utilizados, FTR y NQR, se obtuvo que los costos de transporte por unidad son de \$28.56 y \$42.5 y la tasa de ocupación es de 92% y 65.7% respectivamente. Lo anterior evidencia claramente el efecto que genera la baja de utilización de los vehículos sobre los costos de transporte.

Adicionalmente expresa que, debido a estos pedidos de último momento, en ocasiones es necesario enviar vehículos cargados hasta con un 10% de su

capacidad total para suplir la demanda de un solo cliente, ya que no se encuentra una forma eficiente de incluir estos pedidos de última hora en las rutas previamente asignadas, genera una situación en la que este tipo de clientes son atendidos por vehículos diferentes a los que se habían programado en las rutas originales. Se hace de esta forma dado que en ocasiones el tiempo para programar nuevas rutas incluyendo los pedidos de último momento, no es suficiente, ya que implicaría reprogramar algunos o todos los vehículos, variando en gran medida la programación que se tenía inicialmente. Esta forma de atender los pedidos de última hora genera un incremento en los costos de transporte por unidad de manera significativa y a su vez, genera un ruido en las medidas de los indicadores, afectando el promedio.

Debido a todo lo mencionado anteriormente, la empresa percibe una oportunidad de disminuir los costos de transporte al diseñar y evaluar el impacto que tendría un sistema de ruteo para la distribución de su producto.

1.2. Pregunta de investigación

¿Es posible disminuir los costos de transporte de la empresa basándose en un método de heurístico para el diseño de un sistema de ruteo?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el impacto económico de la creación de un modelo de ruteo de vehículos para la entrega de producto de una empresa avícola en el municipio de Guadalajara de Buga.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar una caracterización del estado actual del área de transporte y recopilar la información necesaria que permita evaluar la situación inicial de la empresa.
- Formular un modelo de ruteo basado en un método heurístico que permita realizar la distribución del producto de forma eficaz.
- Comparar el sistema de ruteo actual con el propuesto para determinar la incidencia de este último sobre el costo de transporte.

1.4. Justificación

Con este proyecto se pretende formular una alternativa de solución para el problema de asignación de rutas que presenta esta empresa en el área de transporte, es común que se presente problemas como los del agente viajero conocido como VRP (Olivera, 2004) en el cual es necesario determinar la secuencia de visita óptima para la disminución de parámetros como costos, tiempos de recorrido, entre otros. Para así lograr la optimización del sistema de ruteo.

En este tipo de problemas se tienen diferentes variaciones de acuerdo a las consideraciones que se tengan en cuenta, tales como ventanas de tiempo, entrega y recogida, flota mixta, flota homogénea, flota heterogénea, con restricciones de capacidad, tiempo y distancia, VRP estocástico, VRP difuso, VRP periódico, abierto, etc.

De acuerdo a las consideraciones mencionadas y las posibles soluciones, se analizan beneficios como apropiación del conocimiento por el desarrollo de actividades de ruteo en los cuales se generan diferentes alternativas de solución a problemas de enrutamiento de vehículos con métodos matemáticos, heurísticos y metaheurísticos teniendo en cuenta la aplicación en el campo laboral; también la empresa obtendría un beneficio por el estudio realizado que le servirá para la posible implementación y mejora de sus deficiencias en el área de transporte. Esta tendría una base de estudio para el desarrollo de un nuevo proyecto con un horizonte más amplio, una aplicación distinta o más específica.

Los resultados que se obtengan por medio de la solución se colocan a disposición de los requerimientos de la empresa para su utilización, como también para el uso de otro tipo de aplicaciones de los modelos de optimización, por ejemplo, de tipo académico o que sirva de plataforma para la reestructuración de problemas similares.

En el caso de que no se logre realizar el proyecto, se pierde la oportunidad de desarrollar una aplicación de los conocimientos y la teoría adquirida en la academia sobre casos que se presentan a diario en las empresas, como en el caso de los problemas de transporte con situaciones que limitan o que inhiben algunas posibles soluciones obvias y que permite el desarrollo de habilidades. También la investigación y autonomía en la adquisición del conocimiento para generar la solución o las posibles soluciones.

1.5. Marco teórico

El problema de ruteo de vehículos, o VRP por sus siglas en inglés (Vehicle Route Problem), es un problema matemático y de optimización que plantea la asignación adecuada de rutas para la distribución de mercancía desde un punto de origen a diferentes clientes utilizando una flota de vehículos. Debido a la gran cantidad de variables presentes en este problema, se considera de tipo NP-Hard debido a que no es posible resolverlos dentro de un tiempo polinomial (Rocha, González y Orejuela, 2011).

EL objetivo de la solución del VRP es minimizar los costos totales de transporte y cumplir con los requerimientos de todos los clientes utilizando una ruta óptima para cada vehículo. Además, se puede considerar como objetivos minimizar las distancias totales recorridas o los tiempos de distribución, aunque esto último está sujeto al caso de estudio o a los requerimientos de las empresas. Además, es necesario la capacidad de transporte de los vehículos y los costos asociados a cada uno de éstos (Rocha et al., 2011).

1.5.1. Componentes

Existen diferentes componentes que varían según el caso de estudio, entre éstos se encuentran: los vehículos, los clientes, los depósitos, las vías, las restricciones y los objetivos del problema (Arboleda, López y Lozano, 2016). Los requerimientos de los clientes deben ser satisfechos por los vehículos y éstos a su vez, cuentan con una capacidad limitada. Los vehículos deben volver al punto de origen o no, dependiendo del problema y los objetivos y las restricciones son propias del problema.

1.5.2. Variación del problema

Debido al origen práctico del problema y a la gran cantidad de variables a tener en cuenta en la solución del problema, se plantean diferentes variaciones del VRP que permiten abordarlo teniendo en cuenta diferentes restricciones. Según Arboleda et al. (2016), estas variantes se dividen así:

1.5.2.1. Variaciones clásicas:

En esta categoría se incluyen las variaciones más comunes del VRP, las cuales son:

- CVRP: Es un tipo de VRP en el cual se consideran restricciones de capacidad que implican que el vehículo no puede transportar una cantidad mayor de producto a la capacidad que posee. Por otra parte, el vehículo debe partir de un punto de origen y regresar al mismo una vez terminada la ruta. Cada nodo es visitado por un único vehículo y se tiene un costo asociado a cada visita. Hay dos tipos de CVRP: Simétrico (SCVRP) cuando el costo de ir de un nodo i a un nodo j es igual al costo de ir de un nodo j a un nodo i y asimétrico (ACVRP) en el caso contrario (Rocha et al., 2011).
- DCVRP: En esta variación hay dos restricciones principales: la capacidad del vehículo y la distancia de recorrido. Por este motivo, la distancia de un arco de recorrido para un solo vehículo no debe ser superior a la máxima distancia establecida (Tlili, Faiz, & Krichen, 2014).
- VRPTW: También conocido como VRP con ventanas de tiempo. Cuenta con la particularidad de tener una restricción en la cual sólo se puede visitar un nodo en un intervalo de tiempo específico (Sami & Kamel, 2013).
- VRPB: En este caso, los consumidores pueden demandar o entregar mercancías, se considera que la mercancía que se recoge cabe en el vehículo y que las cantidades a entregar y recoger son conocidas previamente (Rocha et al., 2011).
- VRPPD: En esta variación de VRP se pueden hacer entregas y recogidas simultáneas por devolución de mercancía. Se considera que se debe contar con espacio adicional en el vehículo (Arboleda, et al., 2016).

1.5.2.2. Otras variaciones:

Además de las variaciones mencionadas en el punto anterior, existen otras con niveles de complejidad un poco mayores y que han sido estudiadas recientemente, estas son:

- OVRP: El Open VRP o VRP abierto cuenta con la particularidad de que los vehículos no deben regresar al punto de origen una vez que visitan todos los nodos. Esto debido principalmente a que las organizaciones no son dueñas de la totalidad de los vehículos, por lo que tienen que recurrir a la subcontratación. La solución de este problema busca brindar a las organizaciones el número

mínimo de vehículos a subcontratar y así disminuir los costos (Arboleda et al., 2016).

- MDVRP: En el VRP con depósitos múltiples, como su nombre lo indica, se cuenta con depósitos ubicaciones en diferentes zonas geográficas estratégicamente ubicadas, las cuales se encuentran mezcladas con los nodos (Lau, Chan, Tsui, & Pang, 2010).
- MFVRP: Es un tipo de VRP con flota mixta, esto quiere decir que se cuenta con una flota heterogénea con costos variables de acuerdo a las distancias recorridas. Los costos de transporte se determinan sumando los costos fijos más los variables (Arboleda et al., 2016).
- Según Arboleda et al. (2016), actualmente existen tres tipos de MFVRP: Cantidades limitadas de cada tipo de vehículos, costos variables iguales para todos los vehículos y cantidades ilimitadas de cada tipo de vehículo y por último, diferentes costos variables y un número ilimitado de cada tipo de vehículo.
- PVRP: Es un VRP periódico, lo que significa que el periodo de planeación es superior a un día, por lo que se podrá visitar un nodo una o más veces dentro del mismo periodo. Se pretende minimizar el tiempo de recorrido total y la flota de vehículos (Cacchiani, Hemmelmayr & Tricoire, 2014).
- SVRP: A diferencia del VRP tradicional en el que los costos, demandas de los centros de consumo y tiempo de viaje de los vehículos son determinísticos, en el VRP estocástico uno o más de estos parámetros son aleatorios (Allahviranloo, Chow & Recker, 2014).

1.5.3. Métodos de solución

En lo que a los métodos de solución se refiere, existen tres grandes categorías: Métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos.

1.5.3.1. Exactos

Los métodos exactos son aquellos en los que logra una solución óptima. Según Laporte (1991), los métodos exactos de solución son eficientes sólo hasta una cantidad total de 50 clientes. A su vez, éstos se dividen en tres categorías:

métodos de búsqueda de árbol, programación dinámica y programación lineal entera.

En los métodos de búsqueda de árbol se realiza una búsqueda sobre cada uno de los nodos de un árbol de acuerdo a los criterios determinados por cada tipo de problema (Rocha et al., 2011).

En la programación dinámica es considerado un número fijo m de vehículos. En la primera etapa se halla el costo mínimo en el que se incurre utilizando un número k de vehículos incluyendo el costo asociado a la longitud de la ruta de cada vehículo sobre los vértices del subconjunto. Posteriormente se encuentra el costo de todos los subconjuntos con los m vehículos.

En los modelos de programación lineal entera se usan tres técnicas de solución (Rocha et al., 2011): Conjunto de particiones y generación de columnas, formulación de flujo de vehículos de tres índices y formulación de flujo de vehículos de dos índices.

1.5.3.2. Heurísticos

Los métodos heurísticos son métodos diseñados para obtener soluciones para un problema dado. La principal ventaja que ofrecen éstos frente a los métodos exactos es el reducido tiempo de solución, pero no aseguran que la solución sea óptima. Éstos se dividen en:

- Constructivos: Estos heurísticos van generando una solución factible a medida que transcurre el número de iteraciones en el algoritmo. Entre ellos se encuentran el Algoritmo de los Ahorros propuesto por Clarke and Wright en 1967 y sus mejoras y los heurísticos de inserción (Rocha et al., 2011).
- De dos fases: Estos métodos están comprendidos por métodos de asignación elemental, métodos de ramificación y acotamiento, algoritmo de pétalos, método de rutear primero y asignar después y procedimientos de búsqueda local (Rocha et al. 2011).
- De mejora: Son algoritmos que buscan mejorar los resultados de una solución ya obtenida. Entre ellos se encuentran los algoritmos de transferencias cíclicas, operadores de Van Breedam, Geni y Genius y el operador or-opt (Rocha et al. 2011).

1.5.3.3. Metaheurísticos

Las metaheurísticas son heurísticas que se emplean de forma general para resolver diferentes problemas los cuales no cuentan con un método de solución confiable. Entre las más comunes se encuentran los algoritmos genéticos, búsqueda de vecindarios variables, recocido simulado, búsqueda tabú, colonia de hormigas y enjambre de partículas (Lüer, Benavente, Bustos y Venegas, 2009).

1.5.4. Sistema de costos

Un sistema de costes puede ser definido como un conjunto organizado de criterios y procedimientos para la clasificación, acumulación y asignación de costes a los productos y centros de actividad y responsabilidad. Diseñada para facilitar la toma de decisiones por parte de la dirección de la empresa, así como para poder planificar y controlar posibles actividades futuras de la misma. (Pérez, Carballo Veiga, 2008).

De acuerdo a Lorences (2013) el sistema de costes a seleccionar para en una empresa concreta depende, entre otras variables, de las características de la misma (dimensión, número de productos o servicios prestados, peso de los costes directos y los variables sobre el total de los costes, etc.), del tipo de información disponible y del coste que esté dispuesto a soportar dicha empresa para elaborar el sistema de costes elegido. Puede tratarse de un sistema de costes completos o por absorción, costes variables o el desarrollo de un modelo integrador.

Hablaremos de un sistema de costes completos o por absorción cuando se distribuyan todos los costes de producción a los productos o servicios prestados, mientras que, si solamente se les asigna los costes variables estaremos ante un sistema de costes variables. En este caso los costes fijos que no se asignan al producto o servicio y son considerados costes del periodo, imputándose directamente a la cuenta de resultados (Lorences, 2013).

Por otro lado, Lorences (2013) afirma que en el método integrador también se imputan todos los costes (tanto variables como fijos) a los productos, pero estos últimos se asignan en función de un nivel de capacidad global y único para toda la empresa, establecida en función del cuello o cuellos de botella de la empresa.

La teoría del costo directo, variable o marginal considera inicialmente que el costo de producción de bienes o servicios sólo debe asumir los costos directos causados en la producción de los mismos, y adicionalmente contempla que el costo de ventas del bien o servicio debe incorporar todos los gastos directos de

distribución, comercialización, mercado y/o ventas plenamente identificados, para así determinar el costo total directo del bien económico, el cual permite obtener un margen de rentabilidad más razonable por producto o servicio que el calculado bajo la teoría del costeo por absorción.

Berrío y Castrillón (2008) hacen una excelente síntesis que aborda las ventajas, desventajas y diferencias de los métodos de costeo por absorción y variable, se citan a continuación:

Ventajas del costeo variable:

- Elimina las fluctuaciones en los costos por efecto de los diferentes volúmenes de producción.
- Facilita la elaboración del presupuesto de efectivo, debido a que normalmente los costos variables implican desembolsos.
- El hecho de no incluir en el costo del producto los costos indirectos fijos y mostrar este valor en forma aislada permite un mejor control de los costos fijos, ya que se pueden confrontar de un periodo a otro independiente de la producción.
- Las utilidades por costeo variable dependen de las ventas, mientras que en el sistema de costeo total se muestran más utilidades por el solo hecho de producir. Es lógico que las utilidades estén correlacionadas con las ventas y no con la producción.

Desventajas del costeo variable:

- La separación de los costos en variables y fijos es una labor difícil. Si no se realiza con cuidado genera errores en la valuación de los inventarios y, por consiguiente, en la determinación de la utilidad.
- Aún no es aceptado para reportes oficiales, lo cual implica llevar doble información: una para usuarios externos y otra para usuarios internos de la organización.
- Cuando las ventas son estacionales, períodos de grandes pérdidas son seguidos por períodos de grandes utilidades, lo cual desconcierta a cualquier usuario de la información.

Diferencias:

- El sistema de costeo variable considera los costos fijos de producción como costos del período, mientras que el costeo total los distribuye entre las unidades producidas.
- Para valorar los inventarios, el costeo variable sólo contempla los desembolsos variables, el costeo total incluye los fijos y variables.

- Las utilidades en uno u otro sistema varían cuando hay cambios en los inventarios, debido a la capitalización o no de los costos fijos.

1.5.4.1. Clasificación de los costos

Según (Lorences, 2013) como paso previo a su tratamiento en los sistemas de costes, es preciso agrupar los factores de producción atendiendo a su comportamiento de acuerdo a diversos criterios.

Así, una primera clasificación importante es aquella que los agrupa según su relación con los objetivos de coste, es decir, según sean directos o indirectos a tales objetivos de coste. Diremos que estamos ante un coste directo cuando es perfectamente identificable con el objetivo de coste considerado. Por el contrario, aquellos costes que no pueden identificarse individualmente con el objetivo de coste, haciendo necesario recurrir a criterios de reparto para poder aplicarlos, se considerarán costes indirectos, los cuales imputaremos a los objetivos de costes mediante los centros de coste creados previamente.

Frente al carácter directo o indirecto de los costes, existe otra clasificación importante de los mismos que se realiza atendiendo a su variabilidad con relación al nivel de actividad de la empresa, diferenciándolos entre fijos o variables.

Entenderemos como costes fijos aquellos que no se alteran al variar el nivel de actividad, se mantienen constantes sin afectarles los altibajos que puedan sufrir los bienes y servicios ofrecidos por la empresa. (García et al., 2010).

Por otro lado, se trata de coste variable cuando existe una correlación directa entre su importe y el nivel de actividad al que se refieren, en nuestro caso será el nivel de servicios prestados (Amat y Soldevila, 2008).

En una empresa de transporte, unos ejemplos de costes fijos son el personal o los seguros, ya que se mantienen constantes independientemente del nivel actividad, mientras que costes variables serían el combustible, los neumáticos etc.

1.5.4.2. Desarrollo del sistema de costos

El diseño de un sistema de costes eficaz requiere una orientación particular al área de transporte en concreto, por lo que será necesario estudiar las

características de la misma, así como del sector en el que se enmarca, previamente al desarrollo del mencionado sistema de costes.

Se trata pues de describir la estructura del área y cuantificar las distintas entradas incorporadas al proceso. Así mismo, será de gran utilidad clasificar las entradas de la prestación del servicio por su naturaleza, dividiéndolos en costes directos e indirectos y a su vez en fijos o variables, ya que esto permitirá un mayor detalle de la generación de costos. Una vez se tenga clara la naturaleza de los diversos costos, comienza la elaboración del sistema de costos propiamente dicho.

1.5.5. Estado del arte

La competencia es una característica del ámbito industrial durante el siglo XXI, la logística industrial ha sido usada por las empresas con el objetivo de generar ganancias, enfocados fuertemente en los sistemas de ruteo lo cual les permite la optimización de sus costos de transporte, distancias recorridas, tiempos de atención a sus clientes, entre otros. El establecimiento de las rutas de manera óptima, ha generado un alto interés investigativo; por ello la alta búsqueda respecto al tema de la programación de rutas VRP, con un sin fin de modelos con sus respectivas variaciones para el tratamiento de este tema logístico (Dorronsoro, Nebro, Arias y Alba, 2015).

Según Arboleda et al. (2016), una de las variaciones más presentadas durante el análisis de los sistemas de ruteo es el MFVRP (por sus siglas en inglés) y uno de los más complejos a solucionar por el tratamiento que se le debe realizar. Es común que las empresas cuenten con un grupo de vehículos con diferentes características, capacidades y principalmente diferentes costos.

Para el tratamiento de este problema se evidencia una forma de analizarlo de acuerdo a la respectiva variación que se presente. Por ejemplo, si se supone una flota limitada o ilimitada, se puede trabajar de diferentes formas. Se acuerdo al trabajo realizado por Cáceres, Grasas, Lourenco, Ángel, Roca y Colomé (2010), parten de la propuesta de aplicar un algoritmo randomizado para un problema de enrutamiento con flota heterogénea, en el cual un grupo de instancias de datos pertenecientes a una empresa de distribución española con una flota mixta de camiones, se trata con la combinación de dos algoritmos, el primero es la heurística paralela de los ahorros (CWS) con la simulación Montecarlo y la segunda son los generadores de números pseudoaleatorios. En este algoritmo una distribución casi geométrica selecciona al azar las aristas asociadas a los ahorros según las probabilidades de ser escogidas de acuerdo con su posición de ranking de ahorros. Por lo tanto, cada combinación de aristas tiene una

oportunidad de ser seleccionada y fusionada con un ahorro previamente escogido. Pero para el problema que plantean los autores, se usa un algoritmo con una variación del anteriormente mencionado, en el cual se combina la versión aleatoria de CWS y un método de búsqueda local (local search) basado en una memoria (caché), la cual permite almacenar las mejores rutas encontradas entre un grupo de nodos.

El problema posee restricciones como comenzar y terminar la ruta en el único depósito disponible, todos los clientes tienen que ser visitados una sola vez, deben de cumplir la demanda, no exceder las capacidades de los camiones y usar como máximo el número de autos disponibles. Con base en esto, se plantea el problema de acuerdo al modelo propuesto por Cáceres et al. (2010), se evalúa el rendimiento del algoritmo propuesto implementándolo en una aplicación de Java. Por último, como resultado después de poner a prueba a 25 instancias reales de la empresa, se obtiene que los resultados mostraron una mejoría respecto al plan de rutas implementado por la empresa actualmente.

Otro de los artículos que nutren cómo tratar el problema de la flota mixta en el enrutamiento es el planteado por Giesen y Muñoz (2007), en el cual proponen un método de solución al problema de ruteo de inventarios de múltiples productos para una flota heterogénea de naves utilizando un método heurístico. El sistema de funcionamiento es transportar múltiples productos desde distintos puertos de producción a un conjunto de puertos donde se consumen, cuenta con restricciones como:

- Respetar niveles de inventario en cada terminal.
- Acceso a terminales (calado y eslora).
- Estibas de las naves relacionadas a compatibilidad de productos en estanques contiguos y/o que comparten segregación.

Con la metodología desarrollada (Giesen y Muñoz, 2007), les permite determinar la asignación de una flota de naves a rutas y estanques a productos. En este sistema el distribuidor y sus clientes operan bajo contratos del tipo Vendor Managed Inventory (VMI) en los que el distribuidor toma control de los inventario de cada uno, asegurándose que se mantendrán niveles adecuados de inventarios, los autores plantean para dar solución al problema una formulación heurística debido a que la programación entera mixta (MIP) para el problema de ruteo de inventarios marítimo con múltiples productos (MIRP), después de un determinado

número de variables se vuelven poco prácticos por lo que demora en hallar una solución, entonces se desarrolló en tres etapas la búsqueda de la solución:

- Primero se utilizó una herramienta heurística de tipo constructivo en la que se aplica reglas para obtener una solución inicial factible. Para lograrlo, se considera sólo un subconjunto de rutas predefinidas. Estas son secuencias que comienzan en un puerto donde se produce y visitan una secuencia de terminales de consumo.
- Segundo se utiliza un procedimiento secuencial en el que se optimiza la programación de una nave a la vez, manteniendo la programación de las restantes naves fijas, sin considerar restricciones de compartimientos. Dado el conjunto de rutas factibles obtenidas en la primera etapa, se seleccionan las naves de una y se optimizan de nuevo sus rutas.
- Tercero, a partir del conjunto de rutas obtenidas en la etapa dos, se optimiza la asignación de productos considerando todas las restricciones en la asignación de producto-compartimiento, fijando las rutas obtenidas para cada nave en la etapa anterior, se optimizan las cantidades a cargar y descargar en cada parada en cada compartimiento considerando todas las restricciones de compatibilidad de productos.

Con lo que se concluye una vez realizado el procedimiento de desarrollo, los resultados iniciales demuestran reducciones en costos operacionales variables de casi un 10% y reducciones importantes en las penalidades por quiebres de inventario mínimos con respecto a planes realizados manualmente por personal experimentado en programación de naves.

Por otra parte, Escobar, Adarme y Clavijo (2016) realizaron una investigación para la solución de problemas de VRP con flota heterogénea y costos variables (HFVRP), haciendo una comparación de los resultados usando una inserción de vecindarios granulares en el método de búsqueda Tabú. En este trabajo se crea una solución inicial usando el método de búsqueda local, después se realiza una mejora de los resultados usando el método de búsqueda Tabú y posteriormente se hacen inserciones de vecindarios granulares. Los resultados del método propuesto se obtuvieron a partir de 180 simulaciones y de introducir primero una inserción de vecindario, posteriormente una inserción doble. Entre la solución inicial y la primera inserción no se presentó gran variación de los resultados de la función objetivo, en este caso el costo. Para la segunda inserción hubo variaciones que

superaron por cerca del 22% la solución inicial, y en el intercambio de vecindarios, los resultados superaron en un 29% los resultados de la anterior solución por lo que se concluye que este método puede llegar a ser sumamente eficiente en el problema de flota heterogénea con costos variables.

Con base en lo planteado por los diferentes autores, se observa que la variedad de problemas está relacionado a las variables que se tengan en un determinado planteamiento. Lograr la más concreta clasificación del problema a tratar, ayuda a que se facilite el método a usar para la solución de este, lo que se busca es crear formulaciones matemáticas, heurísticas y metaheurísticas como también procedimientos eficientes para problemas más generales y realistas (Luer, Benavente, Bustos y Banega, 2009).

De acuerdo a todo lo anterior, el VRP es un problema que se encuentra aún abierto, y que es un desafío en sí mismo, por todas las variantes que admite, y por la complejidad que presenta desarrollar un algoritmo que ayude a solucionar problemas reales (Baldacci, Battarra y Vigo, 2007).

Debido a la necesidad que las empresas poseen para la tener los mínimos costos posibles en sus sistemas de ruteo, hoy en día se han desarrollado una gran cantidad de software que vienen programados para determinar el mejor plan de ruteo con el menor costo posible. Estas herramientas que están en auge y que se han convertido en algo fundamental para la planeación de rutas, se caracterizan en cuanto al costo que poseen o si es un software libre que está a disposición de cualquier persona o entidad que pretenda o esté interesada en usarla. De acuerdo a Pedezert, Barreiro y Sosa (2009), algunos de los softwares comerciales que existen para la solución de enrutamiento de vehículos son DynaRoute, GeoRoute5, GeoPostal, SHIPCONS II, TransCad, Trapeze-Taxi, Direct Route, GeoRoute-Municipal, LoadExpress Plus, RiMMS, RoutePro Dispatcher, Routronics 2000, STARS, Optrak, TruckStops for Windows, ArcLogistics Route, entre otros.

También se encuentran algunos softwares libres que normalmente usan las pequeñas, medianas empresas y claro está las academias para el uso de los estudiantes, dentro de estos se encuentran Solver 1.3, LOGWARE y VRP Spreadsheet Solver (Erdogan, 2016), los cuales se han demostrado que, aunque sean libres y sin costo alguno, su rendimiento usando diferentes métodos de solución es muy bueno y eficaz.

1.6. Metodología

Para la realización del objeto de estudio como etapa inicial del proceso se hace necesario estudiar los diferentes tipos de problemas de ruteo de vehículos y las técnicas de solución respectivas, según la revisión del estado del arte, después se formula y se implementa la metodología de solución y por último se comparan los resultados obtenidos con los resultados del funcionamiento actual de la empresa tratada. Para llevar a cabo estas etapas es importante determinar el método más adecuado para la investigación, que permita dar solución al problema.

El método de investigación más apropiado a seguir es el experimental, ya que con el desarrollo de la metodología de solución para el problema del ruteo de vehículos con flota mixta y que de acuerdo a la bibliografía consultada se requiere encontrar una solución efectiva y óptima considerando el menor tiempo de procesamiento en los algoritmos de solución. También la búsqueda de rutas que minimicen el costo de transporte de acuerdo a la distancia recorrida por los vehículos y su capacidad. Para lograr esto se deben realizar pruebas y validar la solución encontrada con el propósito de conocer si la metodología desarrollada es adecuada y presenta resultados mejores que los que posee el funcionamiento de ruteo actual de la empresa.

Para el desarrollo de este trabajo a raíz de la cantidad de clientes, vehículos, capacidades y costos, pues se tiene un gran número de posibles combinaciones y sus respectivas soluciones, se tiene como una opción utilizar el método heurístico de Clark & Wright más conocido como el algoritmo de los ahorros para el manejo y la solución del problema planteado y teniendo en cuenta sus variaciones, este método es lo suficientemente flexible como para manejar un amplio rango de restricciones prácticas, siendo relativamente rápido de calcular en una computadora para problemas con un número moderado de paradas y capaz de generar soluciones que están cerca de lo óptimo (Ballou, 2004). El objetivo del método de los ahorros es minimizar la distancia total viajada por todos los vehículos y minimizar indirectamente el número de vehículos necesarios para atender todas las paradas.

Los principales pasos para el método de los ahorros son los siguientes:

- Identificar la matriz de distancias.
- Identificar la matriz de ahorros.
- Asignar clientes a los vehículos o rutas
- Secuenciar los clientes en las rutas.

El desarrollo metodológico está dividido en cuatro fases, las cuales describen el desarrollo del trabajo por medio de subitems. A continuación, se encuentran las fases y su subdivisión:

Fase I: Diagnóstico del problema:

- Descripción del problema.
- Determinación de objetivos a alcanzar.

Fase II: Caracterización del problema:

- Realizar la caracterización del estado actual del proceso de transporte para la recopilación de información.

Fase III: Identificación del modelo, elección del método y obtención de resultados:

- Determinar el modelo matemático.
- Definir el método a utilizar.
- Ejecución y obtención de resultados del método utilizado.

Fase IV: Validación de la solución:

- Comparar los resultados obtenidos por la caracterización realizada al estado actual del ruteo de la empresa, con los resultados arrojados por el modelo planteado y desarrollado en hojas programadas de Excel.

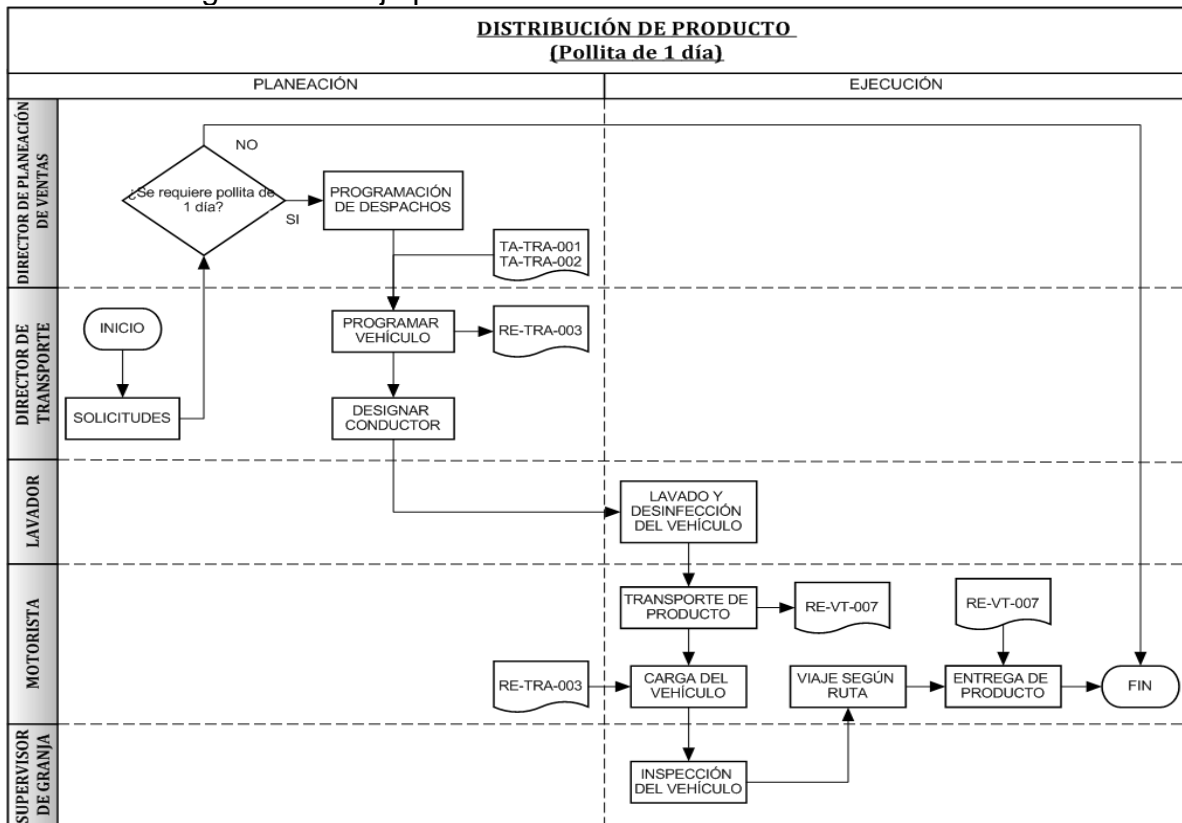
CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo está basado en el proceso de transporte, el cual abarca un gran número de actividades, por ende, se hará énfasis en aquellas actividades que tienen relación con toda la secuenciación de las pollitas de un día de nacidas.

El encargado del proceso es el director de transporte quien es el encargo de realizar la logística de transporte para las distintas actividades que deba desarrollar en el proceso, como lo son la programación del vehículo en el que se realizara el despacho, asignación de motorista para el viaje, asignación de ruta según el despacho, vehículo que se enviará y la forma de entrega del producto.

Se tiene como objetivo entregar el producto en óptimas condiciones en el sitio solicitado por los clientes y bajo las especificaciones de los mismos. El alcance del proceso inicia en el área de comercial el cual provee la información sobre los clientes a transportes y culmina con la entrega del pedido al cliente.

Gráfico 1. Diagrama de flujo proceso actual.



Fuente: Elaboración propia con base en manual de procedimientos.

En el gráfico 1 se muestra un diagrama de flujo donde se evidencian las actividades llevadas a cabo para este proceso.

A continuación, se hará la descripción del proceso en términos más detallados:

2.1. Actividades de planeación

- **Solicitudes:** El director de transporte recibe de parte de los diferentes departamentos las solicitudes para el transporte del producto, estas solicitudes de se pueden hacer de forma verbal o escrita.
- **Programación de despachos:** El área de comercial entrega la programación de despachos de producto que queda planteada desde la reunión de carga, la programación definitiva le es entregada al director de transporte por escrito un día antes del nacimiento programado. Una vez es recibida la programación de los despachos el director de transporte organiza los despachos teniendo en cuenta los de nivel nacional y los locales. La programación contiene primero la cantidad de producto a entregar, segundo el cliente al cual se le va a entregar y tercero la localización en la cual hay que entregar.
- **Programación de vehículos:** Una vez el director de transporte cuenta con la programación de despacho, procede a disponer el vehículo indicado para realizar la actividad especificada en cada programación. Para ello se tiene en cuenta la capacidad de los vehículos, los vehículos disponibles y las asignaciones. Para la selección del vehículo el director de transporte tiene en cuenta aspectos tales como:
 - Cantidad de producto a transportar
 - Capacidad de los vehículos
 - Disponibilidad de los vehículos
 - Nivel local o nacional
 - Edad del producto
 - Horario de salida de los despachos
- **Designar conductor:** El director de transporte al programar el vehículo designa automáticamente el motorista, cada motorista tiene asignado un vehículo; solo para los despachos nacionales de producto se utilizan dos motoristas.

2.2. Actividades de ejecución

- Transporte del producto: Una vez se confirma el despacho por parte del área de comercial, las facturas se generan en planta y son entregadas al motorista por el auxiliar de despacho o elabora un movimiento entre despachos, si el despacho es muy grande y debe de ser transportado en dos vehículos, este documento es elaborado en conjunto con el supervisor de planta.

Se envía una factura por el total del despacho y el auxiliar de despacho entrega la factura correspondiente del despacho al motorista para así comenzar el cargue del despacho y la salida del vehículo. Antes de realizar la carga el director de transportes elabora un recibo provisional de viáticos; denominado de caja menor, dicho documento debe ser presentado por el motorista al asistente de tesorería para desembolsar el dinero de los viáticos

- Carga del vehículo: El director de transporte da la orden de cargar cada uno de los vehículos, se trae el vehículo preparado y se coordina la ejecución del cargue. Se entrega el productor y con la presencia de un supervisor se elabora la carga del vehículo de tal forma que facilite el descargue teniendo en cuenta el orden de entrega. Se le entregan los recibos y registro de recorrido una vez termina de cargar y queda a disposición para partir.
- Control e inspección del vehículo: En portería se realiza el control y la inspección del vehículo a salir, se hacen las anotaciones necesarias de acuerdo a las facturas y movimientos entre dependencias. En la bitácora queda registrado la hora de llegada, hora de salida, tipo de producto, vehículo y motorista.
- Viaje según ruta, cliente o ciudad: Una vez superado los controles, se encamina el viaje con la debida información de la ruta a seguir para la entrega del producto, dicha información puede ser escrita o en mapas.
- Entrega de producto: Una vez se llega al destino, se corrobora la información sobre el pedido con el cliente en ese día, se procede al descargue del producto, en ocasiones es necesario elaborar un conteo del producto por solicitud del cliente y hace firmar un registro de recibido.

2.3. Actividades de verificación

- Revisión de facturas: Una vez llega el motorista de hacer su recorrido, se rectifican las facturas y los recibos del gasto de los viáticos durante el viaje, esto para rectificar el uso de recursos y el cumplimiento de estos.

2.4. Actividades de ajuste, correctivas y/o preventivas:

- Control y medición de vehículos: Una vez llega el vehículo a la planta se le examina el estado del vehículo y principalmente los galones de combustible con los que ingresa y si estos son acordes con el consumido durante el viaje.

2.5. Personal, recursos y documentación del proceso

Personal:

Dentro de este proceso participan 4 cargos que realizan las actividades de la siguiente manera:

- Director de planeación de ventas: Programación de despacho y transporte y despacho del producto.
- Director de transporte: Solicitudes, programación de despacho, programación del vehículo, designar conductores, transporte y despacho del producto.
- Motorista: Transporte y despacho del producto, cargue y el viaje y la entrega.
- Supervisor de granja: Inspección.

Recursos:

Como se mencionó anteriormente en este documento, la empresa cuenta con 18 camiones para realizar la distribución del producto. Estos cuentan con diferentes capacidades y a su vez con diferentes costos fijos y variables. En la tabla 1 se muestra los detalles de capacidad de cada uno de los vehículos.

Tabla 1. Capacidad de carga de los vehículos.

CANTIDAD	MARCA	TIPO	CAPACIDAD (CAJAS DE CARTÓN)
1	CHEVROLET	NPR	264
2	CHEVROLET	NPR	352
8	CHEVROLET	NQR	352
4	CHEVROLET	FRR	396
2	CHEVROLET	FTR	440
1	CHEVROLET	KODIAK	440

Fuente: Información suministrada por la compañía.

Documentación asociada al proceso:

El proceso de transporte posee una gran variedad de registros y tablas. Para la realización de este trabajo solo se mencionan y se describen las necesarias para el objetivo de desarrollo del mismo. A continuación, se mencionan y se describen la utilidad de cada registro:

- *Programa de recorrido RE-TRA-003*: Este registro hace referencia a la constatación de los clientes a visitar, rutas a tomar y cantidad de producto a llevar.
- *Reporte de consumo de combustible RE-TRA-002*: Este registro es utilizado para determinar el gasto realizado en el recorrido por cada vehículo en una determinada ruta.
- *Recibo provisional de viáticos RE-TRA-001*: Este registro es utilizado para determinar el costo del viaje en cuanto a viáticos se refiere, este se constata con las facturas traídas por el motorista y se verifica que el dinero no se malgastó y si se cumplió con lo que está consignado.

Factura de venta RE-VT-007: Este registro es el que se le otorga al motorista en la zona de despacho para autorizar el cargue del producto y las cantidades solicitadas al camión, también es el que se firma como recibido una vez entregado el producto.

2.6. Costos

2.6.1. Enfoque de costos de transportes

Para este caso de estudio se tiene que los costos directos variables son los que se verán afectados de acuerdo a la actividad. Una vez se programen las rutas de acuerdo a las restricciones, se tendrá el recorrido establecido y para ello un costo asociado por kilómetro para cada uno de los vehículos utilizados; por ende, es este costo el que mas incide en resultado total, los costos directos fijos se asociaran a la carga del costeo de acuerdo a un periodo establecido, esto de acuerdo a que los costos se cargan de manera mensual indiferentemente de la cantidad que de distancia recorrida.

Con base en lo anterior se tiene que el enfoque de costos de transporte indicado para este caso de estudio es un sistema de costos variables o directos. Basándose en esto, el sistema de costeo variable considera los costos fijos de transporte como costos del período y los variables los computa como el costo del transporte donde sólo se considera el valor de los insumos que son vitales para la realización de la actividad.

2.6.2. Clasificación de los costos

Se empieza por clasificar los costos según se imputen directa o indirectamente a los vehículos o a las rutas. También se muestra su distinción entre fijos o variables teniendo en cuenta que, aquellos costes que tengan naturaleza variable van a cambiar en función del número de kilómetros recorridos.

Por otra parte, los costes considerados fijos, tanto directos como indirectos, no suelen sufrir alteraciones en relación a los cambios en el nivel de actividad, pero si cabe resaltar que, dependiendo del tipo de coste de que se trate, podrán estar vinculados al tiempo de actividad anual o mensual, al tamaño del vehículo o incluso en su totalidad al propio vehículo del que derive (como por ejemplo el salario del conductor).

Se debe aclarar que se mostraran todos los ítems que un enfoque de costos de transporte debe tener, pero esto no quiere decir que todos vayan a ser incluidos o se vayan a considerar para el desarrollo del estudio a realizar. Por lo tanto, se tendrán algunos supuestos en los costos a considerar.

A continuación, en las tablas 2 y 3, se muestra el esquema de clasificación para los diferentes conceptos de coste:

Tabla 2. Costos relacionados a las rutas.

TIPO DE COSTO	CONCEPTO
COSTOS DIRECTOS Y VARIABLES	PEAJES
	MERCADOS
	VIÁTICOS (operarios de transporte)

Fuente: Aplicación de un sistema de costos completos a una empresa de transporte, Nuria Lorences (2013).

Tabla 3. Costos relacionados a los vehículos.

TIPO DE COSTO		CONCEPTO
COSTOS DIRECTOS	COSTOS FIJOS	PERSONAL (operarios de transporte)
		MANTENIMIENTO AJENO
		AMORTIZACIÓN (vehículos, equipos de frío, semirremolques)
		SEGUROS (seguro obligatorio, responsabilidad civil limitada, seguro de conductor y seguros de la carga)
		CARGAS FISCALES (visado de tarjeta, ITV, impuesto de vehículo)
	COSTOS VARIABLES	DEPRESIACIÓN (vehículos)
		COMBUSTIBLE
		NEÚMATICOS
		MANTENIMIENTO DIARIO
		PROVISIÓN DE MULTAS
COSTOS INDIRECTOS	COSTOS FIJOS	PERSONAL AUXILIAR
		PERSONAL ADMINISTRATIVO
		AMORTIZACIÓN (maquinaria de combustible y lavado)
		ARRENDAMIENTO (nave y parcela)

Fuente: Aplicación de un sistema de costos completos a una empresa de transporte, Nuria Lorences (2013).

Por otra parte, se realizó un análisis de los costos asociados a cada tipo de vehículo acorde a la información emitida por la empresa y también de acuerdo al tipo de problema de transporte que se está trabajando en este caso de estudio. Los costos asociados se dividen en costos fijos y en costos variables, los costos fijos hacen referencia a los costos asociados a la tenencia de los vehículos independientemente del uso que se les dé a estos. Dentro de los mismo se incluyen la depreciación, el SOAT (seguro obligatorio de accidentes de tránsito, que es obligatorio en todo vehículo motorizado en Colombia), el impuesto para camiones de carga, el salario del conductor, las prestaciones sociales del mismo y el costo por monitoreo satelital de cada uno de los vehículos. Estos datos fueron obtenidos mediante diversas reuniones con las personas del proceso de

transporte de la empresa caso de estudio. Por practicidad en este documento se mostrarán los datos para un solo tipo de vehículo que corresponde al Chevrolet NPR (Los costos fijos de los demás vehículos se encuentran en el anexo 2).

Tabla 4. Costos fijos vehículo NPR.

COSTOS FIJOS NPR		
RUBRO	COSTO TOTAL	COSTO MENSUAL
Depreciación*	\$ 117.900.000	\$ 1.403.571
	7 años	
SOAT*	\$ 595.800	\$ 49.650
Impuesto para camiones de carga	\$ 117.900.000	\$ 343.875
	3,50%	
Salario del conductor	\$ 827.000	\$ 827.000
Prestaciones sociales del conductor	\$ 827.000	\$ 70.295
	8,50%	
Monitoreo	\$ 65.000	\$ 65.000
Salario de en cargado de mantenimiento	\$ 1.700.000	\$ 94.444
	18 vehículos	
Salario de en cargado de monitoreo	\$ 973.000	\$ 54.056
	18 vehículos	
TOTAL		\$ 2.907.891

Fuente. Información suministrada por la compañía.

Aquellos rubros que están señalados con un asterisco (*), varían para los diferentes tipos de vehículos con los que cuenta la empresa. Lo anterior se debe principalmente al precio de los mismos, al tamaño y a la capacidad de carga. En la tabla 6 se pueden observar los costos fijos totales para cada tipo de vehículo.

Para el caso de los costos variables, se tuvieron en cuenta aquellos referentes al mantenimiento de los vehículos. Para ello se realizó una visita al centro de mantenimiento oficial para camiones de la marcha Chevrolet. En este lugar se recopiló información de los costos y la frecuencia con que se deben realizar los mantenimientos a los diferentes sistemas de los vehículos los cuales incluyen motor, sistema de refrigeración, embrague, caja de cambios, ejes, suspensiones dirección, frenos, sistema de combustible y llantas además del consumo de combustible de cada uno de los vehículos. Una vez obtenidos estos datos, se dividió el costo de cada rubro entre la frecuencia de realización que está dada en

Km y se obtuvo el costo por Km recorrido para cada uno de los vehículos. En la tabla 5 se puede observar con detalle cada uno de los rubros mencionados anteriormente.

Tabla 5. Costos variables vehículo NPR

COSTOS VARIABLES NQR			
RUBRO	FRECUENCIA (Km)	COSTO	COSTO POR KM (\$/Km)
MOTOR			\$ 41.51
Aceite de motor	6,000	\$ 122,300.00	\$ 20.38
Filtro de aceite de motor	6,000	\$ 48,203.95	\$ 8.03
Filtro de combustible	12,000	\$ 24,762.00	\$ 2.06
Filtro de combustible trampa	12,000	\$ 121,177.00	\$ 10.10
Correa de motor	48,000	\$ 44,627.00	\$ 0.93
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			\$ 2.91
Líquido de refrigeración	48,000	\$ 124,928.00	\$ 2.60
Termostato baja temperatura	120,000	\$ 36,466.22	\$ 0.30
EMBRAGUE			\$ 10.25
Líquido de embrague	24,000	\$ 4,241.04	\$ 0.18
Prensa, disco y balineras	120,000	\$ 1,209,231.86	\$ 10.08
CAJA DE CAMBIOS (TRANSMISIÓN)			\$ 0.98
Aceite de caja de velocidades	48,000	\$ 47,050.00	\$ 0.98
EJE TRASERO (DIFERENCIAL)			\$ 2.60
Aceite de diferencial	48,000	\$ 72,000.00	\$ 1.50
Retenes de ruedas traseros (externos)	48,000	\$ 28,932.88	\$ 0.60
Retenes de ruedas traseros (internos)	48,000	\$ 23,837.00	\$ 0.50
SUSPENSIÓN DELANTERA Y TRASERA			\$ 3.99
Amortiguadores traseros	120,000	\$ 257,357.00	\$ 2.14
Amortiguadores delanteros	120,000	\$ 221,819.84	\$ 1.85
DIRECCIÓN			\$ 5.01
Retenes ruedas delanteras	48,000	\$ 26,612.28	\$ 0.55
Grasa ruedas delanteras	48,000	\$ 33,800.00	\$ 0.70
Alinear dirección	12,000	\$ 45,000.00	\$ 3.75
FRENOS			\$ 5.79
Bandas delanteras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Bandas traseras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Líquido de frenos	12,000	\$ 16,964.00	\$ 1.41
SISTEMA DE COMBUSTIBLE			\$ 3.75
Limpieza de tanque de combustible	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
Limpieza de inyectores	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
LLANTAS			\$ 493.89
Llantas traseras y delanteras (x6)	40,000	\$ 950,000.00	\$ 142.50
COMBUSTIBLE*			\$ 351.39
Galón de Diesel*	23	\$ 8,082.00	\$ 351.39
TOTAL			\$ 922.07

Fuente: Taller de mantenimiento Chevrolet.

Al igual que en los costos fijos, aquellos rubros que están marcados con un asterisco (*) varían de acuerdo al tipo de vehículo y se pueden observar los costos variables totales en la tabla 6 (Para conocer en detalle los costos variables de cada vehículo ver anexo 3).

En la tabla 6 se pueden observar tanto los costos fijos como variables para todos los tipos de vehículos.

Tabla 6. Relación costos generales

RELACIÓN DE COSTOS GENERALES					
	NPR	NQR	FRR	FTR	KODIAK
COSTOS FIJOS (\$/MES)	\$ 2.907.891	\$ 2.995.143	\$ 4.007.643	\$ 4.115.643	\$ 4.146.768
COSTOS VARIABLES (\$/Km)	\$ 922,07	\$ 922,07	\$ 1.070,03	\$ 1.315,53	\$ 1.318,96

Fuente. Elaboración propia.

Los cálculos de los costos fijos y variables para cada uno de los otros vehículos se encuentran en los anexos 2 y 3 respectivamente.

2.7. Consideraciones y supuestos:

Para este caso de estudio no se tuvo en cuenta ciertos costos y se obviaron ciertas restricciones. A continuación, se muestran todo aquello que no fue incluido o considerando en el caso de estudio:

Costos relacionados a las rutas

- Costos directos variables:
 - Peajes: No se tuvieron en cuenta para calcular el costo de los recorridos realizados debido a que en la heurística propuesta el único factor que influye en la decisión de qué nodos unir es la distancia entre estos.
 - Viáticos para alimentación: Para efectos prácticos, no se tuvieron en cuenta dado que es decisión del director de transporte cuánto asignar a cada conductor.
 - Mercados: No se tomaron en cuenta debido a que los camiones solo distribuyen el producto a los clientes, y no se realizan cargas o descargas en centros de acopio por lo que no se incurre en este tipo de costos.

Costos relacionados a los vehículos:

- Costos directos fijos:
 - Mantenimiento ajeno: De acuerdo a la información emitida por la empresa no se tiene registro de este tipo de mantenimientos, debido a que son fallos que no se pueden estimar, suelen ser reparaciones correctivas que suceden de forma espontanea (Fallos de motor, fallo de luces, etc.) o de diferentes sistemas.
 - Amortización – Vehículos: No se considero debido a que no se tiene deuda de estos, son vehículos propios.
 - Costos de capital: No se considera dado que no se evalúa el rendimiento que puede generar la tenencia o adquisición de vehículos.

- Costos directos variables:
 - Imprevistos o multas: No se incluyen costos de imprevistos, multas o accidentes debido a que son eventos aleatorios cuya ocurrencia es sumamente difícil de predecir.

- Costos indirectos fijos:
 - Más de un conductor o personal auxiliar: Dentro de los costos fijos solo se reconoció un salario mensual, debido a que son escasas las situaciones en las que se requiere más de un conductor para las rutas y esta decisión la toma el director de transporte.
 - Personal administrativo: No se abordó en el estudio de costos porque se aislaron exclusivamente los costos asociados a la actividad del ruteo y con ello poder ver la incidencia de este respecto al producto transportado (costo de transporte x unidad).
 - Maquinaria de apoyo: Por recomendación de la empresa y por cuestiones de confidencialidad, no fue proporcionada la información.
 - Arrendamientos: No se presenta ningún arrendamiento, todo es propiedad de la empresa.

Restricciones y supuestos propios del ruteo:

- Restricción de distancias: Debido a que los vehículos pueden reabastecerse de combustible en las estaciones distribuidas en las diferentes vías, estos pueden recorrer distancias mayores a la autonomía que representa un solo tanque de combustible lleno.

- Disponibilidad de las vías: Se asume que no se presentan inconvenientes en ninguna de las vías por lo que cualquier par de nodos se pueden unir sin ningún inconveniente.
- Disponibilidad de vehículos: Se asume que todos los vehículos están disponibles en el momento que se va a realizar la planeación de las rutas.

2.8. Resultados

Una vez calculados los costos fijos y variables, se determinó la tasa de ocupación de cada uno de los vehículos en cada que realizó durante los cuatro meses. Para realizar este cálculo se utilizó la ecuación 1.

$$Tasa\ de\ ocupación = \frac{Carga\ del\ vehículo}{Capacidad\ del\ vehículo} * 100 \quad (1)$$

Al obtener las distancias que recorrió cada vehículo por fecha, se multiplicó los costos variables generales (\$/km) por la distancia y se sumaron los costos fijos, aclarando que estos se anexan de forma mensual, es decir que abarcan un total ocho o nueve recorridos realizados. Así se determinó el costo total de ruteo y la tasa de ocupación que tuvo cada vehículo durante cada uno de los cuatro meses de estudio.

En la tabla 7 se observa la recopilación de los datos para un vehículo KODIAK, de la misma forma se realizó para los demás 17 vehículos, en la cual se incluyen los datos obtenidos de la empresa, las distancias de cada ruta, los costos fijos y variables y las de ocupación de cada ruta.

Tabla 7. Distancia y costos del recorrido vehículo KODIAK

FECHA	CLIENTE	CANT POLLOS	UNID X CAJA	CANT CAJAS	LATITUD	LONGITUD	DISTANCIA (Km)	COSTO VARIABLE	COSTO TOTAL MENSUAL	% OCUPACION
6/10/2018	Cliente 1	34000	85	408	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03	\$ 5.425.444,04	94,88%
10/10/2017	Cliente 2	28000	85	336	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		78,14%
13/10/2017	Cliente 3	28000	85	336	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		78,14%
17/10/2017	Cliente 4	25000	85	300	3,62	-76,39	93	\$ 162.338,79		69,77%
20/10/2017	Cliente 5	34000	85	408	6,22	-75,53	746	\$ 1.302.201,45		94,88%
24/10/2017	Cliente 6	28000	85	336	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		78,14%
28/10/2017	Cliente 7	33000	85	396	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		92,09%
28/10/2017	Cliente 8	29000	85	348	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		80,93%
31/10/2018	Cliente 9	25000	85	300	4,49	-75,73	237	\$ 413.702,07		69,77%
31/10/2018	Cliente 10	25000	85	300	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		69,77%
3/11/2017	Cliente 11	29000	85	348	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03	\$ 5.682.916,84	80,93%
3/11/2017	Cliente 12	33000	85	396	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		92,09%
7/11/2017	Cliente 13	39000	100	390	3,84	-76,30	32,5	\$ 56.731,30		90,70%
7/11/2017	Cliente 14	25000	85	300	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		69,77%
10/11/2017	Cliente 15	33000	85	396	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		92,09%
14/11/2017	Cliente 16	20000	85	240	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		55,81%
14/11/2017	Cliente 17	30000	85	360	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		83,72%
17/11/2017	Cliente 18	16000	100	160	3,88	-76,31	23	\$ 40.148,30		37,21%
17/11/2017	Cliente 19	35000	85	420	6,22	-75,53	746	\$ 1.302.201,45		97,67%
21/11/2017	Cliente 20	33000	85	396	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		92,09%
24/11/2017	Cliente 21	30000	85	360	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03	\$ 3.178.884,70	83,72%
28/11/2017	Cliente 22	30000	85	360	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		83,72%
1/12/2017	Cliente 23	25000	85	300	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		69,77%
5/12/2017	Cliente 24	33000	85	396	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		92,09%
12/12/2017	Cliente 25	30000	85	360	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		83,72%
15/12/2017	Cliente 26	33000	85	396	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		92,09%
19/12/2017	Cliente 27	30000	85	360	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		83,72%
27/12/2017	Cliente 28	28000	85	336	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		78,14%
5/01/2018	Cliente 29	31000	85	372	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		86,51%
23/01/2018	Cliente 30	30000	85	360	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03		\$ 2.073.933,60
26/01/2018	Cliente 31	25000	85	300	3,15	-76,60	211	\$ 368.317,03	69,77%	

Fuente. Elaboración propia.

El siguiente paso fue realizar un resumen de los costos por camión y por mes. Para ellos se sumaron los costos variables de las rutas realizadas en cada mes por vehículo y se le adicionó los costos fijos del vehículo, de esta forma se obtuvieron los costos totales tanto del mes como el total del periodo de estudio. Para este caso se considera cada vehículo de manera individual dado que han realizado diferentes rutas y representan diferentes costos. En la tabla 8 se muestra los resultados obtenidos.

Tabla 8. Costos totales del periodo evaluado.

TIPO	COSTO MES				COSTO TOTAL
	OCT	NOV	DIC	ENE	
KODIAK	\$ 7.514.080	\$ 7.708.626	\$ 5.816.575	\$ 4.981.671	\$ 26.020.952
NPR 1	\$ 18.465.725	\$ 16.176.462	\$ 8.515.690	\$ 13.426.255	\$ 56.584.132
NQR 1	\$ 11.417.574	\$ 11.522.598	\$ 10.689.340	\$ 13.207.684	\$ 46.837.196
NPR 2	\$ 17.300.144,14	\$ 16.919.808,12	\$ 11.729.864,61	\$ 10.448.425,08	\$ 56.398.242
NQR 2	\$ -	\$ 3.718.536	\$ 3.399.748	\$ 3.535.588	\$ 10.653.872
NQR 3	\$ 7.495.728	\$ 6.716.153	\$ 5.549.991	\$ 6.768.223	\$ 26.530.095
NQR 4	\$ 15.871.963	\$ 13.793.506	\$ 5.706.928	\$ 11.287.147	\$ 46.659.543
NQR 5	\$ 13.837.597	\$ 13.895.872	\$ 5.840.656	\$ 15.173.862	\$ 48.747.986
FRR 1	\$ 18.091.321	\$ 15.244.518	\$ 13.501.446	\$ 15.741.223	\$ 62.578.508
NQR 6	\$ 12.705.477	\$ 13.624.783	\$ 7.479.177	\$ 15.133.476	\$ 48.942.912
FRR 2	\$ 14.177.702	\$ 15.526.469	\$ 15.127.350	\$ 10.563.505	\$ 55.395.027
NQR 7	\$ 14.554.231	\$ 10.281.905	\$ 10.348.663	\$ 10.563.505	\$ 45.748.303
FRR 3	\$ 16.688.517	\$ 14.226.067	\$ 10.694.234	\$ 14.895.689	\$ 56.504.507
NQR 8	\$ 14.483.231	\$ 13.816.205	\$ 11.310.199	\$ 14.982.994	\$ 54.592.628
FRR 4	\$ 14.841.653	\$ 13.485.930	\$ 12.555.008	\$ 13.807.687	\$ 54.690.279
FTR 1	\$ 7.001.925	\$ 6.472.317	\$ 5.308.964	\$ 6.195.529	\$ 24.978.736
FTR 2	\$ 13.842.914	\$ 13.033.044	\$ 10.325.517	\$ 12.733.537	\$ 49.935.012
NPR 3	\$ 6.001.026	\$ 6.520.797	\$ 3.474.817	\$ 7.234.232	\$ 23.230.872
TOTAL	\$ 224.290.806	\$ 212.683.597	\$ 157.374.166	\$ 200.680.232	\$ 795.028.801

Fuente. Elaboración propia.

Al igual que con los costos, se determinó el promedio de la tasa de ocupación mensual por mes y por vehículo, el promedio total mensual y total por vehículo y el promedio total de la tasa ocupación.

Tabla 9. Promedio de tasa de ocupación de los vehículos.

TIPO	PROM OCUPACION MES				OCU. PROM
	OCT	NOV	DIC	ENE	TOTAL
KODIAK	81%	80%	83%	80%	81%
NPR 1	53%	65%	58%	59%	59%
NQR 1	68%	65%	56%	68%	64%
NPR 2	84%	66%	73%	85%	77%
NQR 2	0%	58%	65%	45%	56%
NQR 3	55%	47%	43%	58%	51%
NQR 4	79%	64%	70%	66%	70%
NQR 5	72%	78%	82%	65%	74%
FRR 1	82%	73%	71%	79%	76%
NQR 6	77%	67%	88%	72%	76%
FRR 2	73%	81%	54%	75%	71%
NQR 7	61%	66%	61%	72%	65%
FRR 3	70%	79%	81%	69%	75%
NQR 8	67%	64%	60%	60%	63%
FRR 4	63%	73%	80%	86%	75%
FTR 1	83%	73%	81%	77%	78%
FTR 2	84%	85%	81%	77%	82%
NPR 3	41%	37%	32%	46%	39%
TOTAL	66%	68%	68%	69%	68%

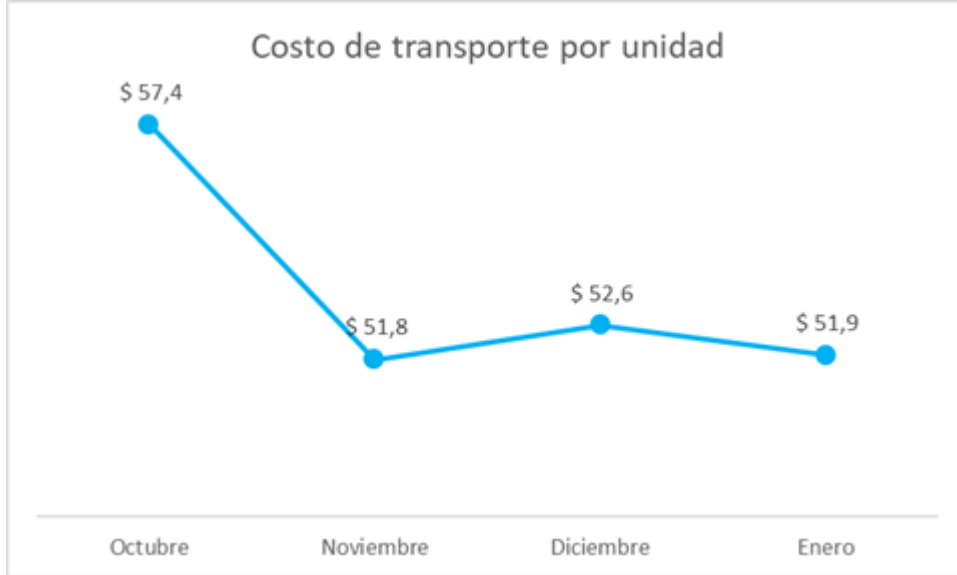
Fuente: Elaboración propia.

Para poder medir y controlar de forma efectiva los costos en los que incurre el proceso de transporte es necesario contar con un indicador que refleje los costos en términos de unidades entregadas, para ello la empresa cuenta con indicador que mide el costo de transporte por unidad y se calcula como se muestra en la ecuación 2.

$$\text{Costo de transporte por unidad} = \frac{\text{Costo total mensual}}{\text{Número de unidades transportadas}} \quad (2)$$

Al seleccionar el indicador a usar, se procede a realizar el cálculo. Para esto se usaron los datos suministrados por la empresa en cuanto al número de unidades entregadas y los costos totales mensuales de la tabla 8. En el gráfico 2 se puede evidenciar el comportamiento que tuvo el indicador en los cuatro meses de estudio.

Gráfico 2. Costo de transporte por unidad.



Fuente: Elaboración propia.

Ya obtenidos los costos totales de transporte, la tasa de ocupación y el costo por unidad transportada, se procede con el desarrollo del modelo. Los parámetros mencionados anteriormente servirán como base de comparación para comprobar la efectividad del método propuesto al evaluar las variaciones que se presenten en estos y verificar si se presenta o no un ahorro al usar este método.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO

3.1. Modelo matemático

Para el problema y la situación presentada en este trabajo, es necesario analizar la estructura y los fundamentos de cómo abordar un problema de ruteo con vehículos de flota heterogénea. El modelo matemático utilizado como base para el análisis, comprensión y punto de partida para las experimentaciones de este trabajo teniendo en cuenta que se usará el algoritmo de los ahorros, es el propuesto por Baldacci et al. (2007).

El problema de ruteo de vehículos heterogéneo (HVRP por sus siglas en inglés) consiste en diseñar un conjunto de rutas empleando una flota de vehículos de diferente capacidad hacia un conjunto de clientes distribuidos geográficamente.

El HVRP se define como:

Sea $A = \{0, 1, \dots, n\}$ el conjunto de $n+1$ nodos y B como el conjunto de arcos, el nodo 0 representa la planta, mientras que los clientes a satisfacer están denotados como $A' = \{1, \dots, n\}$. Cada cliente $i \in A'$ tiene su demanda asociada d_i ; la línea de vehículos se compone por h vehículos diferentes con $V = \{1, \dots, h\}$, donde h_k son los vehículos disponibles en la planta, cada uno con una capacidad Q_k .

Cada tipo de vehículo tiene asociado un costo fijo específico que va determinado por el uso o requerimiento que este necesite al momento de cubrir las rutas, también por cada arco $(i, j) \in B$ y cada vehículo $k \in V$ se tiene un costo de ruteo asociado (C_{ijk}) .

Entonces se tiene que una ruta para este tipo de situaciones se define como el par (R, k) , donde $R = (i_1, i_2, \dots, i_R)$, con $i_1 = i_R = 0$ y $\{i_2, \dots, i_{R-1}\} \subseteq A'$; una ruta (R, k) es factible si la demanda total de los clientes visitados no excede la capacidad del vehículo (Q_k). El costo de la ruta corresponde a la suma de los costos de los arcos (distancias) que conforman la rutas y más el costo fijo asociado a cada vehículo.

A continuación, se presenta el modelo matemático mencionado para el problema de ruteo con vehículos con capacidades heterogéneas:

- Parámetros y sub conjuntos:

- n = Número de clientes.
- $A = \{0, 1, \dots, n\}$ conjunto de los índices de los nodos, teniendo con el valor de 0 a la planta y generando el subconjunto $A' = A \setminus \{0\}$ que indica los índices correspondientes a los clientes.
- d_i = Demanda del cliente i .
- C_{ij}^k = Costo por utilizar el arco (i, j) con el vehículo k .
- $V = \{1, \dots, m\}$ conjunto de tipos de vehículos disponibles en la planta.
- h_k = Número de vehículos del tipo k disponibles, $k \in V$.
- Q_k = Capacidad del vehículo k .
- Cf_k = Costo fijo específico por tenencia del vehículo k .

- Variables del problema:

Para la modelación de un problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea se necesitan dos tipos de variables, las variables de decisión que nos dicen que arco toman los vehículos en la solución final y las variables secundarias, que miden cuánta carga lleva el vehículo brindando apoyo en cuanto a restricciones y definición del modelo.

La variable de decisión X_{ij}^k es una variable binaria que indica si el vehículo k viaja directamente del cliente i al cliente j , tomando valores como:

- $X_{ij}^k = \{1, \text{ si el arco } (i, j) \text{ es visitado por el vehículo } k$
 $\{0, \text{ de lo contrario.}$

La variable secundaria Y_{ij} especifica la cantidad de producto que lleva un vehículo al dejar el cliente i para visitar el cliente j .

- Función objetivo:

Minimizar el costo de la solución final.

$$\text{Min } z = \sum_{k \in V} \sum_{j \in A'} Cf_k * X_{0j}^k + \sum_{k \in V} \sum_{\substack{i, j \in A \\ i \neq j}} C_{ij}^k * X_{ij}^k \quad (3)$$

- Restricciones:

1. Cada cliente es visitado una sola vez por un solo vehículo.

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in A} X_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in A' \quad (4)$$

2. Se asegura de la suma de vehículos del tipo k que salen desde el depósito al cliente j, no sea superior a la cantidad de vehículos del mismo tipo disponibles en ese momento en el depósito.

$$\sum_{j \in A'} X_{0j}^k \leq h_k \quad \forall k \in V \quad (5)$$

3. Se especifica que la diferencia entre cantidad de producto que lleva el vehículo antes de visitar a un cliente j y después de dejarlo sea igual a la demanda de ese mismo cliente.

$$\sum_{i \in A} Y_{ij} - \sum_{i \in A} Y_{ji} = d_j \quad \forall j \in A' \quad (6)$$

4. Evitar que la capacidad del vehículo no sea excedida y evita la formación de subtours. En este caso, la parte izquierda de la ecuación se asegura de que la carga que lleva el camión para visitar al cliente j después de visitar al cliente sea por lo menos la demanda del cliente j, garantizando que cada cliente sea visitado sólo una vez. La parte derecha se asegura de que la carga que se le entregó al cliente i más la carga que hay disponible para el cliente j, no sea superior a la capacidad del vehículo.

$$d_j * X_{ij}^k \leq Y_{ij} \leq (Q_k - d_i) * X_{ij}^k \quad \forall i, j \in A, i \neq j, \forall k \in V \quad (7)$$

3.2. Método propuesto

Dado que el problema de ruteo de vehículos es un problema de tipo NP-Hard, se precisa un método de solución que presente la facilidad de brindar una solución que arroje unos resultados suficientemente buenos en un tiempo considerablemente bajo. Teniendo en cuenta los tres métodos generales principales para proponer una solución (exactos, heurísticos y metaheurísticos) a este tipo de problemas, se tiene que los métodos de solución exactos poseen grandes características, una de ellas es encontrar la solución óptima al problema planteado, pero según Laporte (1991), los métodos exactos de solución son eficientes sólo hasta una cantidad total de 50 clientes y de acuerdo a Arboleda (2016) se tiene que debido a la complejidad del problema con una flota heterogénea, se han hecho algunos intentos de formularlo utilizando programación lineal entera mixta, también sustenta que los autores Wassan y Osman (2002) aseguran que ningún algoritmo exacto para este tipo de problemas ha presentado resultados confiables, además de tardar tiempos considerablemente largos para arrojar un resultado.

Esto debido a que los problemas tienden a generar muchas posibles condiciones; para este caso de estudio se tiene un alto número de clientes por atender, como también una flota de vehículos bastante grande y con muchas variaciones en cuanto a capacidades y costos. Además de que se busca que los tiempos de respuesta de la herramienta a utilizar sean relativamente cortos para el momento de analizar los resultados.

En el caso de los métodos metaheurísticos, son procedimientos diseñados para encontrar mejores soluciones que una heurística simple, ya que ésta utiliza a las heurísticas clásicas como subrutinas. Las metaheurísticas realizan una mejor exploración en el espacio de soluciones; se tiene que es una herramienta que funciona muy bien para casos puntuales en los que se requiera como metodología buscar el mayor beneficio posible, pero a partir de un heurístico. Por esto, para este trabajo se busca encontrar una metodología que genere una solución que funcione con base en un procedimiento puntual y genere un resultado a partir de los cálculos realizados.

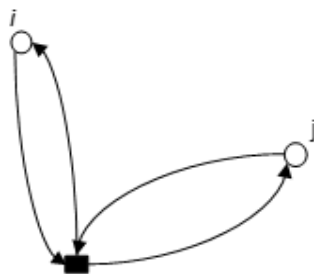
Por lo que, para una investigación futura o quizá más aplicada, podría utilizarse un método con características de optimización como los metaheurísticos.

Con base en esto, teniendo en cuenta las necesidades y características del caso de estudio, los métodos heurísticos son los que presentan soluciones interesantes y buenas para problemas de este tipo (NP-Hard). Por semejanza a los problemas tratados con este algoritmo y por la relación que tienen las condiciones tratadas en los artículos investigados y planteados, se observa que algoritmo de Clarke & Wright es bastante compatible en cuanto a las características que este posee y lo que se quiere lograr. Este algoritmo, también conocido como método de los ahorros, es una heurística flexible utilizada para resolver diferentes variaciones del problema de ruteo de vehículos (Ballou, 2004).

Al ser un método tan flexible, permitiendo altos números de clientes a visitar, es posible abordar el problema de flota mixta de una manera eficaz, con resultados lo suficientemente buenos para presentar ahorros en cuanto al costo y la distancia, además de arrojar resultados en tiempo relativamente cortos, permitiendo así realizar el análisis y comparaciones de los resultados de manera rápida.

En el método de Clarke & Wright se inicia con n rutas que conecta a cada uno de los n clientes con el depósito o centro de distribución de la forma $(0, i, 0)$ y $(0, j, 0)$ donde 0 es el depósito y $j, i \in$ clientes.

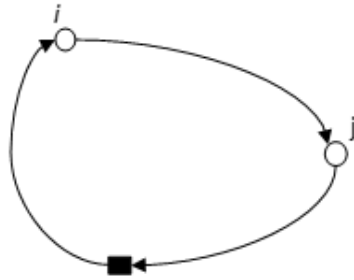
Figura 1. Representación de la ruta inicial.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se evalúa si es posible realizar la unión de los nodos i y j de acuerdo a las restricciones propias de cada modelo, de tal forma que si es posible unirlos la nueva ruta sería $(0, i, j, 0)$ como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Representación de la ruta uniendo dos nodos.



Fuente: Elaboración propia.

La forma de evaluar la posible unión de cada par de nodos se hace de acuerdo al ahorro que represente dicha unión, para esto se usa la ecuación 8.

$$S_{ij} = c_{0i} + c_{0j} - c_{ij} \quad (8)$$

Donde:

- $S_{i,j}$ = Ahorro de la unión de los nodos i y j.
- $c_{0,i}$ = Distancia entre el depósito y el nodo i.
- $c_{0,j}$ = Distancia entre el depósito y el nodo j.
- $c_{i,j}$ = Distancia entre el nodo i y el nodo j.

Existen dos variaciones de este método (Olivera, 2004). La primera es una versión paralela en la que se construyen todas las rutas simultáneamente y otra secuencial en la que se construyen las rutas una a la vez. Para el caso de estudio se escoge la versión secuencial debido a que es un problema de flota mixta.

Para llevar a cabo el método de los ahorros de forma secuencial se siguen los siguientes pasos:

- **Paso 1:** Construir n rutas de la forma (0, i, 0).
- **Paso 2:** Calcular los ahorros $S_{i,j}$ para cada par de nodos.
- **Paso 3:** Seleccionar una ruta que no haya sido considerada, si todas han sido consideradas, terminar.
- **Paso 4:** Dada una ruta (0, i,..., j, 0) donde i y j son los extremos de la ruta (primer y último nodo), buscar $\max S_{k,i}$ (o $S_{j,l}$). Si es factible la unión (cumple con las restricciones) unir las rutas, de lo contrario continuar la búsqueda en forma descendente. Una vez encontrada la unión factible, se unen los nodos

k, i (o j, l) y se procede a eliminar los S que contengan a i o j según sea el caso. Este paso se repite hasta que ya no sea posible realizar más uniones dado que no se cumpla las restricciones. Cuando no se puedan realizar más uniones se eliminan aquellos S que contengan a los nodos extremos y se devuelve al paso 3.

Para este caso se escogió la forma secuencial del método de los ahorros dado que, al ser un problema con flota mixta, se facilita la construcción de las rutas al escoger un vehículo por vez. Lo anterior quiere decir que se empieza escogiendo un vehículo y se construye una sola ruta para este, teniendo en cuenta la restricción de capacidad especificada en la tabla 1. Una vez que se ha llenado el vehículo o sencillamente ya no se puedan agregar más nodos a la ruta, se termina con este vehículo y se continúa con el siguiente y así se hace para cada vehículo hasta que todos los nodos hayan sido visitados o hasta que ya no queden vehículos.

Si se hiciera de forma paralela, que es construir múltiples rutas simultáneamente, existe la posibilidad de que al construir las diferentes rutas evaluando únicamente la capacidad de un vehículo, en el momento que la carga iguale la capacidad de este, las otras rutas que hayan sido construidas pueden haber superado la capacidad de los vehículos restantes, por lo que no cumplirían con las restricciones. Lo anterior sucedería en el caso de que se evalúe los vehículos de forma descendente, es decir, empezando por aquel de mayor capacidad y terminando por aquel con menor capacidad.

3.3. Simulación de las rutas

Para la simulación de las rutas, dado que es sumamente dispendioso realizar todos los cálculos de forma manual, se toma la decisión de crear un programa usando Microsoft Excel. Para ello, se programó usando el lenguaje Visual Basic siguiendo los pasos del algoritmo.

En primer lugar, se creó una hoja llamada "DATOS" en la que se ingresan las fechas, nombres de los clientes, cantidad de cajas y la ubicación dada en coordenadas geográficas, así como la ubicación del depósito. En esta misma hoja se ingresan los datos de los vehículos, en esta tabla se ingresa el tipo de camión, la capacidad de carga y el costo variable y la clave de Bing Maps para realizar el cálculo de las distancias reales. Por evitar la divulgación de la ubicación real de los

clientes, se han cambiado los nombres y las coordenadas han sido reducidas a un solo decimal. En la figura 3 se puede apreciar claramente los datos ingresados.

Figura 3. Imagen de la hoja “DATOS”.

No	FECHA	CLIENTE	CAJAS	LATITUD	LONGITUD
0		DEPÓSITO		3,9	-76,4
1	4/12/2017	Cliente 1	12	8,9	-75,6
2	4/12/2017	Cliente 2	12	8,9	-75,6
3	4/12/2017	Cliente 3	12	9,0	-75,4
4	4/12/2017	Cliente 4	12	9,1	-75,4
5	4/12/2017	Cliente 5	18	9,3	-75,4
6	4/12/2017	Cliente 6	54	10,3	-75,3
7	4/12/2017	Cliente 7	168	4,1	-73,6
8	4/12/2017	Cliente 8	20	3,8	-76,5
9	4/12/2017	Cliente 9	35	3,8	-76,6
10	4/12/2017	Cliente 10	60	3,9	-76,2
11	4/12/2017	Cliente 11	5	4,2	-76,3
12	4/12/2017	Cliente 12	281	6,2	-75,3
13	4/12/2017	Cliente 13	235	6,2	-75,5
14	4/12/2017	Cliente 14	191	9,3	-75,3
15	4/12/2017	Cliente 15	235	6,2	-75,5
16	4/12/2017	Cliente 16	30	2,9	-75,3
17	4/12/2017	Cliente 17	3	2,9	-75,3
18	4/12/2017	Cliente 18	30	2,9	-75,3
19	4/12/2017	Cliente 19	55	2,2	-75,6
20	4/12/2017	Cliente 20	62	1,9	-76,0
21	4/12/2017	Cliente 21	4	2,9	-75,5
22	4/12/2017	Cliente 22	20	2,4	-75,9
23	4/12/2017	Cliente 23	3	2,4	-75,9
24	4/12/2017	Cliente 24	300	6,2	-75,3
25	5/12/2017	Cliente 25	388	3,2	-76,6
26	5/12/2017	Cliente 26	216	3,8	-76,3
27	5/12/2017	Cliente 27	196	3,8	-76,3

NODOS		31
Clave Bingr	Ak4DI5ySqno_0eGPjxEL4kJS	

TOTAL:		18
VEHÍCULO	CAPACIDAD	COST. X Km
NPR-1	264	\$ 922,07
NPR-2	352	\$ 922,07
NPR-3	352	\$ 922,07
NQR-1	352	\$ 922,07
NQR-2	352	\$ 922,07
NQR-3	352	\$ 922,07
NQR-4	352	\$ 922,07
NQR-5	352	\$ 922,07
NQR-6	352	\$ 922,07
NQR-7	352	\$ 922,07
NQR-8	352	\$ 922,07
FRR-1	396	\$ 1.070,03
FRR-2	396	\$ 1.070,03
FRR-3	396	\$ 1.070,03
FRR-4	396	\$ 1.070,03
FTR-1	440	\$ 1.315,53
FTR-2	440	\$ 1.315,53
KODIAK	440	\$ 1.318,96

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realiza el cálculo de las distancias en la hoja “MATRICES”. Como en este caso se usan distancias reales, fue necesario programar la hoja de cálculo de tal forma que realizara la consulta usando la API de Bing Maps. Para esto, se realizó una adaptación del código utilizado en VRP Spreadsheet Solver v3.01 (Erdogan, 2017). Se creó una matriz de distancias en la que queda plasmada la distancia entre cada par de nodos de la ruta que se va a simular. En la misma hoja de cálculo, se realiza el cálculo de los ahorros mediante el uso de la ecuación 8 y en la celda A1 se escribe el valor del mayor ahorro. En la figura 4 se

Figura 5. Imagen de la hoja “NODOS”:

No.	CLIENTES	AHORRO	
1	14	5	1668,16
2	6	5	1666,141
3	14	6	1666,067
4	5	4	1614,58
5	6	4	1614,58
6	14	4	1614,58
7	4	3	1574,608
8	5	3	1574,608
9	6	3	1574,608
10	14	3	1574,608
11	2	1	1566,776
12	3	2	1536,381
13	4	2	1536,381
14	5	2	1536,381
15	6	2	1536,381
16	14	2	1536,381
17	3	1	1535,262
18	4	1	1535,262
19	5	1	1535,262
20	6	1	1535,262
21	14	1	1535,262
22	24	12	837,284
23	17	16	827,112

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario aclarar que lo que se observa en la figura 5 es solo una pequeña porción del total de los ahorros, dado que la cantidad de estos está dada por la ecuación 9.

$$Cantidad\ de\ ahorros = \frac{(Número\ de\ nodos)^2 - Número\ de\ nodos}{2} \quad (9)$$

Por último, se creó la hoja “RUTAS” en la que se muestra el resultado final siguiendo los pasos 3 y 4 del método de ahorros. En ella se observa el número de la ruta, el vehículo que la realiza, la capacidad y carga del mismo, la distancia total recorrida y la tasa de ocupación. En la figura 6 se observan sólo 2 de las 13 rutas que se generaron en los días 4 y 5 de diciembre.

Figura 6. Imagen de la hoja “RUTAS”

RUTA:	1	CAMIÓN:	NPR-1	CAPACIDAD:	264
RECORRIDO:	1964,87	OCUPACIÓN:	100%	CARGA:	263
CLIENTE	NOMBRE		ENTREGA	DISTANCIA	
0	DEPÓSITO				
14	Cliente 14		191	843,04	
5	Cliente 5		18	9,98	
6	Cliente 6		54	140,40	
0	DEPÓSITO			971,45	
RUTA:	2	CAMIÓN:	NPR-2	CAPACIDAD:	352
RECORRIDO:	2412,29	OCUPACIÓN:	98%	CARGA:	344
CLIENTE	NOMBRE		ENTREGA	DISTANCIA	
0	DEPÓSITO				
11	Cliente 11		5	52,45	
4	Cliente 4		12	824,72	
3	Cliente 3		12	20,93	
2	Cliente 2		12	34,47	
1	Cliente 1		12	0,79	
12	Cliente 12		281	444,80	
17	Cliente 17		3	567,67	
21	Cliente 21		4	29,34	
23	Cliente 23		3	106,08	
0	DEPÓSITO			331,04	

Fuente: Elaboración propia.

En ocasiones, debido al tamaño de los pedidos de los clientes o a la cantidad limitada de vehículos, no es posible visitar todos los clientes, por lo que se genera una hoja “NO_VISI” que hace referencia a los no visitados, por lo que en estos casos es necesaria la intervención humana para que programe estas rutas de forma manual usando aquellos vehículos con un recorrido relativamente corto que puedan realizar la primera ruta, volver y realizar una segunda.

3.4. Orden de selección de vehículos

Dado que en el caso de estudio se usa una flota heterogénea, es necesario determinar la forma en la que se va a escoger el orden de los vehículos para la construcción de las rutas. Para la forma en la que se evalúan y seleccionan los vehículos se realizaron dos simulaciones tomando como base los pedidos realizados en el mes de octubre. En la primera simulación, se escogieron los vehículos en un orden descendente en cuanto a capacidad y costo variable, se

obtuvieron las distancias totales recorridas, los costos variables, cantidad de vehículos usados por cada ruta y la tasa de ocupación. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados selección de vehículos de mayor a menor capacidad.

FECHA	DISTANCIA (Km)	COSTO VARIABLES TOTALES	% OCUP	VEHICULOS
2 - 3 OCT	8.760,44	\$ 10.690.460	89%	8
5 - 6 OCT	18.041,42	\$ 20.725.568	93,07%	12
9 - 10 OCT	13.426,18	\$ 15.802.607	87,82%	12
12 - 13 OCT	12.892,73	\$ 15.649.736	94,88%	12
16 - 17 OCT	11.612,42	\$ 13.513.000	85,88%	12
19 - 20 OCT	10.767,05	\$ 13.133.185	79,50%	14
22 - 24 OCT	15.691,09	\$ 17.991.769	92,47%	12
27 - 28 OCT	14.072,68	\$ 16.506.420	92,33%	13
30 - 31 OCT	15.783,58	\$ 18.086.121	89,30%	14

Fuente: Elaboración propia.

Los datos arrojados por la simulación en orden descendente presentan algunas discrepancias importantes en lo que compete a satisfacer la demanda total de los clientes. Se obtuvo como resultado que en las fechas 5-6, 9-10, 12-13, 19-29, 22-24, 27-28 y 30-31 de octubre no se visitaron la totalidad de los clientes dejando como saldo a 3, 1, 1, 3, 1, 2 y 1 clientes no visitados en la simulación de las fechas respectivamente.

Aclarando que, aunque en estos recorridos (rutas) se obtuvo un número menor de vehículos usados que con los que la empresa cuenta, se tiene que no se visitó a los clientes a pesar de tener vehículos disponibles debido a que estos clientes presentan pedidos muy grandes respecto a la capacidad de los vehículos que quedaban a disposición y acorde a esta metodología en primera instancia se usaron los vehículos de mayor capacidad para las primera rutas formadas. Teniendo en cuenta que no se está trabajando en un problema de entrega dividida, se tiene que esos clientes con pedidos más grandes que la capacidad de los vehículos disponibles no se le es posible satisfacer la demanda, dejando como única solución realizar un segundo viaje para uno de los vehículos de mayor capacidad que ya esté liberado.

Bajo estas condiciones se tendría que los costos variables totales del recorrido van a ser mucho mayores debido a que estos vehículos son los que se presentan los mayores costos por Km recorrido, y teniendo en cuenta que en la comparación con la simulación en orden ascendente (Tabla 11), se evidencia que aun sin hacer los recorridos dobles, el costo de la simulación en orden descendente un mucho mayor a su contraparte.

En la segunda simulación se evaluaron y seleccionaron lo vehículos de forma ascendente, es decir, se empezó por el vehículo con menor capacidad y costo variable y se hallaron los resultados para los mismos parámetros que en la primera simulación. Los resultados se observan en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados selección de vehículos de menor a mayor capacidad.

<i>FECHA</i>	<i>DISTANCIA (Km)</i>	<i>COSTO VARIABLES TOTALES</i>	<i>% OCUP</i>	<i>VEHICULOS</i>
2 - 3 OCT	9.387,87	\$ 8.656.270	84,73%	10
5 - 6 OCT	21.130,82	\$ 20.462.138	89,02%	17
9 - 10 OCT	15.904,100	\$ 15.034.222	90,49%	14
12 - 13 OCT	14.824,05	\$ 14.041.235	89,86%	15
16 - 17 OCT	13.513,39	\$ 13.033.728	81,89%	14
19 - 20 OCT	15.081,89	\$ 14.815.462	81,77%	18
22 - 24 OCT	16.985,61	\$ 16.111.937	95,20%	14
27 - 28 OCT	16.149,85	\$ 15.084.487	93,35%	16
30 - 31 OCT	19.377,21	\$ 18.548.669	79,23%	18

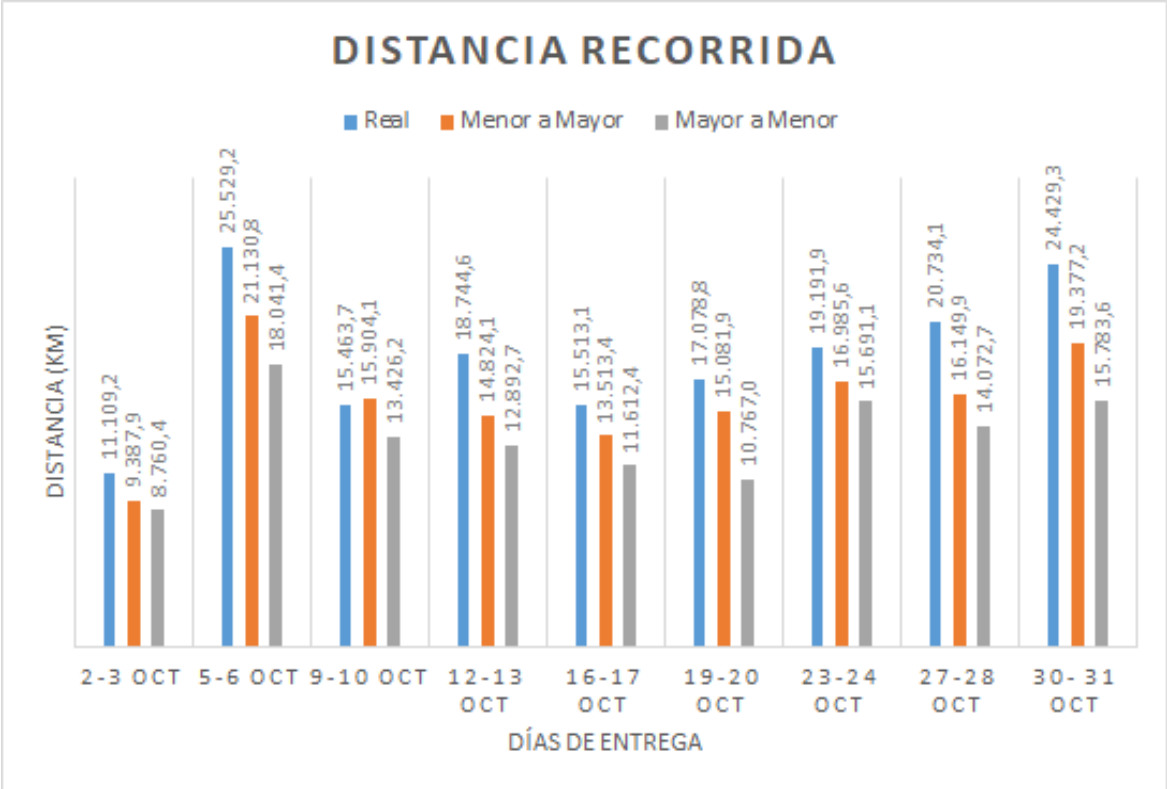
Fuente: Elaboración propia.

En este caso, no se presentaron casos en los que no se visitaran clientes. Esto se debe principalmente a que como se evalúan primero los vehículos de menor capacidad, si existe algún cliente cuya demanda supere la capacidad del vehículo evaluado, simplemente se salta ese vehículo y se evalúa para el siguiente vehículo y así sucesivamente hasta que se encuentra un vehículo que pueda realizar la entrega. Cabe aclarar que no se presentó que la demanda de un cliente fuera superior a la capacidad del vehículo con mayor capacidad.

Una vez realizadas las dos simulaciones, se procede a realizar una comparación de los resultados obtenidos con ambos métodos para proceder a realizar la

selección de la mejor forma de evaluar los vehículos. En el gráfico 3 se observa la comparación de los resultados en términos de distancia recorrida.

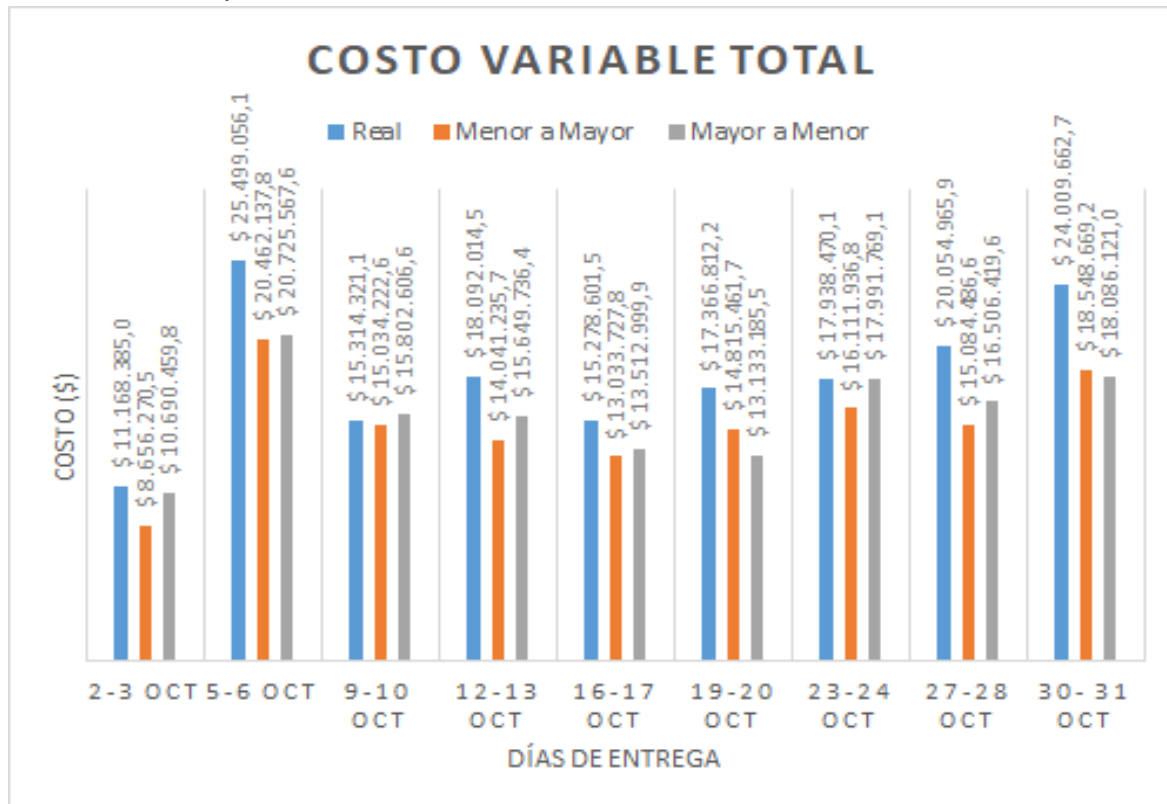
Gráfico 3. Comparación de distancia recorrida.



Fuente: Elaboración propia.

Si se toma en cuenta sólo el criterio de distancia, aparentemente es mejor evaluar los vehículos de mayor a menor capacidad y costo variable dado que presenta menor distancia total de recorrido, pero sería apresurado tomar la decisión de seleccionar esta forma de evaluar. Dado que hay que tener en cuenta en muchos casos donde no se visitaron todos los clientes por falta de capacidad, por ende, no estaría el total de distancia recorrida que cubre a todos los clientes y aún no se han evaluado los costos de las rutas.

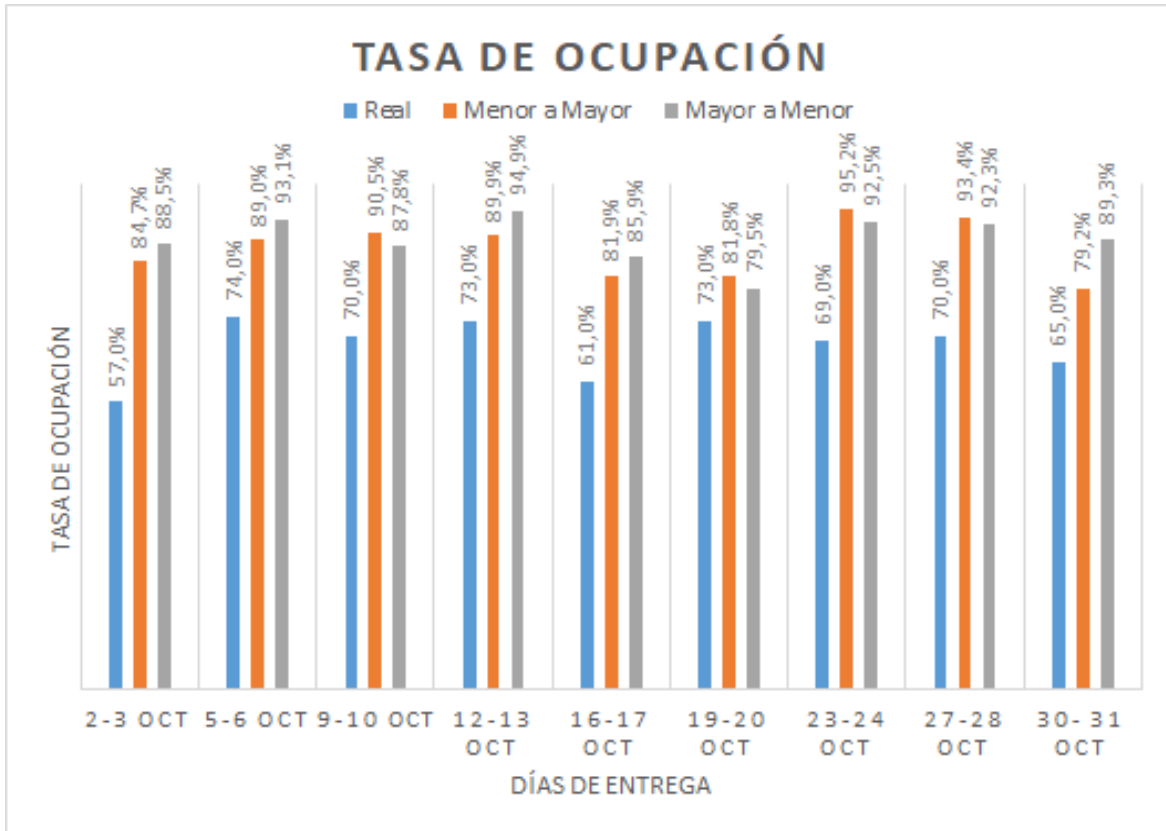
Gráfico 4. Comparación de costos.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 4 se puede observar la comparación en términos de costos de los métodos. Aquí se puede observar claramente que, aunque la selección de vehículos de mayor a menor capacidad y costo variable arroja rutas más cortas, éstas generan mayores costos debido principalmente a que las rutas más largas las realizan los vehículos con mayor costo variable, lo que aumenta en gran medida el costo total de la ruta. De igual forma, al evaluar los vehículos de mayor a menor no se determinan todos los costos de las rutas por lo que existen clientes que no fueron visitados, que, si se visitaran usando los vehículos con mayor capacidad, estos costos aumentarían en gran medida.

Gráfico 5. Comparación de tasas de ocupación.

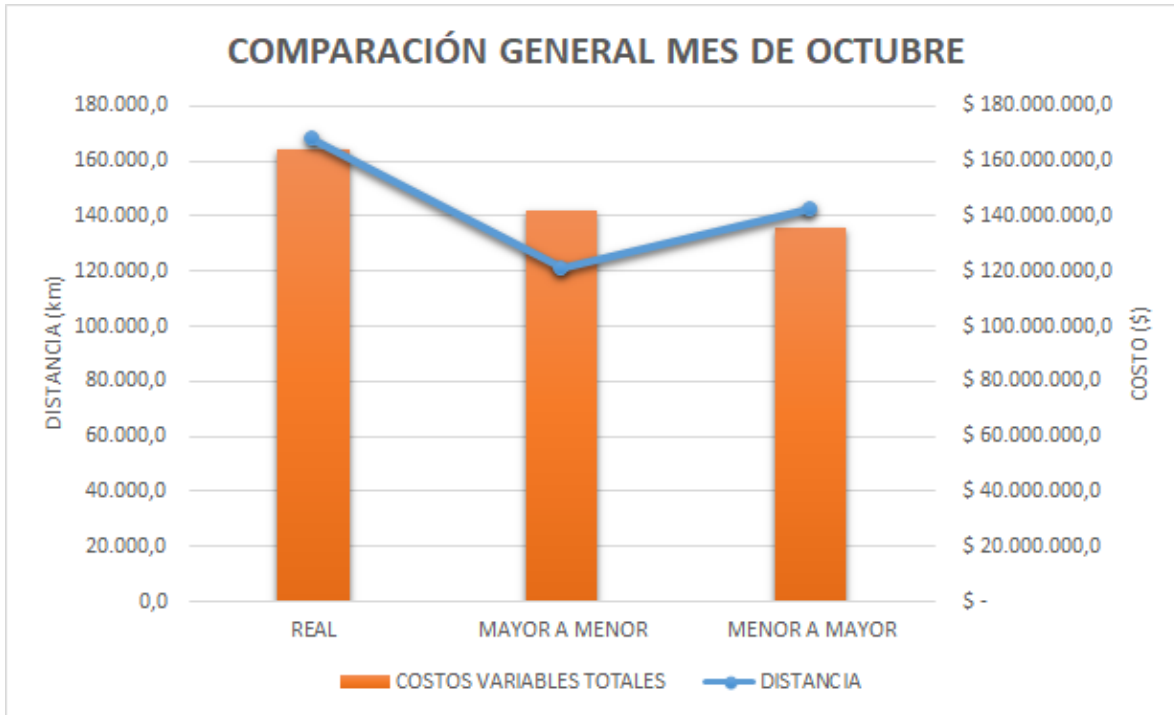


Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 5 se compara los resultados de las tasas de ocupación. Esta vez los resultados no parecen ser tan concluyentes como en la evaluación de las distancias y los costos. En cuatro de los nueve días se obtiene una mayor tasa de ocupación evaluando los vehículos de menor a mayor capacidad y costo variable, mientras que en los cinco días restantes en mejor evaluar de mayor a menor capacidad.

Al realizar la comparación general en el gráfico 6, se observa que, si bien ambos métodos reducen costo y distancia en comparación con el estado actual, al realizar la evaluación de menor a mayor capacidad y costo variable, ésta arroja mejores resultados en términos de costo, aunque se recorra mayor distancia. Razón por la cual se decide usar esta forma para determinar las rutas de los tres meses siguientes.

Gráfico 6. Comparación general del mes de octubre.



Fuente: Elaboración propia.

3.5. Ejecución del modelo

Una vez determinado el modelo a realizar y la secuencia de la selección de vehículos (menor a mayor capacidad) se procedió a ejecutar los pasos realizados para el mes de octubre, en los otros tres meses siguientes en las macros programadas.

En las tablas 12, 13 y 14 se evidencian los resultados obtenidos una vez se ejecutó el algoritmo para cada uno de los recorridos que se realizaron en estos meses.

Tabla 12. Resultados obtenidos mes de noviembre.

FECHA	MÉTODO PROPUESTO			
	DISTANCIA	COSTO VARIABLE	OCUPACIÓN	No VEHÍCULOS
2-3 Nov	19.673	\$ 19.204.747	92%	19
6-7 Nov	12.528	\$ 12.470.893	81%	20
9-10 Nov	19.153	\$ 18.413.587	83%	22
13-14 Nov	15.848	\$ 14.856.752	80%	14
16-17 Nov	17.498	\$ 16.473.160	89%	14
20-21 Nov	12.293	\$ 11.392.796	92%	13
23-24 Nov	12.797	\$ 11.886.438	92%	14
27-28 Nov	16.470	\$ 15.361.936	84%	14
30 Nov 1 Dic	10.742	\$ 9.991.469	87%	14
Total	137.001	\$ 130.051.778	86,6%	16

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 12 se observa los datos obtenidos para cada recorrido del mes de noviembre, se tiene una tasa de ocupación elevada en cuanto a la relación de producto - recorrido y teniendo un promedio de 16 vehículos en uso durante el mes, manteniendo un uso moderado de los vehículos que se tienen a disposición. Se evidencia que hay recorridos en donde el número de vehículos utilizados es mayor a los disponibles por la empresa, en estos casos lo que se hizo fue emplear los vehículos que menor distancias habían recorrido y utilizarlos nuevamente para atender la demanda de los que quedaban sin visitar, básicamente son los camiones que visitaron los clientes más cercanos y efectúan la ruta en un mismo día.

Esto sucede cuando la demanda de los clientes para una fecha de planeación es mayor a la suma de la capacidad total que tienen los vehículos, por ello la solución es utilizar los camiones cuyo recorrido se haga en un mismo día, esto quiere decir que como los ruteos se efectúan para dos días de una semana, entonces los que hacen su recorrido en el primer día, entonces se utilizan para el siguiente día por ello al ejecutar el algoritmo estos quedan liberados.

Tabla 13. Resultados obtenidos mes de diciembre.

FECHA	MÉTODO PROPUESTO			
	DISTANCIA	COSTO VARIABLE	OCUPACIÓN	No VEHÍCULOS
4-5 Dic	10.228	\$ 9.488.522	80%	13
7-8 Dic	12.495	\$ 11.521.030	91%	11
11-12 Dic	10.386	\$ 9.681.322	85%	14
14-15 Dic	13.902	\$ 13.673.888	88%	12
18-19 Dic	9.588	\$ 9.043.905	82%	16
21-xx Dic	9.666	\$ 8.912.534	87%	7
26-27 Dic	12.491	\$ 12.907.064	81%	18
28-29 Dic	9.833	\$ 9.124.530	87%	13
Total	88.589,0	\$ 84.352.796,0	85,0%	13

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 13 se resumen los resultados del mes de diciembre, se observa una alta tasa de ocupación permitiendo así impactar los costos de una manera favorable. También se evidencia que hay un recorrido que se realizó para un solo día (21), y esto se debe a que los ruteos que la empresa realizó, por cuestiones de sus políticas solo usaron un día para atender la totalidad de los clientes, por ende, en la simulación respectiva se decidió tomar igualmente atender los clientes totales en un solo día.

Tabla 14. Resultados obtenidos mes de enero

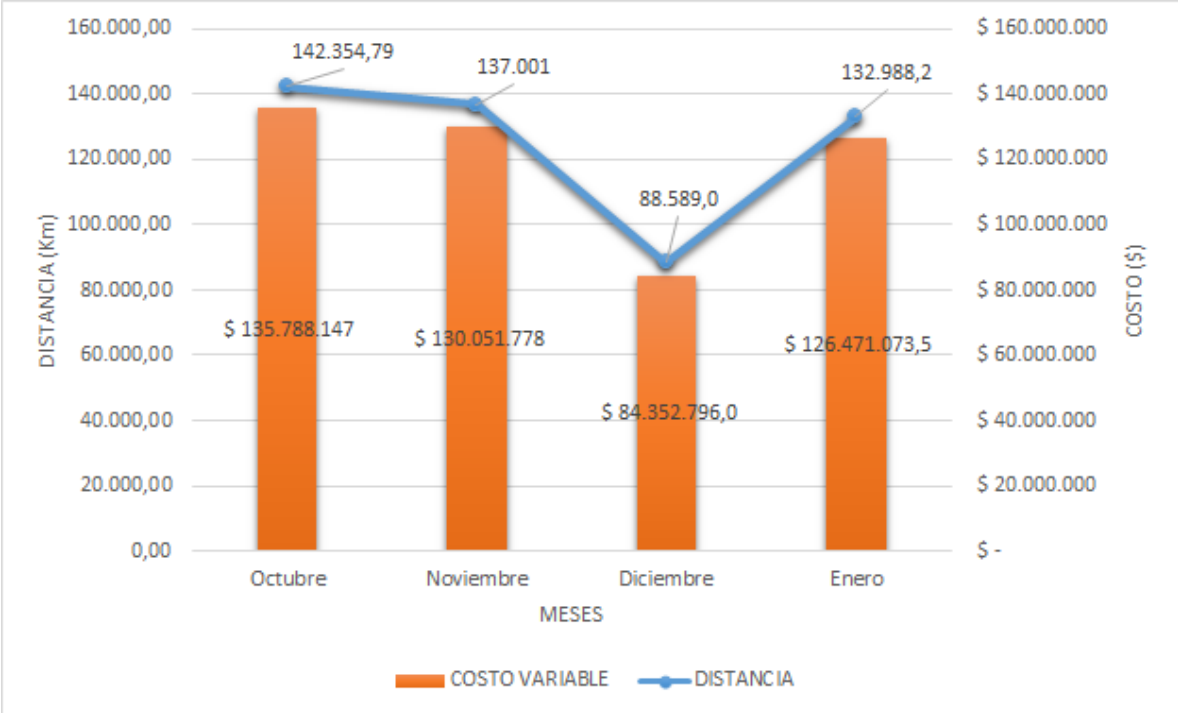
FECHA	MÉTODO PROPUESTO			
	DISTANCIA	COSTO VARIABLE	OCUPACIÓN	No VEHÍCULOS
2-3 Ene	14.747	\$ 14.237.125	84%	15
4-5 Ene	17.562	\$ 16.319.724	83%	15
8-9 Ene	9.909	\$ 9.140.386	87%	12
11-12 Ene	19.473	\$ 19.160.383	92%	18
15-16 Ene	13.065	\$ 12.126.062	92%	14
18-19 Ene	16.295	\$ 15.640.845	86%	17
22-23 Ene	13.611	\$ 12.705.362	88%	16
25-26 Ene	18.331	\$ 17.777.887	84%	17
29-30 Ene	9.996	\$ 9.363.300	91%	10
Total	132.988,2	\$ 126.471.073,5	87,3%	15

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 14 sintetiza los resultados de la simulación del mes de enero y generando una alta tasa de ocupación promedio durante los recorridos, como también un uso no exagerado de los vehículos disponibles.

Por último, en los gráficos 7 y 8 se evidencian los comportamientos de los parámetros medidos durante los cuatro meses evaluados.

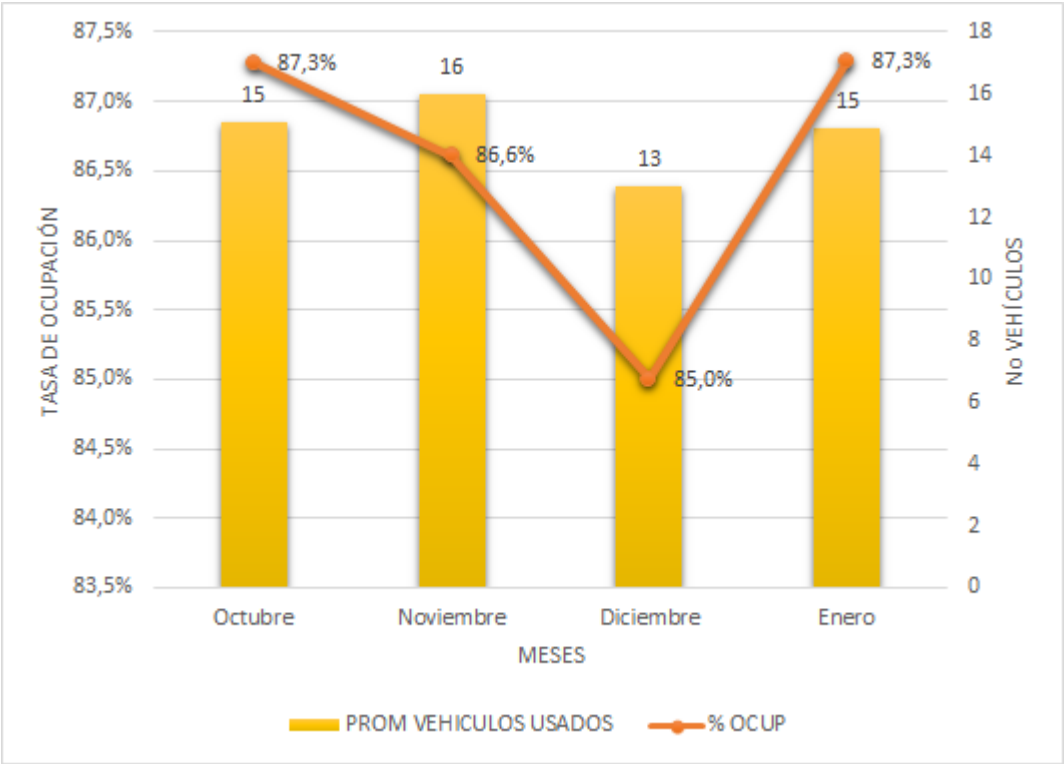
Gráfico 7. Resumen general de distancias y costos variables totales en simulación.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 7 se observa que la mayor distancia y costo se tuvo en el mes de octubre y se mantuvo una tendencia decreciente a estos valores por parte de los otros meses, cabe aclarar que estas distancias y costos varían de acuerdo al número de clientes que se tengan para un periodo de ruteo y su dispersión geográficamente, por ello el mes de diciembre presenta valores tan bajos respecto a los otros.

Gráfico 8. Resumen general de tasas de ocupación promedio y número promedio de vehículos usados.



Fuente: Elaboración propia.

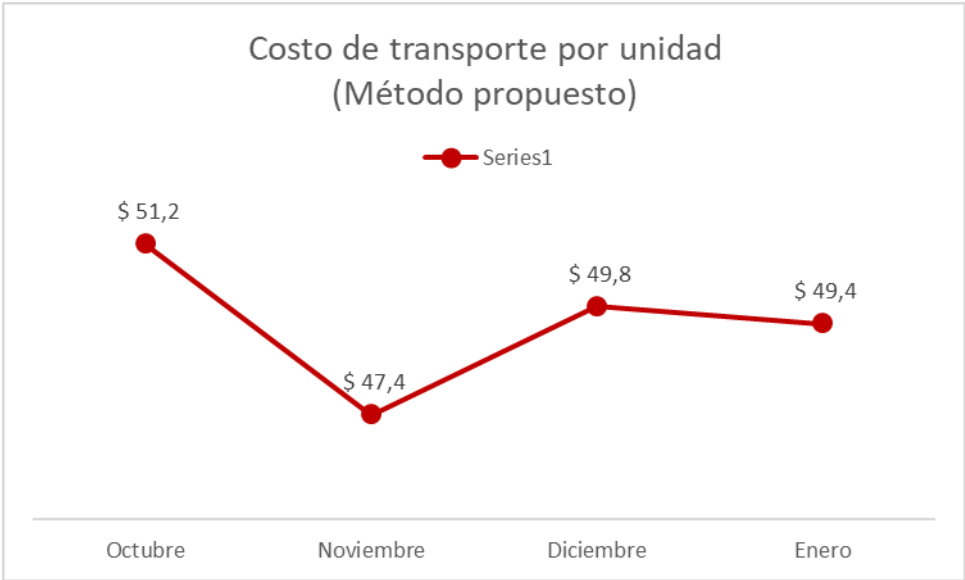
La gráfica 8 muestra que los promedios tanto de las tasas de ocupación como de los vehículos usados en los meses son muy similares, también se observa que a pesar de que octubre fue el mes con una mayor distancia recorrida, no es el que más vehículos uso en promedio. Esto se debe a que el aumento de los vehículos usados se afecta por tener un mayor número de clientes como también por que las cantidades de producto demandados sean muy grandes, por ende, a mayor demanda de producto que se tenga es necesario usar más vehículos.

Es posible que se pueden presentar menos clientes, pero con pedidos que sobrepasen la capacidad de los vehículos más pequeños por lo que es necesario usar todos los vehículos y además volver a usar los que hicieron un recorrido corto. A diferencia de tener mayor cantidad de clientes, pero con una demanda baja por parte de cada uno, permitiendo ser visitados por los vehículos dentro de su capacidad y generando el mayor ahorro posible en el recorrido.

A pesar de esto, no significa que usar más vehículos sea más costoso y es porque se pueden usar mayor cantidad de vehículos de costos más bajos que los recorridos con menos camiones, pero usando todos, o teniendo recorridos donde se empleó a los camiones más costosos en los ruteos con las mayores distancias recorridas.

Por último, en el grafico 9 se evidencia el valor del indicador de costo de transporte unidad de las rutas simuladas para el periodo comprendido entre octubre de 2017 y enero de 2018.

Gráfico 9. Indicador de costo por unidad.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

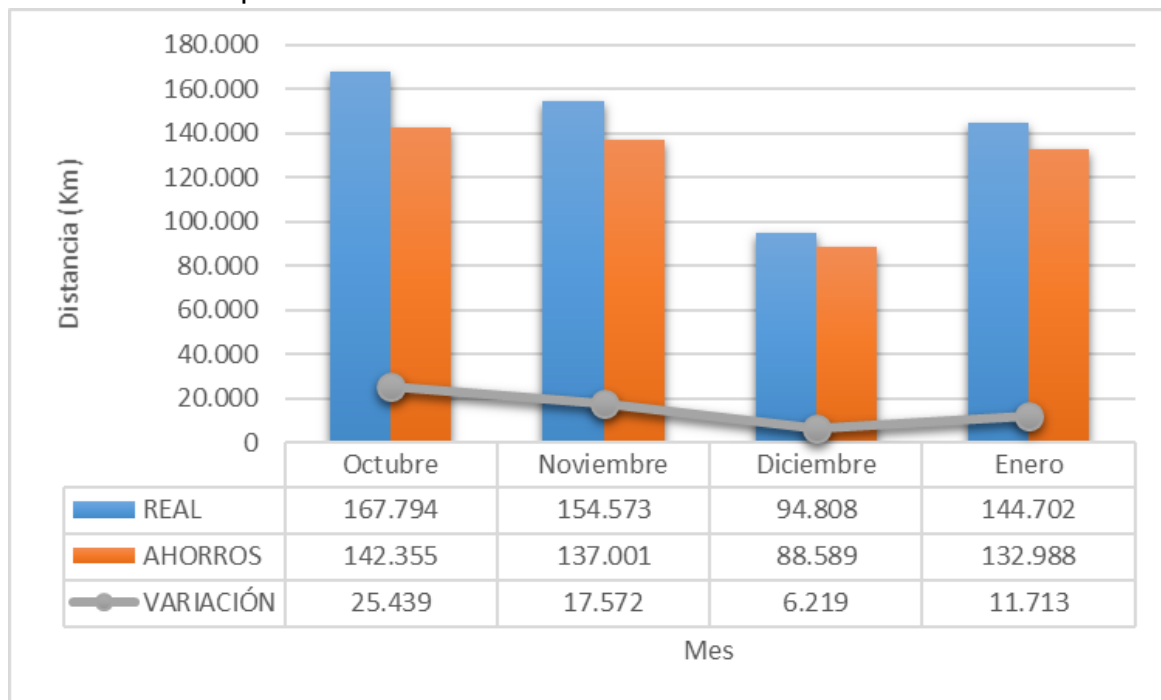
4.1. Discusión y análisis de los resultados

4.1.1. Distancias

Basados en los resultados del capítulo anterior, se procede a realizar una comparación de los resultados tanto reales como de la simulación para determinar que método es mejor, si el que se usa actualmente en la compañía o el propuesto.

Para ello, se inicia con una comparación de los resultados en cuanto a las distancias. En el gráfico 10 se puede observar las distancias de las rutas reales y las distancias de las rutas propuestas por el método de Clarke & Wright. En esta gráfica se evidencia claramente la reducción de las distancias de las rutas en todos los meses, de igual forma se plasma la variación total de recorrido por mes. En el mes de diciembre se presentó un ahorro menor debido principalmente a que fue el mes en el cual se visitaron menor cantidad de clientes ya que por esta temporada la demanda de producto disminuye significativamente.

Gráfico 10. Comparación de distancias



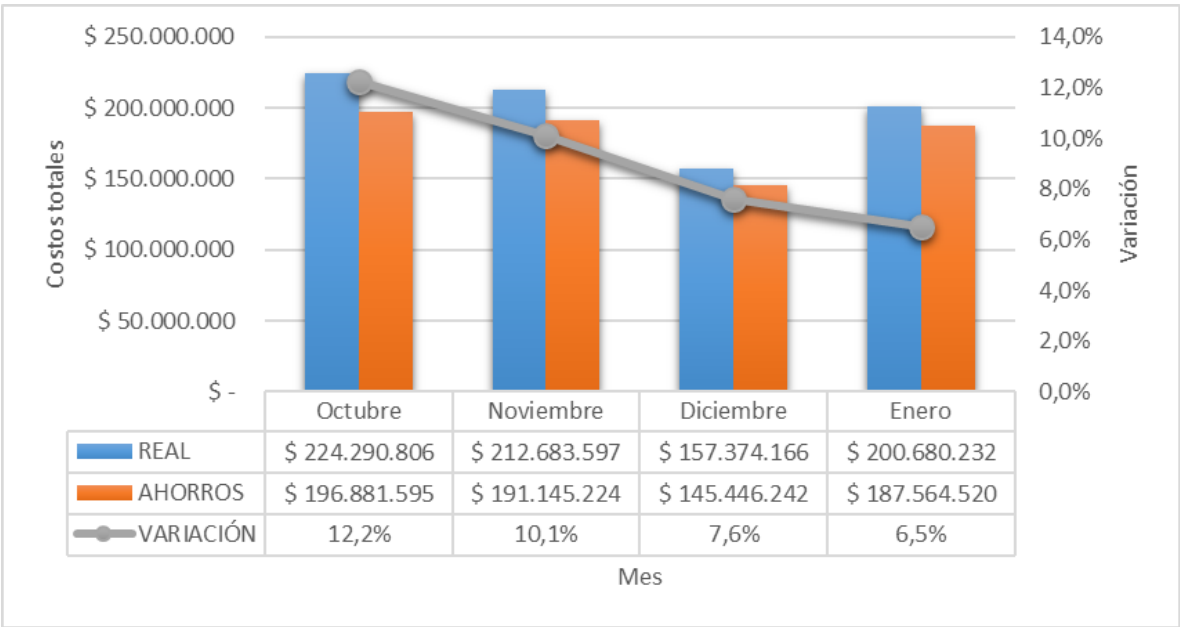
Fuente: Elaboración propia.

Dentro del periodo simulado, el ahorro en cuanto a distancia fue en promedio de 15.236 Km mensuales respecto al real, esto podría generar un impacto positivo en cuanto al costo variable, al desgaste de los vehículos y al tiempo de viaje.

4.1.2. Costos

En cuanto a los costos, se presenta una disminución significativa para cada uno de los meses simulados. En el gráfico 11 se plasman tanto los costos totales reales como los costos totales arrojados por el método propuesto, además, se observa una diferencia considerable de los resultados del método simulado frente al costo real.

Gráfico 11. Comparación de costos totales



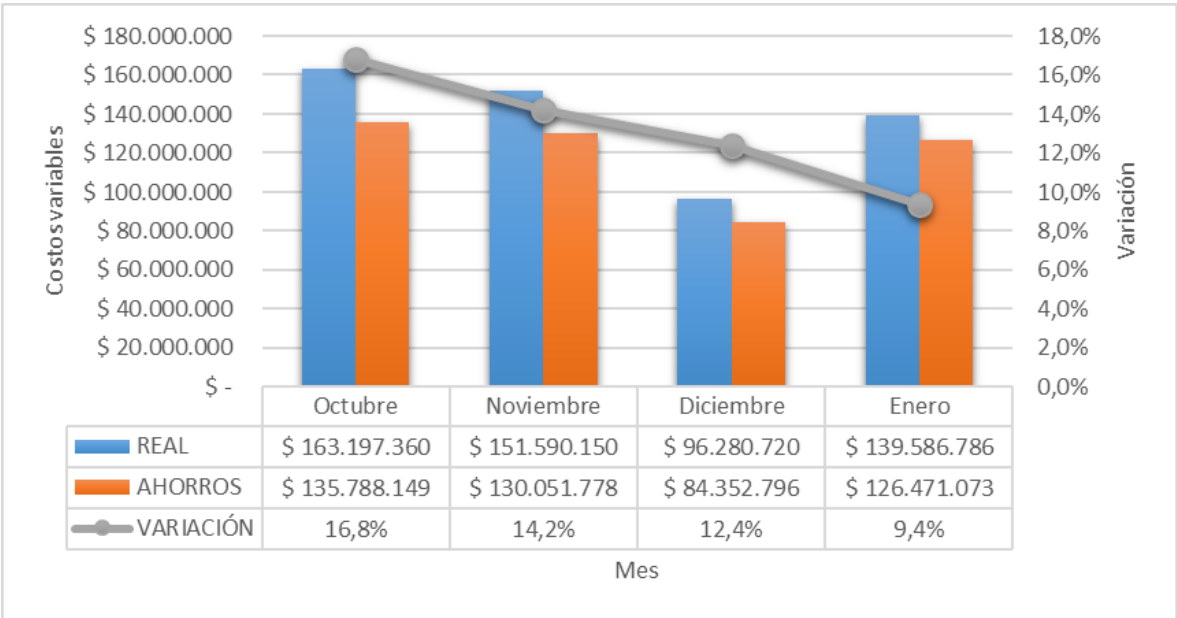
Fuente: Elaboración propia.

En todos los meses se presenta un ahorro considerable de los costos llegando a superar el 12% en el mes de octubre. Para los cuatro meses el promedio de ahorro en costos totales fue de 9,1%, siendo este un resultado sumamente atractivo considerando la aparente simplicidad con la que se implementaría el método.

La tendencia de los ahorros presentados en los costos totales a priori parece ser decreciente, pero esta tendencia resulta afectada debido a que, en el caso real, es una decisión humana la forma como se generan las rutas y no se sigue un método estandarizado, por ende, se pueden producir resultados buenos o no tan buenos dependiendo de los factores que puedan afectar a la persona que realiza el ruteo.

Por otra parte, los costos variables mostraron mejores ahorros que en los costos totales como se observa en el gráfico 12. Los porcentajes de ahorro son diferentes si se comparan con los observados en el gráfico 11, debido a que no disminuyen en la misma proporción. Dado que el método aplicado afecta únicamente a las distancias y, por ende, a los costos variables, la reducción real se da en estos últimos costos mientras que los costos fijos permanecen estables.

Gráfico 12. Comparación de costos variables.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la tabla 15 se presenta el resumen de los resultados de los costos y el impacto que podría generar la implementación de un método de ruteo sistemático usando el algoritmo de Clarke & Wright el cual, en teoría, sería capaz de presentar ahorros de \$18.000.000 mensuales en promedio para este caso en particular y dejando así, como resultado un ahorro total de \$73.991.220 en el periodo simulado.

Tabla 15. Resumen de costos.

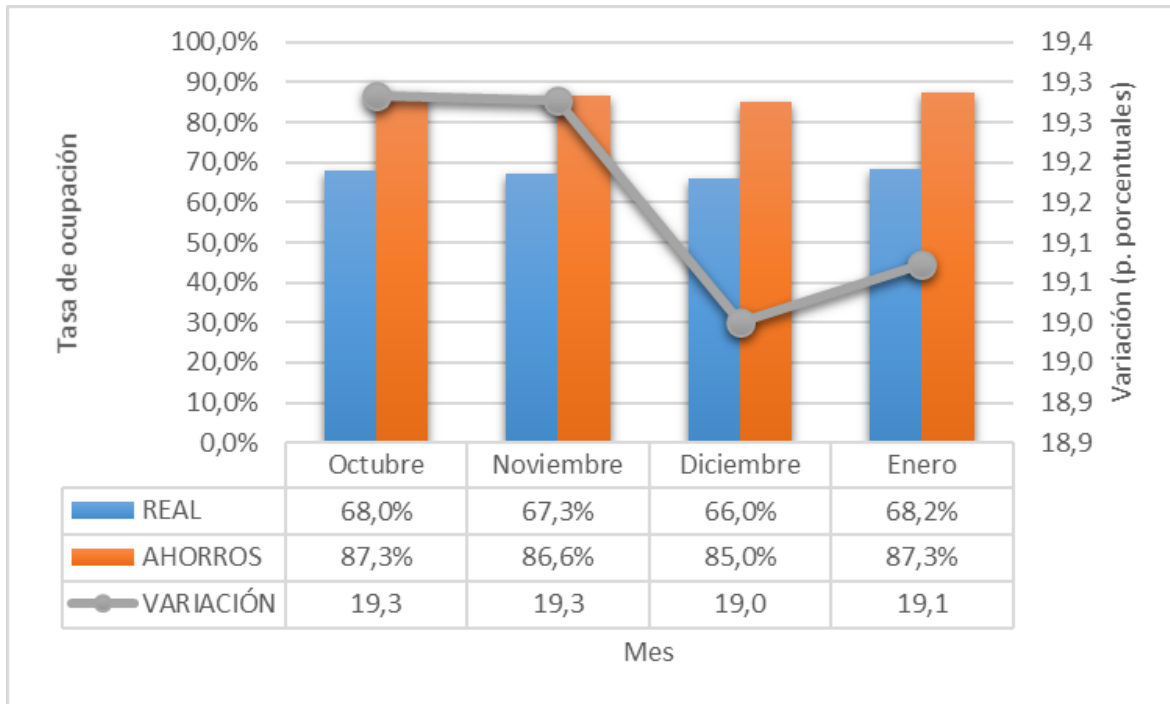
MES	REAL	PROPUESTO	VARIACIÓN	AHORRO
Octubre	\$ 224.290.806	\$ 196.881.595	12,2%	\$ 27.409.212
Noviembre	\$ 212.683.597	\$ 191.145.224	10,1%	\$ 21.538.372
Diciembre	\$ 157.374.166	\$ 145.446.242	7,6%	\$ 11.927.924
Enero	\$ 200.680.232	\$ 187.564.520	6,5%	\$ 13.115.713
Total	\$ 795.028.801	\$ 721.037.581	9,3%	\$ 73.991.220

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Ocupación

Las tasas de ocupación durante los recorridos fue una de las que presento un cambio bastante significativo del método propuesto al obtenido en la situación real.

Gráfico 13. Comparación de la tasa de ocupación.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 13 se condensa la información de la comparación de la propuesta y el caso real, se evidencia un incremento considerable en esta, se tiene un

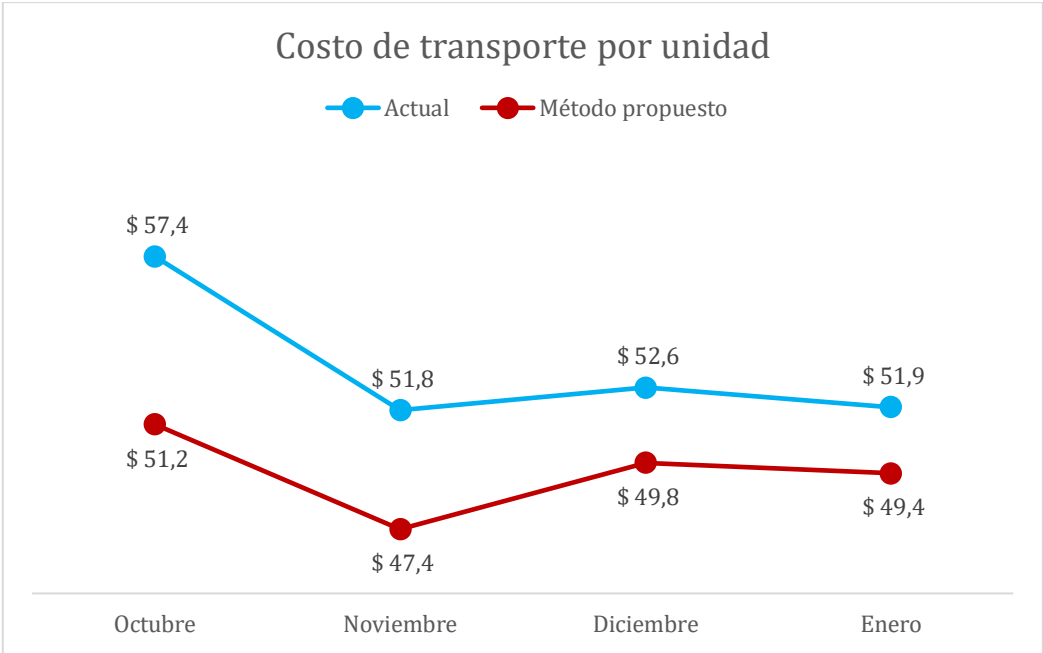
incremento promedio mensual de 19,2 puntos porcentuales. Esta es una de las características que identifica al método de Clark & Wright, porque permite que los vehículos que se emplean para la solución de la simulación posean una alta tasa para así repercutir en el costo, tratando de mantener una alta cantidad de producto dentro de los parámetros del vehículo y los recorridos a realizar.

Esto quiere decir que, de acuerdo con estos resultados, es posible por medio de una estructura más organizada y secuencial en cuestiones de análisis y ejecución, al momento de realizar los recorridos poder mantener un nivel elevado de ocupación en los vehículos e impactar los costos de manera secundaria, obteniendo así una mejora en diferentes ámbitos.

4.1.4. Indicadores

En el gráfico 14 se presenta la comparación en el costo por unidad transportada para cada uno de los cuatro meses evaluados con el real.

Gráfico 14. Costo general por unidad transportada.



Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia la disminución del costo por unidad que este presenta una vez simulados los periodos evaluados. Teniendo en cuenta que aunque algunos meses presentaron una demanda mayor respecto a otros, como es el caso de octubre frente a diciembre, esto no significa que el costo por unidad de estos sea menor; cuando normalmente a menor cantidad de producto transportado por ruta recorrida, tiende a ser mayor el costo de estos, como ocurre en diciembre, también se pueden presentar casos como octubre, donde a pesar de tener una mayor demanda, se puede incurrir en unos altos costos debidos a la dispersión que se tengan entre los clientes a satisfacer. Por ende, sucedería que la relación entre los costos en los que se incurre y la cantidad de producto entregado pueden ser muy similar o incluso pueda dar un mayor resultado que en casos donde se presente una demanda menor.

4.2. Tendencia de los resultados

Dentro de los resultados obtenidos en todas las simulaciones, se logra identificar un patrón de comportamiento de los ahorros generados por el método frente al número de clientes. Dado que, en todas las rutas simuladas, la cantidad de clientes varía significativamente, los ahorros en términos de distancia y costos no siempre son los mismos, pero sí se puede presentar una correlación de los ahorros obtenidos respecto a la cantidad de clientes de la ruta.

Gráfico 15. Relación entre número de clientes y ahorro en distancias.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 15 se muestra la dispersión de los datos comparando la cantidad de clientes y los ahorros obtenidos en distancia. En él se puede observar que a pesar de hay cierta dispersión de los datos, la tendencia indica que, a mayor número de clientes por ruta, el ahorro obtenido por la simulación es mayor. De igual manera se logra identificar que esta afirmación no se cumple en todos los casos, dado que en seis ocasiones las rutas reales presentan menor recorrido que en las simulaciones. Esto se debe principalmente a que el método de los ahorros al no ser un método de optimización, no presenta la mejor solución, por lo que es posible que el director de transporte de la compañía haya realizado la organización de las rutas de mejor manera.

La tendencia de los ahorros en las distancias se repite para el caso de los costos, pero en esta ocasión, sólo en dos oportunidades el costo fue menor en las rutas reales que en la simulación como se observa en la gráfica 16.

Gráfica 16. Relación entre número de clientes y ahorro en costo.



Fuente: Elaboración propia.

Con base en el análisis de las gráficas, se evidencia un patrón de comportamiento a partir de un determinado número de clientes, para ambos casos, una vez superados los 60 clientes todos los ahorros son positivos y además de esto, están dentro de los valores más altos, por lo que se podría decir que, a mayor número de clientes, mayor ahorro presenta el método propuesto frente a las rutas reales.

Lo anterior se debe principalmente a que entre más alto sea el número de clientes, es mayor el número de posibles combinaciones que existen para ordenar las rutas, por lo que las probabilidades de generar rutas cercanas a las óptimas por el director de transporte disminuyen.

4.3. Conclusiones

- De acuerdo con los resultados obtenidos y al realizar el análisis de los datos de la forma en que se realiza el ruteo por parte de la empresa y la forma del método propuesto, se tiene que los costos de transporte se redujeron en un 9,3%, dejando un saldo de \$ 73.991.220 de ahorro durante el periodo evaluado. Teniendo en cuenta que la comparación se realizó bajo los mismos parámetros y condiciones.
- Para el caso de estudio, el uso del método de los ahorros para problemas con flota heterogénea, considerando costos fijos y variables, presenta mejores resultados en términos de costo al construir las rutas usando primero los vehículos con menor costo variable y capacidad. A pesar de que al usar primero los vehículos con mayor capacidad y costo variable se evidencian menores distancias, esta forma genera mayores costos, debido principalmente a la diferencia de los costos variables que presentan los vehículos de mayor capacidad.
- El algoritmo de Clarke & Wright demuestra ser más efectivo a medida que el número de clientes incrementa si se compara con la construcción de las rutas de forma empírica y demuestra mejores resultados en términos de distancia, costo, número de vehículos y tasa de ocupación, dado que mejoraron significativamente al realizar el estudio con el método propuesto.
- La tasa de ocupación es significativamente mayor usando el método de los ahorros, aumentando de 67% a 87% el promedio total del periodo evaluado, ratificando así, una de las ventajas teóricas propuestas por el método.

4.4. Recomendaciones

- Para aumentar la precisión en cuanto a los costos de transporte, la empresa podría profundizar en la construcción de un sistema de costos, de tal forma que al realizar un estudio más profundo de los costos que están presentes en cuanto al transporte de mercancía el resultado se aproxime más a la realidad.
- Realizar una estimación de los costos asociados a los peajes por los cuales se transita en la distribución del producto. Dado que los peajes tienen una participación importante en los costos de transporte, es posible realizar una estimación de los costos de estos determinando una tasa de costo por kilómetro, la cual se multiplique por la distancia y así realizar aproximación a los costos reales de los mismos.
- La empresa mejoraría considerablemente sus indicadores de transporte al implementar un método sistemático en la programación de las rutas como el que se presente en este documento, reemplazando así el método empírico con el que cuentan actualmente.
- El método propuesto se podría modificar para generar mejores resultados al implementar una metaheurística que use como base el método de los ahorros, de acuerdo con lo mencionado anteriormente en el documento.
- Según los resultados del presente trabajo, se considera factible programar los despachos usando primero los vehículos de menor capacidad, dado que genera menores costos y brinda la posibilidad de visitar los clientes cuya demanda excede la capacidad de los vehículos más pequeños, con los vehículos más grandes.

REFERENCIAS

- Amat, O. Y Soldevilla, P. (2008): "Contabilidad y gestión de costes", Ediciones Gestión 2000, Barcelona.
- Arboleda Zúñiga, J, López, A. y Lozano, Y. (2016). El problema de ruteo de vehículos [VRP] y su aplicación en medianas empresas colombianas, 30
- Allahviranloo, M., Chow, J., & Recker, W. (2014). Selective vehicle routing problems under uncertainty without recourse. *Transportation Research Part E* 62, 68-88.
- Baldacci, R., Battarra, M., Vigo, D. (2007). Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles. 1 - 2.
- Ballou, R.H. (2004). Administración de la cadena de suministro, Quinta edición.
- D. Berrio, J. Castrillón, (2008). Costos para gerenciar organizaciones manufactureras, comerciales y de servicios – 2ª Edición, Capítulo III, pp.44-46.
- Cacchiani, V., Hemmelmayr, V., & Tricoire, F. (2014). A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, 53-64.
- Cáceres, J., Grasas, A., Lourenco, H.R., Angel, A.J., Roca, M., Colomé, R. (2010). Aplicación de un algoritmo randomizado a un problema real de enrutamiento de vehículos heterogéneos, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, España.
- Dorronsoro, B., Nebro, A.J., Arias, D., Alba, E. (2015). Un algoritmo híbrido genético paralelo para instancias complejas del problema VRP. Junio, 3 - 4.
- Escobar, J., Adarme, W., Clavijo, N (2016). Comparative analysis of granular neighborhoods in a Tabu Search for the vehicle routing problem with heterogeneous fleet and variable costs (HFVRP), *Fac. Ing.* [online]. 2017, vol.26, n.46, pp.93-104.
- Erdogan, G. (2016). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems, School of Management, University of Bath, Bath BA2 7AY, UK.
- García Suarez, J.L., Arias Álvarez, A.M., Perez Méndez, J.A., García Cornejo, B., Machado Cabezas, A., Rodríguez Sánchez, P. (2010): " Cálculo, análisis y gestión de costes", Delta Publicaciones, Madrid.

Giesen, R., Muñoz, J.C. (2007). Método de Solución al Problema de Ruteo e Inventarios de Múltiples Productos para una Flota Heterogénea de Naves, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Gilbert Laporte, "The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms", European Journal of Operational Research, Vol. 59, 1991, pp 345-358.

Lau, H., Chan, T., Tsui, W., & Pang, W. (2010). Application of genetic algorithms to solve the multidepot vehicle routing problem. Automation Science and Engineering, 383-392.

Luer, A, Benavente, M, Bustos, J y Banega, B. (2009). El problema de ruteo de vehículos: Extensiones y metodos de resolucion, estado del arte. Temuco, Chile, 4 - 9.

Nuria Lorences Gonzalés, Aplicación de un sistema de costes completos a una empresa de transporte, (2013).

Olivera, A. (2004). Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos. Uruguay: Montevideo, 9 - 12.

Pedezert, C., Barreiro, J., Sosa, N. (2009). Ruteo de Vehículos.

Pérez-Carballo Veiga, J.F. (1999): "Control de la gestión empresarial", Editorial ESIC, Madrid.

Rocha Medina, L.B., González La Rota, E.C, Orjuela Castro, J.A. (2011). Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución Ingeniería, 35-55.

Sami Mnasri, F.A. & Kamel Zidi, K.G., (2013). A multi-objective hybrid BCRC-NSGAI algorithm to solve the VRPTW. 13th International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 60 - 65.

Tlili, T., Faiz, S., & Krichen, S. (2014). A Hybrid Metaheuristic for the Distance-constrained Capacitated Vehicle Routing Problem. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 779 - 783.

Wassan, N. A. & Osman, I. H. (2002). Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society, 53, 768-782.

ANEXOS

ANEXO 1: Código en VBA

```
Sub Ruta ()

    Call inicio

    'CREA HOJA
    Call borrar_hoja("RUTAS")
    Call borrar_hoja("NO_VISI")
    Sheets.Add After:=Sheets(3)
    ActiveSheet.Name = "RUTAS"
    ActiveWindow.DisplayGridlines = False

    Dim dem_comb, capacidad, carga, ult_celda, num_veh, fila_inicio, total_demanda, num_nodos As Integer
    Dim nodol, nodo2, nod1, nod2, celdal, celda2 As Integer
    Dim Costo_ruta, Costo_total, Dist_total As Single

    num_veh = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(4, 9).Value
    num_nodos = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(1, 9).Value
    total_demanda = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(num_nodos + 2, 4).Value
    fila_inicio = 1
    contador = 0

    'CUENTA CANTIDAD DE AHORROS
    ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Activate
    Range("D2").End(xlDown).Activate
    ult_celda = ActiveCell.Row
    tot_celdas = ult_celda

    For i = 1 To num_veh
        ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Activate
        Call agregar_veh_ruta(fila_inicio, i)

        'ASIGNA CAPACIDAD DEL VEHICULO
        capacidad = ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio, 6).Value

        'BUSCA NODOS CON MAYOR AHORRO, LOS ASIGNA EN LA RUTA Y EVALÚA CAPACIDAD

        For n = 2 To ult_celda
            nodol = ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Cells(n, 2).Value
            nodo2 = ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Cells(n, 3).Value
            dem_comb = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(nodol + 2, 4).Value + ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(nodo2 + 2, 4).Value

            If dem_comb <= capacidad And nodol <> 0 And nodo2 <> 0 Then
                num_ruta = i
                ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio + 4, 1) = nodol
                ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio + 5, 1) = nodo2
                ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Activate
                Rows(n & ":" & n).Select
                Selection.Delete Shift:=xlUp
                carga = dem_comb
                ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Activate
                Range("D2").End(xlDown).Activate
                ult_celda = ActiveCell.Row
                Exit For
            End If
        Next

        celdal = nodol
        celda2 = nodo2

        If celdal = 0 Or celda2 = 0 Then
            Exit For
        End If

        For j = 2 To ult_celda
            ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Activate
            Cells(fila_inicio + 3, 1).Select
            Selection.End(xlDown).Select
            contador = ActiveCell.Row

            nod1 = ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Cells(j, 2).Value
```

```

nod2 = ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Cells(j, 3).Value
celda1 = ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(filainicio + 4, 1).Value
celda2 = ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(contador, 1).Value

If nod1 = celda1 And nod2 <> celda2 Then
d = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(nod2 + 2, 4).Value
If d + carga <= capacidad Then
carga = carga + d
celda1 = nod2
Call eliminar_ahorros(nod1, ult_celda)
Call insertar_fila(filainicio + 4)
ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(filainicio + 4, 1) = celda1
ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Activate
Range("D2").End(xlDown).Activate
ult_celda = ActiveCell.Row
j = 1 'Reinicia la cuenta
'GoTo final
End If

ElseIf nod1 = celda2 And nod2 <> celda1 Then
d = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(nod2 + 2, 4).Value
If d + carga <= capacidad Then
carga = carga + d
celda2 = nod2
Call eliminar_ahorros(nod1, ult_celda)
Call insertar_fila(contador + 1)
ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(contador + 1, 1) = celda2
ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Activate
Range("D2").End(xlDown).Activate
ult_celda = ActiveCell.Row
j = 1 'Reinicia la cuenta
'GoTo final
End If

ElseIf nod2 = celda1 And nod1 <> celda2 Then
d = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(nod1 + 2, 4).Value
If d + carga <= capacidad Then
carga = carga + d
celda1 = nod1
Call eliminar_ahorros(nod2, ult_celda)
Call insertar_fila(filainicio + 4)
ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(filainicio + 4, 1) = celda1
ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Activate
Range("D2").End(xlDown).Activate
ult_celda = ActiveCell.Row
j = 1 'Reinicia la cuenta
'GoTo final
End If

ElseIf nod2 = celda2 And nod1 <> celda1 Then
d = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(nod1 + 2, 4).Value
If d + carga <= capacidad Then
carga = carga + d
celda2 = nod1
Call eliminar_ahorros(nod2, ult_celda)
Call insertar_fila(contador + 1)
ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(contador + 1, 1) = celda2
ThisWorkbook.Sheets("NODOS").Activate
Range("D2").End(xlDown).Activate
ult_celda = ActiveCell.Row
j = 1 'Reinicia la cuenta
'GoTo final
End If

End If
'End If
Next

celda1 = ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(filainicio + 4, 1).Value
celda2 = ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(contador, 1).Value
Call eliminar_ahorros(celda1, tot_celdas)

```

```

Call eliminar_ahorros(celda2, tot_celdas)

'SUMA LAS DISTANCIAS EN LA CELDA DE RECORRIDO
ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Activate
Cells(fila_inicio + 1, 2).Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(R[3]C[4]:R[" & contador - fila_inicio & "]C[4])"
Selection.NumberFormat = "0.00"
Dist_total = Dist_total + Selection.Value

ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio + 1, 6) = carga 'asigna a la celda de carga el valor de la variable carga
Call insertar_fila(contador + 1)
ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(contador + 1, 1) = 0

'LLENA TABLA CON DATOS DE CADA NODO Y ELIMINA TODOS LOS NODOS USADOS
For k = fila_inicio + 4 To contador + 1
    Call Llenar_tabla(k - 1, k)
Next

ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Activate 'BORRA VEHICULOS USADOS
Range(Cells(i + 5, 13), Cells(i + 5, 16)).Select
Selection.ClearContents

total_demanda = total_demanda - carga
fila_inicio = contador + 4

dem_comb = 0
capacidad = 0
carga = 0
nod1 = 0
nod2 = 0
nodo1 = 0
nodo2 = 0
celda1 = 0
celda2 = 0
Costo_ruta = 0
Tm1 = Timer - t1

If total_demanda = 0 Then
    Exit For
End If
Next

If total_demanda > 0 Then

Call borrar_hoja("NO_VISI")
Sheets.Add After:=Sheets(4)
ActiveSheet.Name = "NO_VISI"
ActiveWindow.DisplayGridlines = False

'CREA LISTA CON NODOS
ThisWorkbook.Sheets("NO_VISI").Cells(1, 1) = "No visitados"
For i = 1 To num_nodos - 1
    ThisWorkbook.Sheets("NO_VISI").Cells(i + 1, 1) = i
Next

'EVALÚA QUE NODOS NO SE HAN VISITADO y AGREGA RUTAS
For a = 2 To num_nodos
    For b = fila_ini + 4 To contador
        If ThisWorkbook.Sheets("NO_VISI").Cells(a, 1).Value = ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(b, 1).Value Then
            Cells(a, 1).Select
            Selection.ClearContents
        End If
    Next
Next

For i = 2 To num_nodos
    fila_inicio = contador + 4

    If ThisWorkbook.Sheets("NO_VISI").Cells(i, 1).Value <> "" Then

        n = num_ruta
        Do
            ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Activate
            Call agregar_veh_ruta(fila_inicio, n)

```

```

ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio, 2) = num_ruta + 1
capacidad = ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio, 6).Value
nodo = ThisWorkbook.Sheets("NO_VISI").Cells(i, 1).Value
demanda = ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Cells(nodo + 2, 4).Value

If demanda <= capacidad Then
    ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio + 4, 1) = nodo
    ThisWorkbook.Sheets("NO_VISI").Activate
    Cells(i, 1).Select
    Selection.ClearContents
    ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Activate
    Cells(fila_inicio + 4, 1).Select
    contador = ActiveCell.Row
    ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(contador + 1, 1) = 0
    carga = demanda
    ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Cells(fila_inicio + 1, 6) = carga

    ThisWorkbook.Sheets("DATOS").Activate 'BORRA VEHICULOS USADOS
    Range(Cells(n + 5, 13), Cells(n + 5, 16)).Select
    Selection.ClearContents

    For k = fila_inicio + 4 To contador + 1
        Call Llenar_tabla(k - 1, k)
    Next

    Cells(fila_inicio + 1, 2).Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(R[3]C[4]:R[" & contador - fila_inicio & "]C[4])"
    Dist_total = Selection.Value + Dist_total
    Selection.NumberFormat = "0.00"
    total_demanda = total_demanda - carga
    n = num_ruta + n
    Exit Do
End If
n = n + 1
Loop Until n = num_veh + 1 Or total_demanda = 0
End If

Next
End If

Call final
ThisWorkbook.Sheets("RUTAS").Activate
MsgBox ("Ruta calculada con éxito")

End Sub

```

ANEXO 2: Costos fijos de vehículos

COSTOS FIJOS NQR		
RUBRO	COSTO TOTAL	COSTO MENSUAL
Depreciación*	\$ 122.300.000	\$ 1.455.952
	7 años	
SOAT*	\$ 860.250	\$ 71.688
Impuesto para camiones de carga	\$ 122.300.000	\$ 356.708
	3,50%	
Salario del conductor	\$ 827.000	\$ 827.000
Prestaciones sociales del conductor	\$ 827.000	\$ 70.295
	8,50%	
Monitoreo	\$ 65.000	\$ 65.000
Salario de en cargado de mantenimiento	\$ 1.700.000	\$ 94.444
	18 vehículos	
Salario de en cargado de monitoreo	\$ 973.000	\$ 54.056
	18 vehículos	
TOTAL		\$ 2.995.143

COSTOS FIJOS FRR		
RUBRO	COSTO TOTAL	COSTO MENSUAL
Depreciación*	\$ 152.300.000	\$ 2.380.952
	7 años	
SOAT*	\$ 860.250	\$ 71.688
Impuesto para camiones de carga	\$ 152.300.000	\$ 444.208
	3,50%	
Salario del conductor	\$ 827.000	\$ 827.000
Prestaciones sociales del conductor	\$ 827.000	\$ 70.295
	8,50%	
Monitoreo	\$ 65.000	\$ 65.000
Salario de en cargado de mantenimiento	\$ 1.700.000	\$ 94.444
	18 vehículos	
Salario de en cargado de monitoreo	\$ 973.000	\$ 54.056
	18 vehículos	
TOTAL		\$ 4.007.643

COSTOS FIJOS FTR		
RUBRO	COSTO TOTAL	COSTO MENSUAL
Depreciación*	\$ 197.900.000	\$ 2.355.952
	7 años	
SOAT*	\$ 860.250	\$ 71.688
Impuesto para camiones de carga	\$ 197.900.000	\$ 577.208
	3,50%	
Salario del conductor	\$ 827.000	\$ 827.000
Prestaciones sociales del conductor	\$ 827.000	\$ 70.295
	8,50%	
Monitoreo	\$ 65.000	\$ 65.000
Salario de en cargado de mantenimiento	\$ 1.700.000	\$ 94.444
	18 vehículos	
Salario de en cargado de monitoreo	\$ 973.000	\$ 54.056
	18 vehículos	
TOTAL		\$ 4.115.643

COSTOS FIJOS KODIAK		
RUBRO	COSTO TOTAL	COSTO MENSUAL
Depreciación*	\$ 200.000.000	\$ 2.380.952
	7 años	
SOAT*	\$ 860.250	\$ 71.688
Impuesto para camiones de carga	\$ 200.000.000	\$ 583.333
	3,50%	
Salario del conductor	\$ 827.000	\$ 827.000
Prestaciones sociales del conductor	\$ 827.000	\$ 70.295
	8,50%	
Monitoreo	\$ 65.000	\$ 65.000
Salario de en cargado de mantenimiento	\$ 1.700.000	\$ 94.444
	18 vehículos	
Salario de en cargado de monitoreo	\$ 973.000	\$ 54.056
	18 vehículos	
TOTAL		\$ 4.146.768

ANEXO 3: Costos variables de vehículos

COSTOS VARIABLES NQR			
RUBRO	FRECUENCIA (Km)	COSTO	COSTO POR KM (\$/Km)
MOTOR			\$ 41.51
Aceite de motor	6,000	\$ 122,300.00	\$ 20.38
Filtro de aceite de motor	6,000	\$ 48,203.95	\$ 8.03
Filtro de combustible	12,000	\$ 24,762.00	\$ 2.06
Filtro de combustible trampa	12,000	\$ 121,177.00	\$ 10.10
Correa de motor	48,000	\$ 44,627.00	\$ 0.93
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			\$ 2.91
Líquido de refrigeración	48,000	\$ 124,928.00	\$ 2.60
Termostato baja temperatura	120,000	\$ 36,466.22	\$ 0.30
EMBRAGUE			\$ 10.25
Líquido de embrague	24,000	\$ 4,241.04	\$ 0.18
Prensa, disco y balineras	120,000	\$ 1,209,231.86	\$ 10.08
CAJA DE CAMBIOS (TRANSMISIÓN)			\$ 0.98
Aceite de caja de velocidades	48,000	\$ 47,050.00	\$ 0.98
EJE TRASERO (DIFERENCIAL)			\$ 2.60
Aceite de diferencial	48,000	\$ 72,000.00	\$ 1.50
Retenes de ruedas traseros (externos)	48,000	\$ 28,932.88	\$ 0.60
Retenes de ruedas traseros (internos)	48,000	\$ 23,837.00	\$ 0.50
SUSPENSIÓN DELANTERA Y TRASERA			\$ 3.99
Amortiguadores traseros	120,000	\$ 257,357.00	\$ 2.14
Amortiguadores delanteros	120,000	\$ 221,819.84	\$ 1.85
DIRECCIÓN			\$ 5.01
Retenes ruedas delanteras	48,000	\$ 26,612.28	\$ 0.55
Grasa ruedas delanteras	48,000	\$ 33,800.00	\$ 0.70
Alinear dirección	12,000	\$ 45,000.00	\$ 3.75
FRENOS			\$ 5.79
Bandas delanteras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Bandas traseras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Líquido de frenos	12,000	\$ 16,964.00	\$ 1.41
SISTEMA DE COMBUSTIBLE			\$ 3.75
Limpieza de tanque de combustible	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
Limpieza de inyectores	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
LLANTAS			\$ 493.89
Llantas traseras y delanteras (x6)	40,000	\$ 950,000.00	\$ 142.50
COMBUSTIBLE*			\$ 351.39
Galón de Diesel*	23	\$ 8,082.00	\$ 351.39
TOTAL			\$ 922.07

COSTOS VARIABLES FRR			
RUBRO	FRECUENCIA (Km)	COSTO	COSTO POR KM (\$/Km)
MOTOR			\$ 41.51
Aceite de motor	6,000	\$ 122,300.00	\$ 20.38
Filtro de aceite de motor	6,000	\$ 48,203.95	\$ 8.03
Filtro de combustible	12,000	\$ 24,762.00	\$ 2.06
Filtro de combustible trampa	12,000	\$ 121,177.00	\$ 10.10
Correa de motor	48,000	\$ 44,627.00	\$ 0.93
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			\$ 2.91
Líquido de refrigeración	48,000	\$ 124,928.00	\$ 2.60
Termostato baja temperatura	120,000	\$ 36,466.22	\$ 0.30
EMBRAGUE			\$ 10.25
Líquido de embrague	24,000	\$ 4,241.04	\$ 0.18
Prensa, disco y balineras	120,000	\$ 1,209,231.86	\$ 10.08
CAJA DE CAMBIOS (TRANSMISIÓN)			\$ 0.98
Aceite de caja de velocidades	48,000	\$ 47,050.00	\$ 0.98
EJE TRASERO (DIFERENCIAL)			\$ 2.60
Aceite de diferencial	48,000	\$ 72,000.00	\$ 1.50
Retenes de ruedas traseros (externos)	48,000	\$ 28,932.88	\$ 0.60
Retenes de ruedas traseros (internos)	48,000	\$ 23,837.00	\$ 0.50
SUSPENSIÓN DELANTERA Y TRASERA			\$ 3.99
Amortiguadores traseros	120,000	\$ 257,357.00	\$ 2.14
Amortiguadores delanteros	120,000	\$ 221,819.84	\$ 1.85
DIRECCIÓN			\$ 5.01
Retenes ruedas delanteras	48,000	\$ 26,612.28	\$ 0.55
Grasa ruedas delanteras	48,000	\$ 33,800.00	\$ 0.70
Alinear dirección	12,000	\$ 45,000.00	\$ 3.75
FRENOS			\$ 5.79
Bandas delanteras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Bandas traseras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Líquido de frenos	12,000	\$ 16,964.00	\$ 1.41
SISTEMA DE COMBUSTIBLE			\$ 3.75
Limpieza de tanque de combustible	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
Limpieza de inyectores	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
LLANTAS			\$ 567.87
Llantas traseras y delanteras (x6)	40,000	\$ 950,000.00	\$ 142.50
COMBUSTIBLE*			\$ 425.37
Galón de Diesel*	19	\$ 8,082.00	\$ 425.37
TOTAL			\$ 1,070.03

COSTOS VARIABLES FTR			
RUBRO	FRECUENCIA (Km)	COSTO	COSTO POR KM (\$/Km)
MOTOR			\$ 41.51
Aceite de motor	6,000	\$ 122,300.00	\$ 20.38
Filtro de aceite de motor	6,000	\$ 48,203.95	\$ 8.03
Filtro de combustible	12,000	\$ 24,762.00	\$ 2.06
Filtro de combustible trampa	12,000	\$ 121,177.00	\$ 10.10
Correa de motor	48,000	\$ 44,627.00	\$ 0.93
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			\$ 2.91
Líquido de refrigeración	48,000	\$ 124,928.00	\$ 2.60
Termostato baja temperatura	120,000	\$ 36,466.22	\$ 0.30
EMBRAGUE			\$ 10.25
Líquido de embrague	24,000	\$ 4,241.04	\$ 0.18
Prensa, disco y balineras	120,000	\$ 1,209,231.86	\$ 10.08
CAJA DE CAMBIOS (TRANSMISIÓN)			\$ 0.98
Aceite de caja de velocidades	48,000	\$ 47,050.00	\$ 0.98
EJE TRASERO (DIFERENCIAL)			\$ 2.60
Aceite de diferencial	48,000	\$ 72,000.00	\$ 1.50
Retenes de ruedas traseros (externos)	48,000	\$ 28,932.88	\$ 0.60
Retenes de ruedas traseros (internos)	48,000	\$ 23,837.00	\$ 0.50
SUSPENSIÓN DELANTERA Y TRASERA			\$ 3.99
Amortiguadores traseros	120,000	\$ 257,357.00	\$ 2.14
Amortiguadores delanteros	120,000	\$ 221,819.84	\$ 1.85
DIRECCIÓN			\$ 5.01
Retenes ruedas delanteras	48,000	\$ 26,612.28	\$ 0.55
Grasa ruedas delanteras	48,000	\$ 33,800.00	\$ 0.70
Alinear dirección	12,000	\$ 45,000.00	\$ 3.75
FRENOS			\$ 5.79
Bandas delanteras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Bandas traseras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Líquido de frenos	12,000	\$ 16,964.00	\$ 1.41
SISTEMA DE COMBUSTIBLE			\$ 3.75
Limpieza de tanque de combustible	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
Limpieza de inyectores	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
LLANTAS			\$ 713.94
Llantas traseras y delanteras (x6)	40,000	\$ 1,260,900.00	\$ 189.14
COMBUSTIBLE*			\$ 524.81
Galón de Diesel*	15.4	\$ 8,082.00	\$ 524.81
TOTAL			\$ 1,315.53

COSTOS VARIABLES KODIAK			
RUBRO	FRECUENCIA (Km)	COSTO	COSTO POR KM (\$/Km)
MOTOR			\$ 41.51
Aceite de motor	6,000	\$ 122,300.00	\$ 20.38
Filtro de aceite de motor	6,000	\$ 48,203.95	\$ 8.03
Filtro de combustible	12,000	\$ 24,762.00	\$ 2.06
Filtro de combustible trampa	12,000	\$ 121,177.00	\$ 10.10
Correa de motor	48,000	\$ 44,627.00	\$ 0.93
SISTEMA DE REFRIGERACIÓN			\$ 2.91
Líquido de refrigeración	48,000	\$ 124,928.00	\$ 2.60
Termostato baja temperatura	120,000	\$ 36,466.22	\$ 0.30
EMBRAGUE			\$ 10.25
Líquido de embrague	24,000	\$ 4,241.04	\$ 0.18
Prensa, disco y balineras	120,000	\$ 1,209,231.86	\$ 10.08
CAJA DE CAMBIOS (TRANSMISIÓN)			\$ 0.98
Aceite de caja de velocidades	48,000	\$ 47,050.00	\$ 0.98
EJE TRASERO (DIFERENCIAL)			\$ 2.60
Aceite de diferencial	48,000	\$ 72,000.00	\$ 1.50
Retenes de ruedas traseros (externos)	48,000	\$ 28,932.88	\$ 0.60
Retenes de ruedas traseros (internos)	48,000	\$ 23,837.00	\$ 0.50
SUSPENSIÓN DELANTERA Y TRASERA			\$ 3.99
Amortiguadores traseros	120,000	\$ 257,357.00	\$ 2.14
Amortiguadores delanteros	120,000	\$ 221,819.84	\$ 1.85
DIRECCIÓN			\$ 5.01
Retenes ruedas delanteras	48,000	\$ 26,612.28	\$ 0.55
Grasa ruedas delanteras	48,000	\$ 33,800.00	\$ 0.70
Alinear dirección	12,000	\$ 45,000.00	\$ 3.75
FRENOS			\$ 5.79
Bandas delanteras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Bandas traseras	48,000	\$ 105,000.00	\$ 2.19
Líquido de frenos	12,000	\$ 16,964.00	\$ 1.41
SISTEMA DE COMBUSTIBLE			\$ 3.75
Limpieza de tanque de combustible	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
Limpieza de inyectores	48,000	\$ 90,000.00	\$ 1.88
LLANTAS			\$ 720.75
Llantas traseras y delanteras (x6)	40,000	\$ 1,328,900.00	\$ 199.34
COMBUSTIBLE*			\$ 521.42
Galón de Diesel*	15.5	\$ 8,082.00	\$ 521.42
TOTAL			\$ 1,318.96