MODELO DE RUTEO PARA UNA EMPRESA DEDICADA A LA VENTA Y DISTRIBUCIÓN DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS UBICADA EN ANDALUCÍA, VALLE DEL CAUCA.

Carolina Pulido Ramírez

Michael Stive Rojas Alvarez

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TULUÁ, VALLE

2019

MODELO DE RUTEO PARA UNA EMPRESA DEDICADA A LA VENTA Y DISTRIBUCIÓN DE BEBIDAS ALCOHÓLICAS UBICADA EN ANDALUCÍA, VALLE DEL CAUCA.

Carolina Pulido Ramírez

Michael Stive Rojas Alvarez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial

Director

Mauricio Alejandro Buitrago Soto

Ingeniero Industrial

UNIDAD CENTRAL DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TULUÁ, VALLE

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

Director del programa

_____

Director del proyecto

_____

Jurado 1

_____

Jurado 2

_____

Jurado 3

Tuluá, Mayo del 2019.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero darle gracias a Dios, ya que gracias a él todo esto ha sido posible y a la vida por permitirme cumplir este logro. Seguidamente quiero agradecerles a mis padres por el gran esfuerzo que han hecho para sacarme adelante, a mi abuela por ese apoyo incondicional que siempre me ha brindado, a mis hermanos porque han sido esa motivación extra que he necesitado en muchos momentos. También quisiera darle gracias a nuestro director de trabajo de grado Mauricio Alejandro Buitrago Soto, por el apoyo y la atención prestada. De igual forma quiero agradecerle a mi compañera de trabajo de grado por su dedicación, apoyo y disciplina con la que asumió este reto. A mis compañeros de clase y a mi grupo de estudio gracias, porque aportaron en gran medida a todo este proceso de formación académica y personal.

Por último, quiero agradecerles a todos los docentes, a aquellas personas que también hicieron parte de este proceso y a la empresa caso de estudio por brindarnos su apoyo y por ofrecer esa gran disposición durante el desarrollo del trabajo.

Michael Stive Rojas Alvarez.

Gracias a mis padres y a mi hermana por ser los principales motores de mi vida, por cada día confiar y creer en mí, en mis expectativas, gracias a Dios por la vida de ellos, también porque cada día bendice mi vida y porque todo este proceso ha sido gracias a su voluntad.

Gracias a mi compañero de tesis, por su disciplina, dedicación y compromiso para la realización de este proyecto. Este trabajo ha sido una gran bendición en todo sentido y te agradezco padre por la confianza y el apoyo, es un orgullo para mí aportar mi granito de arena en pro del mejoramiento de nuestra empresa.

A nuestro director de trabajo de grado por su orientación, confianza y apoyo, a los docentes por su formación académica y personal, a mi grupo de estudio por su paciencia y amistad.

Gracias a la vida por este triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron e hicieron parte de este proceso.

Carolina Pulido Ramírez.

CONTENIDO

pág.

RESUMEN.....10

INTRODUCCIÓN.....12

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....14

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....14

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....16

2. JUSTIFICACIÓN.....17

3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....19

3.1 OBJETIVO GENERAL.....19

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....19

4. MARCO DE REFERENCIAS.....20

4.1 MARCO TEÓRICO.....20

4.2 ESTADO DEL ARTE.....25

5. METODOLOGÍA.....30

6. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....32

6.1 CLIENTES.....33

6.2 DEMANDA.....35

6.3 FLOTA DISPONIBLE.....36

6.4 SISTEMA ACTUAL DE DISTRIBUCIÓN.....37

6.5 ALCANCE DEL RUTEO.....38

7. FORMULACIÓN DEL MODELO.....39

7.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA 39
7.1.1 SUPUESTOS Y LIMITACIONES 40
7.1.2 PARÁMETROS 41
7.1.3 VARIABLES DE DECISIÓN 41
7.1.4 VARIABLES AUXILIARES 42
7.1.5 FUNCIÓN OBJETIVO 42
7.1.6 RESTRICCIONES 42
7.2 APLICACIÓN DEL ALGORITMO HVRP EN EL PROGRAMA AMPL 45
8. RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON SITUACIÓN ACTUAL 47
9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 49
9.1 VARIACIÓN EN LA FLOTA 49
9.2 VARIACIÓN EN LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE 50
10. CONCLUSIONES 52
11. RECOMENDACIONES 53
12. BIBLIOGRAFÍA 54
13. ANEXOS 58

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Especificaciones técnicas vehículos. 36

Tabla 2. Estación, categoría y tarifa de peajes. 37

Tabla 3. Consumo de combustible.....37

Tabla 4. Descripción de Rutas.....38

Tabla 5. Comparativa de escenarios actual y propuesto.....47

Tabla 6. Descripción de escenarios 49

LISTADO DE ILUSTRACIONES

pág.

Ilustración 1. División de la optimización.....22

Ilustración 2. Diagrama de proceso de distribución.....32

Ilustración 3. Localización clientes.....34

Ilustración 4. Distribución de clientes en municipios. 35

Ilustración 5. Optimizadores de AMPL.....46

Ilustración 6. Interfaz del solver. 46

Ilustración 7. Ruteo propuesto 48

Ilustración 8. Escenarios variación de flota vehicular.....50

Ilustración 9. Escenarios variación de requerimiento de clientes. 51

LISTADO DE ANEXOS

pág.

ANEXO A. Registro de pedidos por cliente. 58

ANEXO B. Peso promedio. 59

ANEXO C. Matriz de distancias entre municipios. 60

RESUMEN

El problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea y con un solo depósito, conocido como HVRP, representa la realidad de múltiples compañías, que desde un solo depósito y con vehículos de diferentes características deben abastecer un conjunto de clientes dispersos geográficamente. Este tipo de problema se encuentra clasificado en la categoría Np-hard debido a sus características de complejidad combinatoria.

En este trabajo se aborda el caso específico de una compañía ubicada en Andalucía Valle del Cauca, dedicada a la distribución de bebidas alcohólicas, en la cual se identifica una oportunidad de mejora relacionada con la planificación y programación del ruteo de vehículos, ya que no cuentan con ninguna herramienta para soportar la toma de este tipo de decisiones operativas. Por lo tanto se propone un algoritmo de optimización de tipo HVRP que combina técnicas heurísticas con programación entera mixta para obtener soluciones factibles en términos de reducción de la distancia total recorrida.

Se inicia con una revisión de la literatura, destacando temáticas relacionadas con la investigación y anteriores trabajos, seguidamente se realiza una descripción de la situación actual de la empresa, identificando sus características y parámetros importantes como datos de entrada para el modelo de optimización. Seguidamente, se desarrolla la metodología con los enfoques de optimización descritos y finalmente se procede a dar solución utilizando el lenguaje de programación AMPL y el solucionador IBM ILOG CPLEX, que genera resultados, se analizan y se establecen las conclusiones y recomendaciones de este estudio.

Palabras clave: problema de ruteo de vehículos, flota heterogénea, heurística.

ABSTRACT

The problem of vehicle routing with heterogeneous fleet and a single deposit, known as HVRP, represents the reality of multiple companies, which must supply to set of dispersed customers from a single deposit and with vehicles of different characteristics geographically. This type of problem is classified in the category Np-hard due to their characteristics of combinatorial complexity.

This work deals with the specific case of a company located in the municipality of Andalucía Valle del Cauca, dedicated to the distribution of alcoholic beverages, which identifies an opportunity for improvement regarding the planning and programming of the vehicle routing, not have any tools to support such operational decisions making. It therefore decides to propose an algorithm of optimization of HVRP type combining technical heuristics with mixed integer programming for feasible solutions in terms of reduction of the total distance travelled.

Initially carried out a review of the literature, highlighting issues related to the research and previous studies, then is a description of the current situation of the company, identifying characteristics and parameters important as input to the optimization model. Then develops the methodology of optimization approaches described and finally proceed to solve using the AMPL programming language and the IBM ILOG CPLEX Solver, which produces the results that are analyzed to establish the conclusions and recommendations of this study.

Keywords: vehicle routing problem, fleet heterogeneous, heuristic.

INTRODUCCIÓN

La globalización, y el acceso a nuevos mercados, culturas y tecnologías, obligan a las empresas cada vez a tomar decisiones más complejas buscando un alto grado de competitividad. Un factor esencial para la competitividad de las compañías es la administración de la logística dentro de la cadena de suministros y su relación con el transporte. Así, una de las decisiones de mayor transcendencia que las compañías deben afrontar está relacionada con el diseño y gestión de la distribución, que abarca todas aquellas actividades encaminadas a la planificación, implementación y control de un flujo de mercancías desde el depósito hasta los clientes finales.

En este contexto la asignación de vehículos y el diseño de rutas en los sistemas de transporte son fundamentales para su buen funcionamiento, y teniendo en cuenta que el problema de ruteo de vehículos busca optimizar las rutas en busca de minimizar su costo o distancia recorrida cumpliendo con un conjunto de restricciones, es una herramienta útil para abordar problemáticas de este tipo.

Con base a lo anterior el presente trabajo de grado se desarrolló en una empresa dedicada a la venta y distribución de bebidas alcohólicas” la cual se encuentra ubicada en la Andalucía Valle del Cauca. El trabajo está encaminado a la propuesta de un ruteo con flota heterogénea de vehículos que contribuya a minimizar la distancia total recorrida en el abastecimiento de los clientes del centro y norte del departamento.

El desarrollo del presente estudio surge a partir de la identificación de una oportunidad de mejora, en un aspecto representativo a nivel de costos, como lo es la distribución, actualmente el proceso decisorio sobre ruteo de vehículos no está fundamentado y carece de criterio, ya que se basa en la experiencia del trabajador, generando sobreutilización y un alto grado de incertidumbre por incumplimiento en la norma

que regula el límite de peso para tránsito en carretera, por lo tanto, pretende brindar un soporte matemático que permita optimizar el conjunto de rutas de modo que genere la menor distancia recorrida.

Para dar cumplimiento a esta propuesta inicialmente se realizaron constantes visitas a la empresa con el fin de elaborar una descripción que permitiera conocer detalladamente su funcionamiento.

Posteriormente, estudiando la teoría de los problemas de ruteo de vehículos se identificó el modelo que más se ajustaba a la situación de la empresa y se realizaron ajustes para cumplir con sus necesidades específicas. Finalmente, empleando métodos heurísticos se da solución al problema de ruteo y se interpretan resultados para concretar la propuesta.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Entendiéndose la logística según la Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP), como la parte del proceso encargada de garantizar una eficiente y efectiva planeación, ejecución y control del flujo y almacenamiento de bienes y servicios, desde el punto de origen hasta el punto de consumo[1], se hace necesaria una buena gestión, ya que al tratarse de aspectos clave de la operación organizacional, condicionan la satisfacción percibida por los clientes, lo cual aportaría como ventaja competitiva.

Desde un punto de vista económico, es importante tener en cuenta que, dentro de los costos pertenecientes a la logística, son de fácil identificación los atribuibles al transporte que componen el 35.2%[2] del costo logístico total, el cual "se lleva el 13.5% de los ingresos de las compañías en Colombia"[3], por lo tanto, una reducción en estos llevaría a un ahorro considerable para la empresa.

La empresa caso de estudio se dedicada a la venta y distribución de bebidas alcohólicas, la cual abastece la demanda de 68 clientes que se distribuyen en 13 municipios del centro y norte del departamento del Valle del Cauca. Las rutas inician en el depósito ubicado en el municipio de Andalucía y se desplazan hacia los clientes para finalizar el recorrido en el depósito.

Emplean una flota heterogénea de dos vehículos, cada uno conducido por una tripulación a cargo, compuesta por un conductor y un ayudante, contratados

---

[1] Council of Supply Chain Management Professionals. Citado por BALLOU, Ronald H. [En línea] https://cscmp.org/
[2] MONTERROSA, Heidy. 2018. Logística se lleva 13.5% de los ingresos de las compañías en Colombia. La República. 2018.
[3] Ibid.

directamente por la empresa, pero que también deben cumplir con los domicilios del mismo municipio, por lo tanto los días que realizan entrega se debe disponer de empleados temporales para cubrir dicha labor.

De acuerdo con Ballou[4], el problema de ruteo de vehículos (VRP) tiene como objetivo determinar un conjunto de rutas que representen una menor distancia recorrida o un menor costo, en donde existe un conjunto de clientes y depósitos que deben ser visitados por una flota disponible, la cual debe iniciar y terminar en los depósitos. El diseño de rutas para los vehículos se puede presentar en diferentes variaciones del problema general, teniendo en cuenta posibles cambios en características propias de la flota disponible, de los depósitos y los clientes.

La asignación de pedidos a determinada ruta se realiza de manera empírica, sin considerar restricciones de capacidad de los vehículos, generando sobreutilización y un alto grado de incertidumbre por incumplimiento en la norma que regula el límite de peso para tránsito en carretera por lo que sería "sancionado con multa equivalente a treinta (30) salarios mínimos legales diarios vigentes"[5], además "el vehículo será inmovilizado y el exceso deberá ser transbordado"[6] lo anterior ocasiona retrasos, incumplimiento para el cliente y/o un costo no programado.

Como tal se identifica una oportunidad de mejora, dado que el proceso decisorio sobre ruteo de vehículos no está fundamentado y carece de criterio, lo que acompañado de una correcta planificación genera impactos positivos sobre la cadena de suministro.

---

[4] BALLOU, Ronald H. 2004. LOGÍSTICA. Administración de la cadena de suministros. México : Pearson Educación de México, 2004.
[5] COLOMBIA, MINISTERIO DE TRANSPORTE. Ley 1383 (16, marzo, 2010). Por la cual se reforma la Ley 769 de 2002 - Código Nacional de Tránsito, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial Bogotá D.C., No 47653.
[6] Ibid.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿Cuál es el conjunto óptimo de rutas que genera la menor distancia recorrida para una flota de vehículos que debe cumplir con la entrega de pedidos en la empresa caso de estudio?

2. JUSTIFICACIÓN

Los problemas relacionados con el transporte o la distribución son factores que afectan directamente la operación de las organizaciones y a su vez la disponibilidad y accesibilidad de los bienes, lo cual se traduce finalmente en la satisfacción percibida por el cliente. Es importante saber que, dentro de los costos pertenecientes a la logística, son de fácil identificación los atribuibles al transporte y componen el 35.2%[7] del costo logístico total el cual "se lleva el 13.5% de los ingresos de las compañías en Colombia"[8].

Para la empresa caso de estudio, los costos de transporte representan el 12,68% de los ingresos promedio, lo cual vuelve más atractiva la posibilidad de proponer un modelo que optimice el proceso de ruteo para la compañía, dado que la minimización de distancias recorridas significaría un ahorro en dichos costos.

Lo anterior, acompañado de la cambiante situación del mercado y del mundo en general, exigen un mayor esfuerzo por parte de las empresas para mantenerse competitivas y fuertes dentro del mercado, por lo tanto, buscan fortalecer sus ventajas, a través de una mayor inversión e investigación.

"Las empresas están resolviendo la reducción de costos y el aumento de la calidad a través de la mejora de la productividad"[9] convirtiendo la investigación de operaciones en alternativa como medio y herramienta de optimización.

---

[7] MONTERROSA, Heidy. 2018. Logística se lleva 13.5% de los ingresos de las compañías en Colombia. La República. 2018
[8] Ibíd.
[9] FREIVALDS, Andris Y NIEBEL, Benjamin W. Ingeniería industrial: métodos, estándares y diseño del trabajo. México : McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V, 2009.

De este modo, los modelos de optimización matemática son en gran medida utilizados en situaciones reales para soportar la toma de decisiones de tipo operativo, contribuyendo en el incremento de la productividad, mejorando el aprovechamiento de los recursos, incentivando la reducción de costos de operación, incrementando la satisfacción de los clientes y contribuyendo paralelamente en un desarrollo sostenible.

Teniendo en cuenta las características de la empresa y revisando la literatura se considera que un modelo de ruteo puede ser adaptado e implementado, ya que no requiere de ningún tipo de inversión y permite apuntar hacia soluciones relacionadas con la problemática identificada.

En este orden de ideas, la empresa objeto de estudio espera que a partir de la propuesta de ruteo se logre mejorar la utilización de los recursos de la cadena de suministros, mejorar el proceso de distribución propiamente, teniendo un mayor control sobre éste, de manera que se logre una mejor planificación de las rutas y asignación de vehículos, evitando generar sobrecostos de distribución asociados a la contratación de empleados temporales.

3. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer el ruteo de una flota heterogénea de vehículos que contribuya a minimizar la distancia total recorrida en el abastecimiento de los clientes del centro y norte del Valle del Cauca.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los elementos que conforman la asignación de vehículos y rutas dentro del sistema de la empresa caso de estudio.
- Construir el modelo de programación matemática de acuerdo con los factores involucrados en el proceso de distribución.
- Validar el modelo mediante el análisis comparativo de los escenarios actual y óptimo matemático.

4. MARCO DE REFERENCIAS

4.1 MARCO TEÓRICO

La presente investigación apunta hacia un problema relacionado con el transporte de mercancías de la empresa; factor que ha ganado cada vez más importancia dentro de lo que comprende el funcionamiento de la cadena de suministros, como afirma Rojas, “hoy en día el único elemento diferenciador real en los mercados actuales es el servicio, y el transporte es una pieza vital en ese logro. Sin esto, la pérdida del cliente es un hecho seguro”[10].

Por lo tanto, entender la importancia que recae sobre el transporte a la hora de hablar de la satisfacción del cliente, es un aspecto clave para determinar la relevancia que tiene atacar problemas relacionados con dicho tema para el trabajo en pro de cumplir con la promesa de valor al cliente, lo cual acercaría a la posibilidad de garantizar relaciones redituables con estos. Lo anterior también es de considerarse, teniendo en cuenta que “la premisa de la gestión de la cadena de suministro (SCM por sus siglas en inglés, Supply Chain Management) es que el rendimiento de una sola empresa depende cada vez más de su capacidad de mantener relaciones eficaces y eficientes con su proveedores y clientes”[11].

Por otra parte, al analizar el peso que tienen los costos atribuibles al transporte sobre los costos totales de la empresa, se torna necesario hacer un análisis de éstos, siendo un aspecto relativo, porque cuando se busca una menor tarifa de transporte existe una gran posibilidad de encontrar alternativas que permitan costos

---

[10] ROJAS SERRANO Rodrigo, 2014. MBA & Educación Ejecutiva. [En línea] 02 de Febrero de 2014. [Citado el: 20 de Abril de 2019.] https://mba.americaeconomia.com/articulos/reportajes/la-importancia-del-transporte-en-la-cadena-logistica.

[11] LEUKEL, Joerg y SCHEUERMANN, Andreas. 2014. Supply chain management ontology from an ontology engineering perspective. s.l.: Computers in Industry, 2014, Vol. 65, pág. 913-923.

muy bajos, sin embargo, “no sirve de nada si ese transporte llega tarde o simplemente no cumple cuando el cliente lo necesita”[12]. Por lo anterior, en el presente trabajo, no se busca atacar directamente los costos relacionados con el transporte, sino, las rutas utilizadas para la distribución, de manera que se logre cumplir a todos los clientes en las estregas, realizando el recorrido más corto.

Al abordar este problema como un problema de optimización establecido a partir de un modelo matemático, es necesario entender inicialmente que “modelo se define como una representación con cierto grado de precisión y en la forma más completa posible de la realidad”[13], lo que permite aproximar el posible comportamiento de una situación real cuando se le practican cambios. De igual forma, se debe conocer que los problemas de optimización pueden ser clasificados en tres categorías, teniendo en cuenta el tipo de variables que utilizan, como se puede evidenciar en la Ilustración 1. Existen aquellos que se forman por variables continuas, los que necesitan de variables discretas y aquellos que disponen de ambos tipos; denominados problemas combinatorios o mixtos. “En los primeros (continuos), se busca una función o conjunto de números reales y en los combinatorios se busca un objeto finito (posiblemente contable) dentro de un conjunto de posibles soluciones”[14].

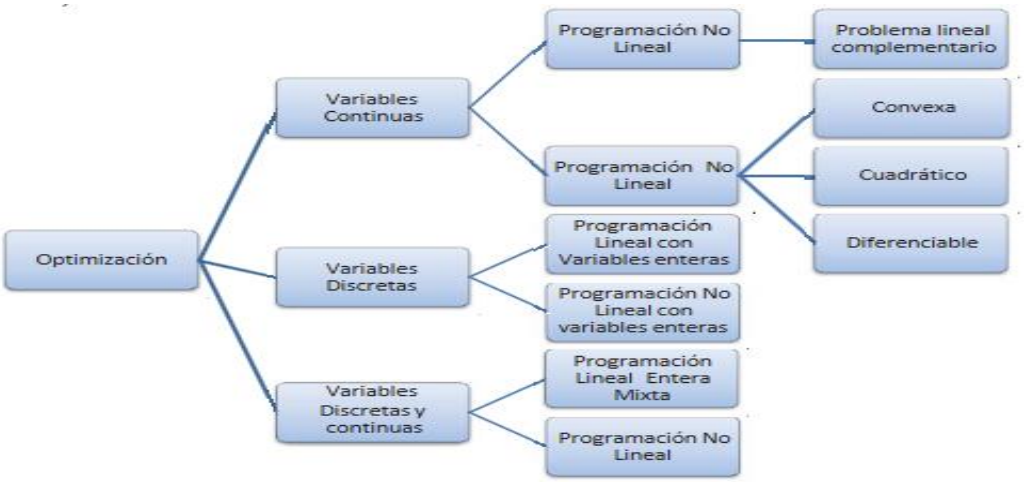
Dentro de lo que incluyen los problemas combinatorios, se puede encontrar el estudio de los ciclos (circuitos), siendo en este caso de estudio los denominados hamiltonianos, los de interés. Se define ciclo hamiltoniano a una sucesión de aristas (en nuestro caso caminos entre clientes) que comunican a todos los vértices o nodos (clientes) una única vez, es decir, durante la ruta se pasa solamente una vez

---

[12] ROJAS Op. Cit.,
[13] WADSWORTH, J. 1997. Análisis de Sistemas de Producción Animal - Tomo 2: las Herramientas Básicas. 1997. Vol. 2.
[14] FLOOD, Merril M. OPERATION RESEARCH, the traveling salesman problem. s.l. : Columbia University NY, Vol. 4, págs. 61-75.

por cada uno de los clientes[15]. Es importante aclarar que en un ciclo hamiltoniano no es posible formar subrutas, es decir, no se pueden generar recorridos que no incluyan la visita a todos los vértices.

Ilustración 1. División de la optimización



Fuente BERMÚDEZ COLINA, Yeicy. Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta. pág. 88. (2011) Disponible en internet: https://www.redalyc.org/html/2150/215024822007/

Como problema común en el ciclo hamiltoniano, se encuentra el denominado Problema del Agente Viajero (TSP), que "es catalogado como un problema de complejidad NP completo, es decir, el número de posibles soluciones crece exponencialmente con el número de nodos (clientes)"[16]. Se conoce como el problema de optimización más popular de la investigación de operaciones, que consiste en que un agente debe visitar solamente una vez cada estación (cliente)

[15] HERNÁNDEZ PEÑALVER, Gregorio. DMATIC. [En línea] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos. [Citado el: 29 de Abril de 2019.] http://www.dma.fi.upm.es/personal/gregorio/grafos/.
[16] RODRÍGUEZ VILLALOBOS, Alejandro. 2006. Grafos: herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos. Valencia: X Congreso de Ingeniería de Organización, 7 y 8 de Septiembre de 2006.

del conjunto de estaciones y regresar a su punto de origen, formando una ruta, de manera que el recorrido total realizado, sea el mínimo.

Por otra parte, el problema de ruteo de vehículos (VRP) presenta una mayor complejidad que el TSP, dado que el VRP en teoría es un compendio de múltiples problemas de tipo TSP pero difiere en que el VRP considera restricciones y características que agregan complejidad al problema. Siendo un problema de optimización combinatoria y de programación entera, comprende además de las variables enteras algunas lineales como la función objetivo y algunas restricciones. Según Federgruen y Simchi[17] el problema clásico de ruteo de vehículos consiste en determinar un conjunto de rutas de vehículos, en los que una ruta es un recorrido que inicia en el depósito, atraviesa un conjunto de clientes con una secuencia específica y vuelve al depósito. Cada cliente es visitado por un solo vehículo y estos están restringidos por la capacidad del vehículo. El objetivo definido para estos problemas es minimizar el costo de viaje.

Entre las más conocidas variantes que muestra el problema clásico de ruteo teniendo en cuenta las características de la situación a la cual se va a aplicar, se encuentran:

- CVRP (Problema de ruteo de vehículos con capacidad).
- MDVRP (Problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos).
- PVRP (Problema de ruteo de vehículos periódico).
- SDVRP (Problema de ruteo de vehículos con recogida y entrega).
- HFCVRP (problema de ruteo con flota heterogénea).
- VRPTW (problema de ruteo de vehículos con ventana de tiempo).
- SVRP (problema de ruteo de vehículos estocástico)

[17] FEDERGRUEN, Awi y SIMCHI LEVI, David. 1995. Analysis of Vehicle Routing and Inventory-Routing Problems. In Handbooks in Operations Research and Management Science. 1995. pág. 297-373.

- VRPB (problema de ruteo de vehículos los consumidores pueden demandar o retornar algunas mercancías)
- SDVRP (problema de ruteo de vehículos donde los consumidores pueden ser atendido por diferentes vehículos)

Teniendo en cuenta que el VRP es de complejidad NP-hard, dado que el número de soluciones aumenta exponencialmente con el número de nodos, entre los que incluye tanto clientes como depósitos, hace que se sobrepase la capacidad de cálculo de los equipos de cómputo más potentes. Para abordar problemas de hasta 50 nodos, se han propuesto métodos exactos como lo son el de ramificación y acotamiento entre los pertenecientes a la búsqueda directa de árbol. "También para solucionar el VRP se ha incluido programación dinámica y la programación lineal y entera"[18].

Una alternativa de solución, son "los algoritmos exactos, que producen una solución óptima, pero no siendo adecuados en aplicaciones que requieran soluciones que tratan de resolver instancias de problemas muy grandes o en poco tiempo"[19], ya que la característica de complejidad del VRP hace esto computacionalmente no eficiente. Aunque un algoritmo exacto logra encontrar la solución exacta al problema, la demora de la búsqueda lo haría completamente inaplicable. Otra particularidad de este tipo de algoritmo es que es totalmente dependiente del problema, es decir, debe rediseñarse cuando éste cambia las características.

Por otra parte, se encuentran los algoritmos heurísticos los cuales a partir de una aproximación intuitiva busca una buena solución, la cual no garantiza que sea la

[18] GONZÁLEZ LA ROTA, Elsa Cristina, ORJUELA CASTRO, Javier Arturo y ROCHA MEDINA, Linda Bibiana. 2011. Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. 2011. págs. 35-55.
[19] ORREGO CARDOZO, Juan Pablo, OSPINA TORO, Daniela y TORO OCAMPO, Eliana Mirledy. 2016. Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística. Universidad Tecnológica de Pereira. 2016.

óptima, para determinado tipo de problema. “Estos algoritmos de aproximación, a diferencia de los métodos exactos, permiten obtener una solución de calidad en un tiempo razonable”[20].

Como otra alternativa de solución, existen las técnicas metaheurísticas, que a pesar de que no solamente se quedan en los óptimos locales, tampoco garantizan una solución óptima. “Los metaheurísticos son algoritmos de aproximación que combinan heurísticos tradicionales con estrategias eficientes de exploración del espacio de búsqueda”[21]. La ventaja de este tipo es la gran flexibilidad que permite abordar una gran cantidad de problemas.

Por último, los mateheurístico, que según Boschetti[22], se definen como algoritmos por la interoperación de metaheurística y técnicas de programación matemática (MP). Dicho en otras palabras, un mateheurístico es un híbrido compuesto por elementos de técnicas heurísticas, metaheurística y métodos de solución exactos.

4.2 ESTADO DEL ARTE

Balderrama[23] en 2013, mediante su estudio titulado “modelo de ruteo para maximizar la cantidad de precios recopilados por el programa: quién es quién en los precios”, busca determinar las rutas para un grupo de encuestadores del programa, de manera que se logre maximizar la cantidad de precios recopilados para la alimentación de bases de datos, utilizando un modelo adaptado del TSP. De los

---

[20] CONTRERAS PINTO, Claudia Marcela y DÍAZ DELGADO, María Fernanda. 2010. Métodos heurístico para la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad (CVRP). Bucaramanga : s.n., 2010.

[21] BLUM, Christian y ROLI, Andrea. 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. s.l. : ACM Computing Surveys, 2003. pág. 268-308.

[22] BOSCHETTI, Marco y MANIEZZO, Vittorio. 2009. Banders descomposition, Lagrangean relaxation and metaheuristic design. 2009.

[23] BALDERRAMA TELLEZ, Victor Hugo. 2013. Modelo de ruteo para maximizar la cantidad de precios recopilados por el programa "Quién es quién en los precios". México D.F : s.n., 2013

resultados obtenidos, se muestra que la cantidad de datos calculada con las rutas obtenidas a partir del modelo es mayor que la cantidad promedio de precios recolectados con las rutas reales, por lo tanto, esto evidencia que la aplicación del modelo genera un beneficio real en el desempeño del grupo de encuestadores, en comparación con lo realizado por el grupo de encuestadores de manera normal.

También se logra definir que la aplicación de un modelo para el cálculo de rutas, que permita maximizar los datos recolectados, sirve para aprovechar los recursos tanto humanos como técnicos, a través de la reducción de la variabilidad en horarios de recolección de la información, dando paso a la estandarización de la operación.

Molina[24] en 2013, en su investigación se centra en una extensión del problema de optimización de ruteo de vehículos (VRP), incluyendo entre los aspectos más importantes, variantes como limitación de capacidad, programación temporal de entregas y recogidas (ventanas de tiempo) y flota heterogénea; teniendo en cuenta los diferentes tipos de combustibles. Para dicha investigación se establecen dos modelados de programación lineal entera mixta, uno estimando los costes externos y asociados al transporte y el otro para un problema multiobjetivo, que busca además de la optimización, incluir aspectos medioambientales para la búsqueda de una solución factible. Los modelos experimentados usando el programa CPLEX, durante un período de 3600 segundos, sin explorar la totalidad del espacio de soluciones, arroja que la consideración de los costes medioambientales en la configuración de las rutas, muestran que las soluciones son de buena calidad y pueden permitir resolver el modelo ecoeficiencia.

[24] MOLINA GÓMEZ, José Carlos. 2013. Problema de optimización de rutas de vehículos con aspectos medioambientales. Sevilla: s.n., 2013.

Gómez, Zuluaga y Espinosa[25] en 2015, definen el problema como un camión asignado para la distribución de productos cárnicos, que parte del CEDI hacia cuatro puntos de venta y termina nuevamente en el CEDI. Establecen como función objetivo, minimizar la distancia total recorrida cumpliendo con restricciones para evitar la creación de subrutas y garantizar una única visita por cliente. Para modelar la distribución, proponen una adaptación del Problema del Vendedor Ambulante, con la teoría de grafos, en donde se incluyó la representación de los arcos, nodos de origen y puntos de venta. Una vez corrido el modelo, se logró identificar una disminución de 5 kilómetros en las distancias recorridas durante la distribución, siendo esto un tiempo de 38 minutos por ruta, soportando así la posibilidad de desarrollar modelos de VRP con TSP para apoyar la toma de decisiones pertinentes para minimizar distancias del ruteo en la distribución. De igual forma proponen la posibilidad de utilización coordinada de otras.

Nossa[26] en su investigación en 2016, presenta un modelo de ruteo basado en programación dinámica aplicado a una empresa de productos de consumo masivo, que tiene como objetivo buscar una solución óptima, para realizar el recorrido de entrega de los pedidos, de manera que se realice la ruta más corta y viable en tiempos, cumpliendo con las fechas y tiempos negociados con los clientes, logrando mejorar el nivel de servicio. Para la solución del modelo se propone la heurística del vecino más cercano, considerando tres escenarios en donde varía la frecuencia de entrega. Mediante los resultados se evidencia que la programación dinámica con la heurística del vecino más cercano es un medio que permite realizar un diseño de ruteo teniendo en cuenta las distancias y restricciones como demanda, capacidad, limitaciones de tiempo, entre otros factores. Como resultado propio de esta

[25] GOMEZ MONTOYA, Rodrigo A, ZULUAGA MAZO , Abdul y ESPINOZA OVIEDO, Jorge E. 2015. Modelamiento de distribución de productos cárnicos como un TSP (Traveling Salesman Problem) con teoría de grafos. 2015.
[26] NOSSA GUERRERO, Silvia Alejandra. 2016. Propuesta de un modelo de ruteo basado en programación dinámica aplicado a una empresa de productos de consumo masivo. Bogotá: s.n., 2016.

investigación, se obtuvo que el escenario con mayor desempeño fue el número tres, que consiste en realizar una ruta cada cinco días, permitiendo atender toda la demanda y utilizando solamente un vehículo.

En el año 2016 Maguiña[27] propone la implementación de VRP Solver para el ruteo del transporte terrestre en el área de distribución en donde se busca minimizar los tiempos de entrega, a partir de la denominación de rutas que muestren una mínima distancia a recorrer en el proceso de distribución de productos alimenticios. Para determinar la solución que más se adapta al problema y que arroje soluciones óptimas, se realizó una evaluación por criterios de los modelos (de transporte, de transbordo), heurísticas (de Clarke Wright, vecino más próximo y de inserción) y algoritmos (k-Opt, Barrido, búsqueda tabú). Precisamente teniendo como datos entrantes, la ubicación de cada cliente, a partir de la heurística de Clarke Wright y algoritmo k-opt, se logra definir las rutas óptimas, las cuales permiten disminuir 44 KM en distancia, lo cual equivale a un 10% de la distancia total en las rutas de la empresa.

En 2017 Orellano, Ortiz, Vanegas y Yepes[28] en su estudio realizan una aplicación del problema del agente viajero a los principales hoteles de la ciudad de barranquilla, en donde establecen como principal objetivo hallar la ruta más corta para repartir la mercancía a un conjunto de clientes (hoteles) proveniente de un solo almacén. Para lo anterior se definió un modelo que cumpliera con las diferentes restricciones y parámetros deducidos. Para dar solución a dicho problema, se utilizó la herramienta “Optimizer”. A partir de los resultados generados, se puede decir que existe gran variedad de software y aplicaciones disponibles que permiten dar solución a este tipo de problemas y de igual manera se logró destacar la importancia

[27] MAGUIÑA AGURTO, Lucero Lizeth. 2016. Implantación de VRP - Solver aplicando la heurística de Clarke Wright para el ruteo del transporte terrestre en el área de distribución caso de estudio: industrias alimentarias. Lima : s.n., 2016.
[28] ORELLANA, Ronald José, y otros. 2017. Aplicación del problema de agente viajero a los principales hoteles de la ciudad de Barranquilla. 2017.

que tiene la correcta solución de los TSP a la hora de implementar sistemas logísticos y para la toma de decisiones relacionadas con el transporte y la distribución de mercancías.

La evaluación del modelo de programación de la distribución se realiza a partir de los datos obtenidos de una empresa del sector textil y muestra que el modelo permite obtener el óptimo en un porcentaje elevado de ejemplares para horizontes temporales. La investigación se enfocó principalmente en la aplicabilidad del modelo, más que en los propios resultados arrojados por el mismo.

En 2018, Salcedo[29] establece como objetivo principal formular un modelo de ruteo de vehículos que permita minimizar la distancia total que realiza una flota heterogénea conformada por 9 vehículos, durante el proceso de recolección de leche. Para dichas características, definiendo el problema como una variante del problema general de ruteo de flotas (VRP), donde además de las características ya descritas, se encuentra con que la empresa caso de estudio cuenta con un solo centro de acopio y un conjunto de 15 nodos (agrupación de proveedores) dispersos geográficamente. Mediante el programa Gusek y con el método de solución proxy, teniendo en cuenta la complejidad del modelo y un tiempo razonable de solución, se obtuvo a partir del modelo propuesto, una disminución de la distancia lineal del 16,21% y una reducción del 22.22% de los vehículos utilizados para realizar las rutas, pasando de utilizar 9 a 7 vehículos.

[29] SALCEDO GIL, Juan Sebastián. 2018. Propuesta de ruteo para una flota heterogénea de vehículos en la recolección de leche de una empresa del eje cafetero. Zarzal: s.n., 2018.

5. METODOLOGÍA

Este proyecto de estudio es una investigación aplicada que tiene por objetivo proponer una alternativa de solución basada en los conocimientos propios de la Ingeniería Industrial, a una situación problemática que se ha identificado con anterioridad, para ello se ha definido:

1. Caracterizar los elementos que conforman la asignación de vehículos y rutas dentro del sistema de la empresa caso de estudio.
   1.1. Mediante la observación, se describe la metodología de reparto actual, se detalla cada una de las actividades que se realizan para la toma de pedidos, asignación y carga de vehículos. Cómo se hace, en qué se hace, cada cuánto se hace, quién lo hace.
   1.2. Se determinan las características propias de los vehículos a través de la revisión de la ficha técnica del vehículo, se extrae la información sobre el tipo de combustible que emplea, el consumo en galones por kilómetro, la capacidad de carga en kilogramos, cilindraje y modelo.
   1.3. Se Identifica la ubicación de los 68 clientes, de manera conjunta con los vendedores de la empresa caso de estudio y empleando la aplicación de Google Maps®, a partir de lo cual se puede realizar agrupación por municipios.
   1.4. Se calculan las distancias entre municipios, empleando la información y herramienta del punto anterior.
2. Construir el modelo de programación matemática de acuerdo con los factores involucrados en el proceso de distribución.

   La revisión del estado del arte, construcción del marco teórico, los planteamientos de Tucker, y otros (1960), Baldacci, Roberto, y otros (2008),

Salcedo, Juan Sebastián (2018) y los supuestos propios de la situación de la empresa caso de estudio son la base para la construcción del modelo.

2.1. Se describen y delimitan las variables de decisión sobre las cuales el modelo proporciona una solución óptima o que se aproxime a ella.

2.2. Se determina la función objetivo: minimizar la distancia total recorrida por la flota de vehículos disponible

2.3. Se especifican restricciones del modelo.

2.4. Se plantea el modelo matemático y se escribe en lenguaje AMPL para resolver en los servidores NEOS.

2.5. Se valida la certeza con la que el modelo puede predecir el comportamiento del sistema, realizando variaciones en algunos de sus parámetros y evaluando el impacto que genera en el resultado del modelo.

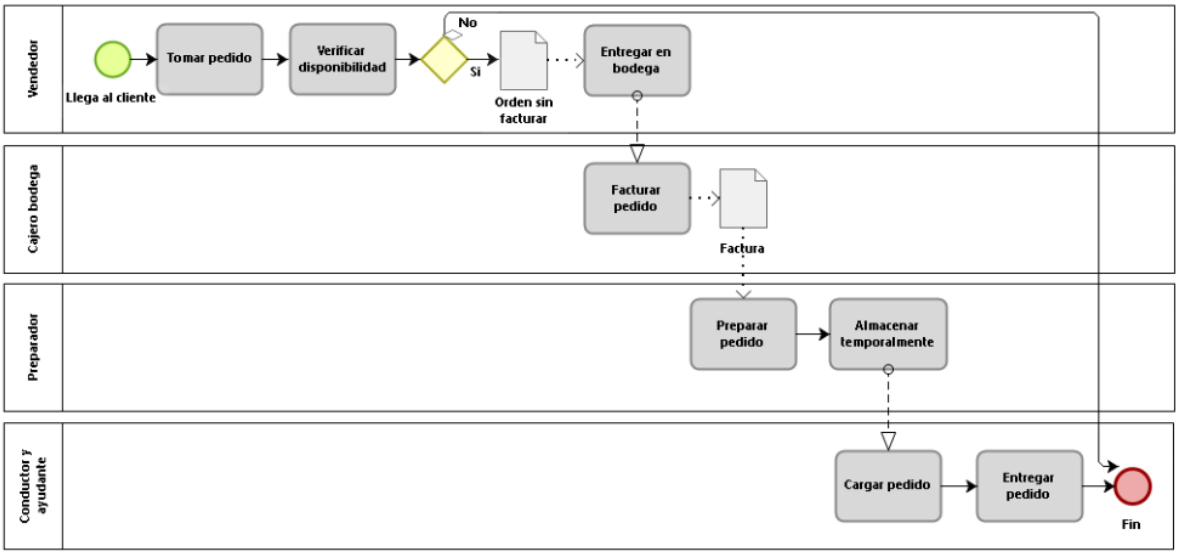
3. Se valida la propuesta mediante el análisis comparativo de los escenarios actual y óptimo, evaluando el valor de la distancia total recorrida de la situación actual versus la distancia generada por el modelo, asimismo se realizan comparaciones en los costos.

6. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

La empresa caso de estudio se dedica a la comercialización de bebidas alcohólicas, confitería, cigarrería, desechables, snacks, refrescos, y cervecería, cubriendo parte de la zona centro-norte del Valle del Cauca, llegando además de Andalucía y sus veredas, a municipios tales como Tuluá, La Paila, La Uribe, Sevilla, Caicedonia, Quebrada Nueva, Zarzal, La Victoria, Cartago, Ansermanuevo, Toro, La Unión y Roldanillo.

Teniendo en cuenta la descripción mostrada en la Ilustración 2, el proceso inicia cuando el vendedor visita el cliente y allí procede a tomar el pedido, el cual hace de manera manual empleando un facturero denominado orden de pedido. Dicho documento se entrega al cajero de la bodega, quien es responsable de realizar la facturación.

Ilustración 2. Diagrama de proceso de distribución.



Fuente: Autores.

Actualmente este proceso se realiza uno o dos días antes de la entrega, las rutas hacia el norte del valle son tomadas lunes y martes para entrega miércoles y jueves, para el centro del valle (Tuluá), se toman los pedidos en la mañana del viernes para entregar en la tarde. Los días de toma de pedidos y recolección se han establecido teniendo en cuenta que durante estas jornadas los trabajadores tienen mayor disponibilidad debido al bajo movimiento. Al realizar la toma de pedidos con días de anticipación, permite tener un conocimiento de la demanda con antelación, de manera que se pueda realizar un correcto proceso de alistamiento de la mercancía.

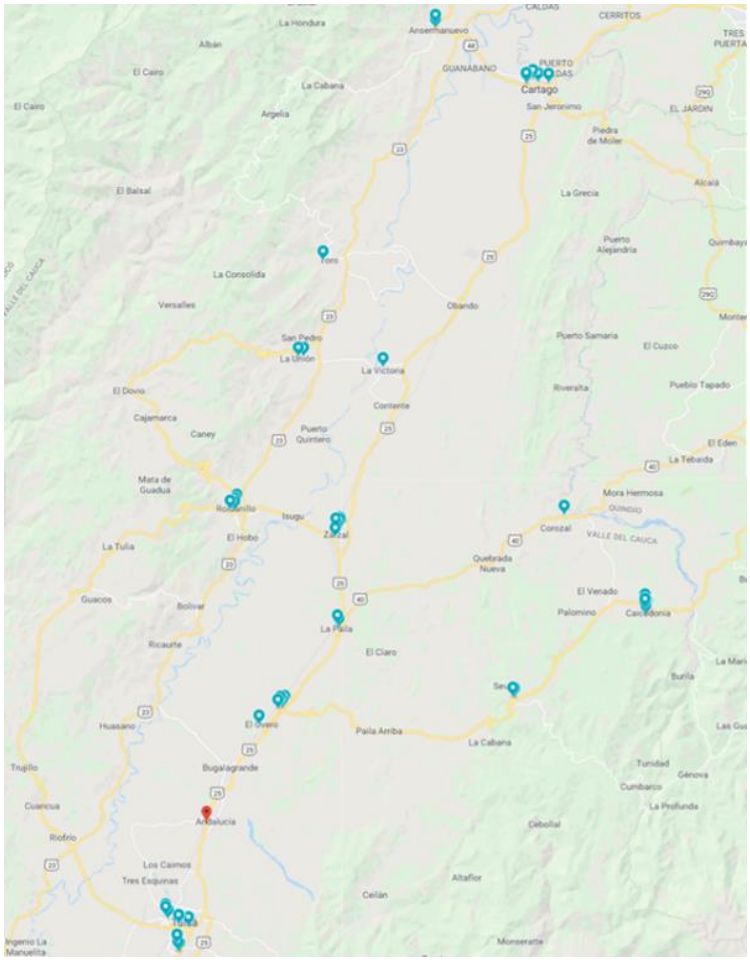
La persona encargada del alistamiento de los pedidos organiza y almacena temporalmente la mercancía hasta que el vehículo asignado se encuentre disponible para ser cargado, realizándose un día antes de la entrega.

Para realizar el cargue del vehículo se utiliza la metodología de almacenamiento LIFO; en donde el último pedido es el primero que será entregado y esta priorización, así como la asignación del vehículo se realiza basada en la experiencia del conductor del vehículo y su ayudante.

6.1 CLIENTES

La empresa abastece 68 clientes ubicados en 13 municipios del centro y norte del Valle del Cauca, los cuales pueden ser observados en Ilustración 3 con etiquetas azules.

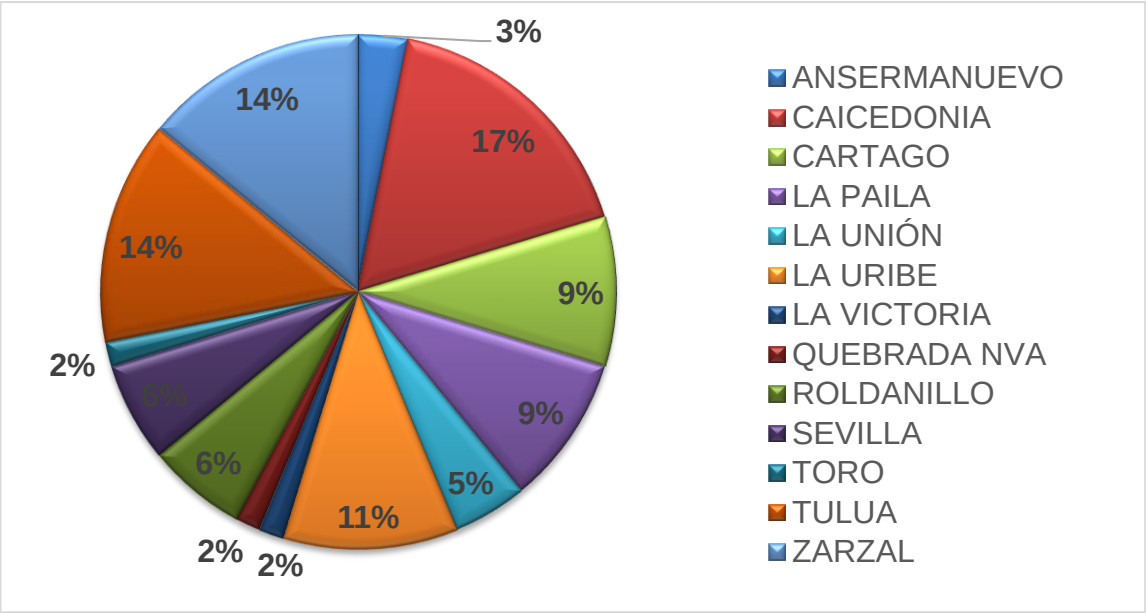
Ilustración 3. Localización clientes.



Fuente: Autores tomado de Google Maps.

La Ilustración 4 muestra la concentración de los clientes según el municipio, de lo que se puede concluir que la mayoría de estos se encuentran en Caicedonia, Tuluá y Zarzal, representando el 17%, 14% y 14% respectivamente de la totalidad.

Ilustración 4. Distribución de clientes en municipios.



Fuente: Autores.

6.2 DEMANDA

Los valores de demanda tomados fueron los registrados en la última semana de observación que corresponde a los pedidos tomados desde el primero hasta el 5 de abril del año en curso. Lo anterior debido a que corresponde a una demanda que varía de semana en semana y se conoce con anticipación.

La información proporcionada por la empresa determina la demanda en número de cajas, tal como se muestra en el ANEXO A, debido a que no se especifica a qué tipo de producto corresponden las cajas es necesario establecer la carga estándar de las unidades que son transportadas, para ello se calculó un promedio de los pesos recopilados que se pueden apreciar en el ANEXO B el cual arrojó un valor de 14 kg. Para soportar que el valor es representativo se analizó el coeficiente de variación e indicó baja variabilidad de los datos con 0,3645, asimismo la mediana es muy próxima al promedio (15,675 kg).

6.3 FLOTA DISPONIBLE

La empresa caso de estudio dispone de dos vehículos para realizar las rutas de distribución de los productos, para determinar las capacidades de carga y transporte, es necesario tener en cuenta la ficha técnica correspondiente. A continuación, en la Tabla 1, se muestra un resumen de la descripción del camión JAC 1040 y camioneta CHEVROLET LUV respectivamente.

Tabla 1. Especificaciones técnicas vehículos.

Camión JAC 1040 JKR POWER 3.1 toneladas		**Camioneta CHEVROLET LUV TFR 1 tonelada**	
Descripción		**Descripción**	
Cilindraje	2.771 cc	Cilindraje	2.300 cc
Combustible	Diésel	Combustible	Gasolina
Modelo	2016	Modelo	1994
Capacidades		**Capacidades**	
Peso en vacío	1.590 Kg	Peso en vacío	1.615 kg
Capacidad de carga	3.300 kg	Capacidad de carga	1.235 kg
Peso bruto vehicular	4.890 kg	Peso bruto vehicular	2.850 kg
Consumo de combustible	0.070 galón/km	Consumo de combustible	0.054 galón/km
Fuente: Autores.			

Los costos de peajes en que se incurren en el desplazamiento entre los diferentes municipios dependen de la clasificación vehicular del ministerio de transporte[30], el Camión JAC 1040 JKR POWER corresponde a categoría II, mientras que la Camioneta CHEVROLET LUV TFR a categoría I. De este modo, conociendo la categoría, a continuación, en la Tabla 2 se presenta un resumen de las tarifas vigentes del año 2019 y categorías de interés para los peajes tomado de INVIAS y PISA.

[30] COLOMBIA, MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 228. (1, febrero, 2013).Por la cual se fijan tarifas de peaje para las estaciones a cargo del Instituto Nacional de Vías (Invías) y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial Bogotá D.C., 2013 No 48691.

Tabla 2. Estación, categoría y tarifa de peajes.

NOMBRE	CATEGORÍA	VALOR
Corozal	I	10,400
	II	12,600
La Uribe	I	9,000
	II	11,500

Fuente: Autores tomado de INVIAS y PISA.

El costo de combustible por kilómetro recorrido se calcula teniendo en cuenta la tarifa vigente al mes de Abril de 2019 de la empresa TERPEL en Andalucía según el Ministerio de Minas[31]. Es un parámetro que varía constantemente, por lo tanto, se debe actualizar cada que se vaya a correr el modelo. En la Tabla 3 se muestra un resumen que incluye las tarifas y el consumo por tipo de vehículo.

Tabla 3. Consumo de combustible.

VEHÍCULO	TIPO	TARIFA	CONSUMO
Camión JAC	Diesel	$8.570	$597/km
Camioneta LUV	Corriente	$9.150	$495/km

Fuente: Autores tomado de Precios de combustibles MinMinas.

6.4 SISTEMA ACTUAL DE DISTRIBUCIÓN

Para abastecer los clientes, la distribución es realizada en tres rutas, que se pueden evidenciar en la

Tabla **4**, que muestra la descripción de las rutas, indicando la secuencia de municipios que visita, el vehículo en que se realiza, la distancia recorrida y la frecuencia de ejecución.

[31]Ministerio de Tecnologías de la información y las Comunicaciones. Portal Datos Abiertos Colombia. [En línea] wwww.datos.gov.co.

Tabla 4. Descripción de Rutas.

Ruta		Vehículo	Distancia Recorrida	Frecuencia
1	Andalucía – Tuluá – Andalucía.	Camioneta LUV	32.12 Km	Viernes, semanal.
2	Andalucía – Sevilla – Caicedonia – Quebrada Nueva – Andalucía.	Camión JAC 1040	127.5 Km	Miércoles, quincenal.
3	Andalucía – La Uribe – La Paila – Zarzal – Roldanillo – La Unión – Toro – Ansermanuevo – Cartago – La Victoria – La Uribe – Andalucía.	Camión JAC 1040	204 Km	Jueves, semanal.

Fuente: Autores.

6.5 ALCANCE DEL RUTEO

La propuesta de ruteo en este trabajo de grado se realizará para los 13 municipios en donde se encuentran ubicados los (68) clientes a los que abastece la empresa caso de estudio, teniendo en cuenta también el municipio de Andalucía Valle del Cauca, que es donde se encuentra ubicado el depósito.

Los resultados del ruteo están relacionados con los datos y parámetros de entrada que han sido tenidos en cuenta para la ejecución del modelo, por lo tanto, éstos responden únicamente para el comportamiento en un momento dado. Teniendo en cuenta lo anterior y el comportamiento de la demanda, el modelo debe correrse semanalmente y para ello es necesario introducir información actualizada. Sin embargo, el alcance del proyecto va hasta la construcción y validación del modelo y no hasta su implementación.

7. FORMULACIÓN DEL MODELO

Para la construcción del modelo, se tuvieron en cuenta los datos proporcionados por la empresa, que relacionaban los clientes y su ubicación, lo cual fue utilizado para realizar la agrupación de clientes por municipio, es decir, se toma como nodo, cada municipio que es visitado, ya que se agrupan los clientes ubicados en un mismo municipio, lo cual da como resultante 13 nodos que se deben visitar y para los cuales se realiza la programación de las rutas. Posteriormente, por medio de la aplicación GoogleMaps®, se ubicaron los municipios que eran visitados durante la ejecución de la distribución, lo cual permitió tener las distancias entre dichos municipios que se pueden visualizar en el ANEXO C que servirían como datos de entrada para los parámetros del modelo.

Identificando en la empresa caso de estudio un problema de optimización combinatoria y de programación entera mixta, y teniendo en cuenta las características que describen el ruteo, se determina que la variante que más se ajusta y mediante la cual se basará el modelo, es el problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea o HVRP, que consiste en diseñar el conjunto óptimo de rutas capaz de abastecer un grupo disperso de clientes a través de una flota de vehículos con diferente capacidad.

7.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El problema de enrutamiento del vehículo con flota heterogénea se puede modelar a través de un gráfico ponderado $G = (N, A, V)$. El conjunto N representa los nodos de la red (municipios y depósito), siendo el nodo 1 el depósito y los nodos $2, \dots, n$ los diferentes municipios. El conjunto A contiene los arcos (i, j) del gráfico. La mejor ruta para viajar desde el nodo i al nodo j está denotada por d_{ij} con un costo

asociado c_{ij}. El conjunto V corresponde a los vehículos que abastecen a los clientes, en muchos casos, un solo vehículo no puede ir a todos los municipios, dado que su capacidad es limitada. Cada municipio debe ser visitado una sola vez y tiene asociado un peso de pedido B_i. Estos parámetros se conocen de antemano.

Para la construcción del modelo matemático, se tuvo como referencia los planteamientos de Tucker, Miller y Zemlin[32], Baldacci, Battarra y Vigo[33] y Salcedo[34], ajustando las restricciones y demás parámetros para representar la situación real en el modelo final.

7.1.1 SUPUESTOS Y LIMITACIONES

A continuación, se presentarán un conjunto de supuestos y limitaciones que fueron necesarias considerar para la formular el modelo de programación entero mixto.

1. Las limitaciones de cada vehículo están dadas por su capacidad máxima de carga.
2. Los pedidos de los nodos están representados por la carga en unidades de peso (kg) y son discretos.
3. Se considera el abastecimiento o depósito único.
4. La flota de vehículos es heterogénea, por lo que cada vehículo tiene capacidad de carga en peso diferente y los costos (peajes y consumo) atribuibles son diferentes.
5. El modelo elige el vehículo a usar, de acuerdo con su capacidad y las demandas de los clientes.
6. Los vehículos pueden o no hacer uso de su capacidad total.

---

[32] MILLER, C. E., TUCKER, A. W. y ZEMLIN, R. A. 1960. Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. New York: Journal, 1960.
[33] BALDACCI, Roberto, BATTARRA, Maria y VIGO, Daniele. 2008. Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles. s.l.: Springer Verlag, 2008.
[34] SALCEDO. Op. CIT., pág.64

7. Cada nodo debe ser visitado por un solo vehículo.
8. La demanda en una ruta no debe exceder la capacidad del vehículo.
9. La entrega dividida no está permitida.
10. Cada ruta debe comenzar y terminar en el depósito.
11. No se consideran ventanas de tiempo, por lo que se dispone de tiempo suficiente para entregar los pedidos de todos los nodos.

La composición del modelo matemático está basada en la estructura propuesta por Taha[35], en donde se establecen los parámetros, las variables de decisión, variables auxiliares, la función objetivo y las restricciones.

7.1.2 PARÁMETROS

B_i = Peso del pedido del nodo i (kg). Puede tomar el subíndice j cuando se quiere representar un destino como un origen.

d_{ij}= Distancia entre el nodo i y el nodo j (km).

c_{ijk}= Costos asociados al movimiento entre nodo i y nodo j usando vehículo k ($).

Q_k= Capacidad del vehículo k (kg).

g_k= Consumo de combustible del vehículo k $(\$/km)$.

7.1.3 VARIABLES DE DECISIÓN

Se define la variable x_{ij}^k para indicar que i es el nodo origen, j el nodo destino y k corresponde al vehículo que se va a utilizar para cubrir la ruta. Debido a que se debe dar cumplimiento de secuenciación el conjunto de nodos destino j puede convertirse en nodos origen i. Asimismo, Z_i^k indica que el vehículo k es empleado para visitar el nodo i además es una variable definida para representar restricciones

[35] TAHA, Hamdy A. 2012. . Investigación de operaciones. Novena. México : Pearson, 2012.

del vehículo donde garantice que visite un solo nodo y posteriormente abandone para continuar la ruta.

$$x_{ij}^{k} = \begin{cases} 1, & Si\ el\ vehículo\ k\ viaja\ del\ nodo\ i\ al\ nodo\ j \\ 0, & Lo\ contrario \end{cases}$$

$$Z_{i}^{k} = \begin{cases} 1, & Si\ el\ vehículo\ k\ viaja\ al\ nodo\ i \\ 0, & Lo\ contrario \end{cases}$$

7.1.4 VARIABLES AUXILIARES

Y_{ij}= Variable discreta que denota los kilogramos que se deben llevar desde el nodo i hacia el nodo j.

W_{i}^{k} = Variable discreta que denota los kilogramos con que sale el vehículo k del nodo i. Puede tomar el subíndice j cuando se quiere representar un destino como un origen.

U_{i}^{k} = Variable discreta que denota la posición de un nodo i en la ruta que es atendida por el vehículo k.

7.1.5 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo del modelo que se muestra en la Ecuación 1 busca minimizar la distancia total recorrida como resultado de la entrega del producto y el uso del vehículo.

Ecuación 1

$$Mín \sum_{k=1}^{s} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} d_{ij} x_{ij}^{k}$$

7.1.6 RESTRICCIONES

La Ecuación 2 garantiza que un nodo sea visitado una única vez por un vehículo k. La Ecuación 3 garantiza que los vehículos que salen del depósito, visita a un nodo

z y regresa al depósito. La Ecuación 4 restringe la cantidad de vehículos tipo k que hay disponibles para salir del depósito. La Ecuación 5 especifica que la diferencia entre los kilogramos que lleva el vehículo antes de visitar a un nodo j y después de dejarlo, sea igual a la demanda del nodo j, es decir, que el peso que se lleva acumulado antes de entrar al nodo j, es comparado con el peso que lleva al salir del nodo j hacia otro nodo i, y es igual a la demanda (peso) del nodo j que visitó.

Ecuación 2

$$\sum_{k=1}^{s}\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^{k} = 1, \qquad \forall_j = 2, 3, \dots, n$$

Ecuación 3

$$\sum_{k=1}^{s}\sum_{i=1}^{n} x_{iz}^{k} - \sum_{k=1}^{s}\sum_{j=1}^{n} x_{zj}^{k} = 0, \qquad \forall_z = 2,3, \dots, n$$

Ecuación 4

$$\sum_{j=2}^{n} x_{1j}^{k} \leq 1, \qquad \forall_k = 1, \dots, \mathrm{s}$$

Ecuación 5

$$\sum_{i=1}^{n} Y_{ij} - \sum_{i=1}^{n} Y_{ji} = B_j, \qquad \forall_j = 2, \dots, n$$

La Ecuación 6 establece el peso del vehículo k. La Ecuación 7 define que cada nodo sea visitado al menos por un vehículo k. Asimismo, la Ecuación 8 obliga al vehículo a salir del nodo, aquí se invierten los subíndices de las variables porque se habla del mismo nodo j de donde debe salir el vehículo. La Ecuación 9 expresa el cálculo de la carga total de un vehículo k, se emplea la variable W con el subíndice j debido a que se debe incluir el peso que debe transportar hasta el destino j. La Ecuación 10 restringe la creación de subtours.

Ecuación 6

$$W_i^k = B_i * \sum_{j=1}^{n} x_{ij}^k, \qquad \forall_i = 2, \dots, n; \forall_k = 1, \dots, K$$

Ecuación 7

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^k = Z_i^k, \qquad \forall_i = 1, 2, \dots, n; \ \forall_k = 1,2, \dots, K$$

Ecuación 8

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ji}^k = Z_i^k, \qquad \forall_i = 1, 2, \dots, n; \ \forall_k = 1,2, \dots, K$$

Ecuación 9

$$\sum_{j=2}^{n} W_j^k \leq \mathrm{Q}_k, \qquad \forall_i = 1, 2, \dots, n; \ \forall_k = 1, 2, \dots, K$$

Ecuación 10

$$U_i^k - U_j^k + x_{ij}^k - (n-1) * \left(1 - x_{ij}^k\right) + (\mathrm{n}-2) * x_{ij}^k, \ \ \forall_i, \forall_j = 2, 3, \dots, n; \forall_k = 1, 2, \dots, K$$

La Ecuación 11, Ecuación 12, Ecuación 13 y Ecuación 14 determinan la naturaleza y la integridad de las variables.

Ecuación 11

$$x_{ij}^{k} \in \{0,1\},\ \forall_i, \forall_j = 1, 2, \dots, n; i \neq j;\ \forall_k = 1, 2, \dots, K$$

Ecuación 12

$$Y_{ij}^{k} \geq 0;\ \forall_i, \forall_j = 1, 2, \dots, n; i \neq j;\ \forall_k = 1, 2, \dots, K$$

Ecuación 13

$$W_i^k \geq 0;\ \forall_i = 1, 2, \dots, n;\ \forall_k = 1, 2, \dots, K$$

Ecuación 14

$$U_i^k \geq 0;\ \forall_i = 1, 2, \dots, n;\ \forall_k = 1, 2, \dots, K$$

7.2 APLICACIÓN DEL ALGORITMO HVRP EN EL PROGRAMA AMPL

El modelo anterior, considerando la característica NP-Hard de las variantes del VRP y dada configuración de sus variables, parámetros, función objetivo y restricciones, es validado mediante el servidor NEOS, el cual permite arrojar soluciones en tiempos razonables. Los datos de entrada al servidor se fueron descritos a partir de un lenguaje de programación AMPL.

Para la ejecución del modelo en el servidor, teniendo en cuenta la variedad de solucionadores que ofrece la plataforma, fue seleccionado el optimizador IBM ILOG CPLEX, teniendo en cuenta su capacidad de solución frente a algoritmos de programación entera mixta, como se puede analizar en la Ilustración 5.

Ilustración 5. Optimizadores de AMPL

Optimizador	Algoritmos	Versión AMPL
CPLEX	lineal (símplex) lineal (interior) redes cuadrático entero lineal	AMPL PLUS AMPL dos
XLSOL	lineal (símplex) cuadrático entero lineal	AMPL PLUS
MINOS	lineal (símplex) No lineal	AMPL PLUS AMPL dos
GRG2	No lineal Entero no Lineal	AMPL PLUS

Fuente: LUQUE, Pedro Luis. 2000. Lenguaje AMPL. 2000. 2.

El servidor utilizado para la validación del modelo muestra una interfaz (Ilustración 6) en donde se puede observar las iteraciones realizadas (860197), el número de variables (848), el número de restricciones (659), entre otros atributos del modelo.

Ilustración 6. Interfaz del solver.

```
Presolve eliminates 0 constraints and 6 variables.
Adjusted problem:
848 variables:
        588 binary variables
        260 linear variables
659 constraints, all linear; 5492 nonzeros
        188 equality constraints
        471 inequality constraints
1 linear objective; 546 nonzeros.

CPLEX 12.7.0.0: threads=4
CPLEX 12.7.0.0: optimal integer solution; objective 339
860197 MIP simplex iterations
76079 branch-and-bound nodes
No basis.
```

Fuente NEOS Server 2019

Las características básicas de las computadoras utilizadas por el servidor NEOS para correr el algoritmo son: procesador 2x Intel Xeon E5-2698 2.3 GHz, 192 GB de memoria RAM.

8. RESULTADOS Y COMPARACIÓN CON SITUACIÓN ACTUAL

Inicialmente, es necesario tener en cuenta que el ruteo realizado por la empresa caso de estudio actualmente se ejecuta por una flota de dos vehículos de diferente capacidad, los cuales distribuyen a través de 3 rutas, de las cuales 2 se hacen en el camión JAC y la restante en la camioneta LUV. En este ruteo actual se recorren 363.62 kilómetros. La comparación entre dicho ruteo y el propuesto, se puede analizar en la Tabla 5, donde se puede observar: la distancia recorrida, los costos incurridos y la utilización de los vehículos disponibles. De igual forma se puede apreciar la variación porcentual que representaría el escenario propuesto.

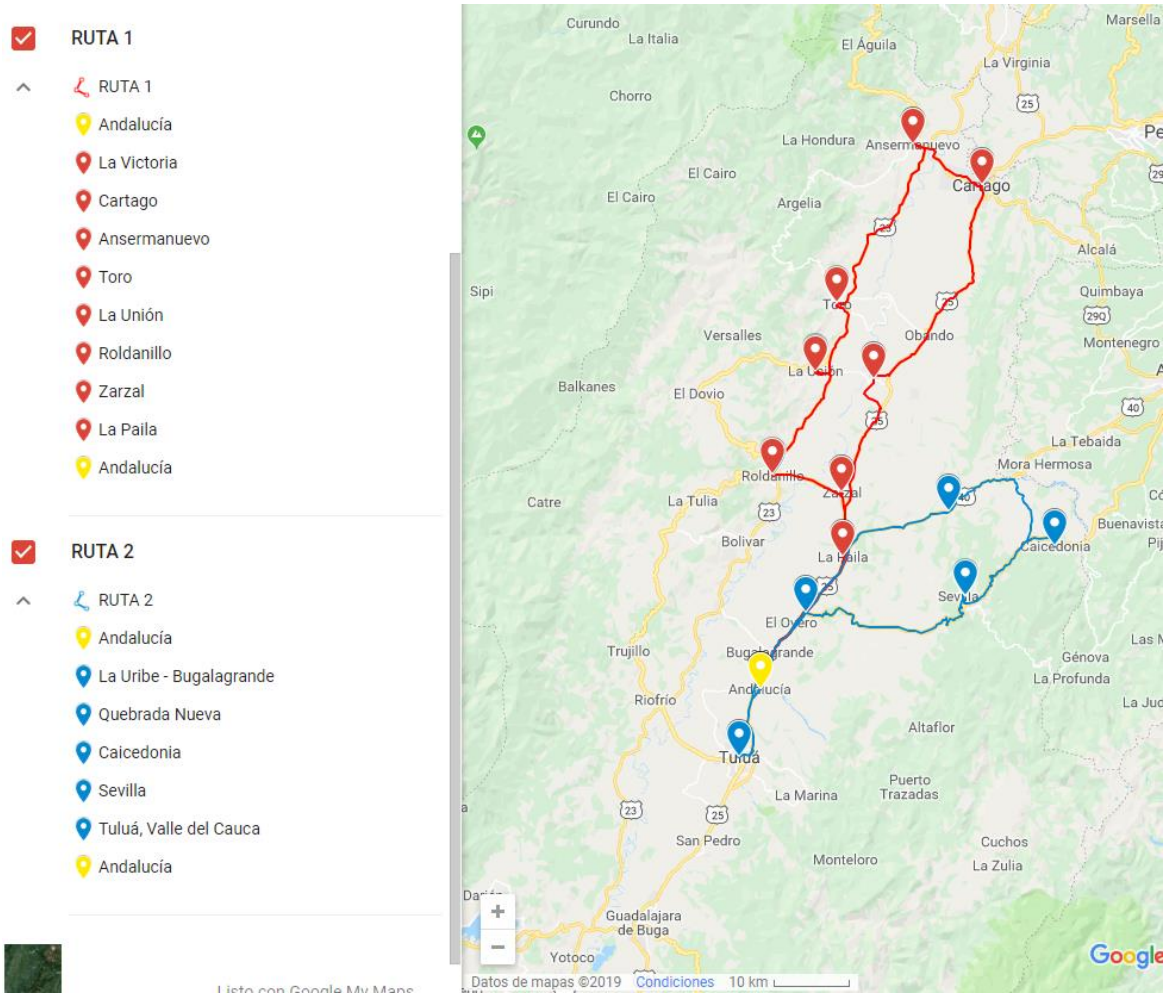
Tabla 5. Comparativa de escenarios actual y propuesto

	Escenarios		Disminución (%)
	Actual	Propuesto	
Distancia recorrida (km)	363,62	339,00	6,80
Costos incurridos ($)	260.842	249.387	4,40
Utilización de los vehículos (%)	100,00	66,66	33,33
Fuente: Autores			

El ruteo propuesto en el trabajo de grado arroja una distancia total recorrida de 339 kilómetros, en donde el proceso de distribución se hace por medio de dos rutas como se puede ver en la Ilustración 7, asignando dos veces el Camión JAC y dejando inutilizada la camioneta LUV.

A través del ruteo propuesto, se consigue una reducción en la longitud de la ruta del 6.8%, se logra una disminución del 4.4% de los costos incurridos en el proceso de distribución, lo que se traduce en $11.455 y se necesitaría un 33.3% menos de los vehículos que se utilizan en el ruteo actual, lo que permitiría minimizar el desgaste de la camioneta LUV.

Ilustración 7. Ruteo propuesto



Fuente: Autores

9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Para entender mejor el comportamiento del modelo HVRP propuesto, se realizó un análisis de sensibilidad, el cual muestra el impacto que se evidencia en la función objetivo al variar parámetros del modelo como: cantidad disponible de vehículos y requerimientos de los clientes.

9.1 VARIACIÓN EN LA FLOTA

Se crearon 3 posibles escenarios, con el fin de evaluar el impacto que hay en la función objetivo al cambiar el parámetro que se refiere a la cantidad de vehículos disponibles para asignar las rutas de distribución.

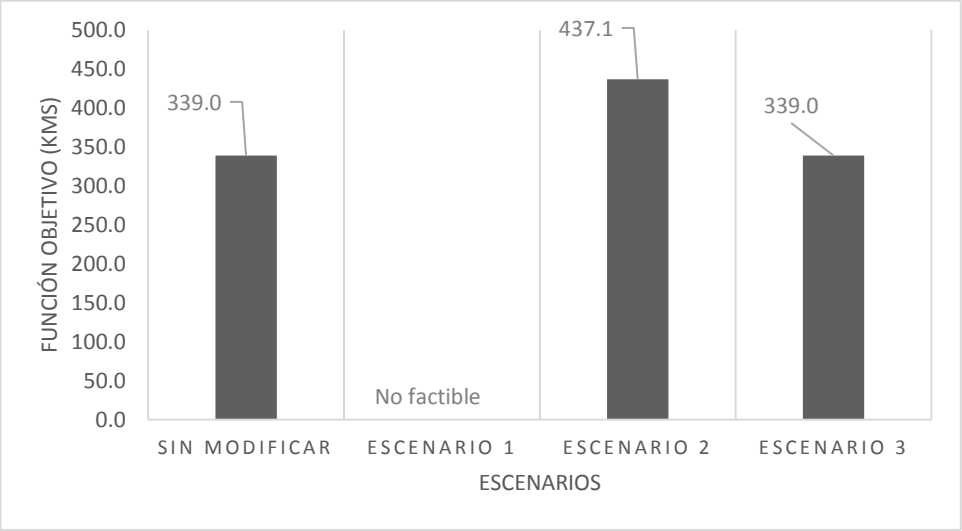
El análisis de sensibilidad se realizó corriendo el modelo modificando los parámetros en los 3 escenarios planteados, tal como lo muestra la Tabla 6. Los informes arrojados por el servidor NEOS, se pueden ver en: escenario 1, escenario 2 y escenario 3, de donde se pueden concluir lo mostrado en la Ilustración 8; el escenario 3 genera la misma función objetivo que la situación sin modificar, esto se debe a que el resultado arrojado por ésta es emplear dos camiones JAC y dejar inactiva la camioneta LUV.

Tabla 6. Descripción de escenarios

Vehículo/Cantidad	Sin modificar	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Camioneta LUV	1	1	3	0
Camión JAC	2	1	1	2

Fuente Autores

Ilustración 8. Escenarios variación de flota vehicular.

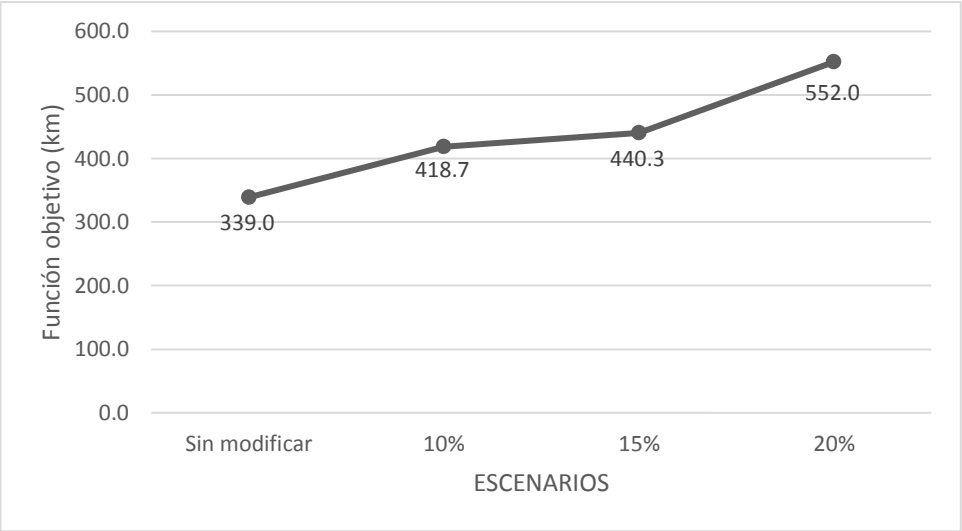


Fuente Autores.

9.2 VARIACIÓN EN LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

Con el fin de evaluar cuál es el impacto en la función objetivo si los requerimientos de los clientes incrementan y por ende se transportaría más mercancía, se realizaron 3 escenarios uno en el cual se incrementó el producto recogido en un 10%, 15% y 20%. Se puede concluir que ningún escenario generó disminución en la función objetivo (ver Ilustración 9), se puede decir que existe correlación positiva.

Ilustración 9. Escenarios variación de requerimiento de clientes.



Fuente Autores.

10. CONCLUSIONES

El comportamiento del sistema se puede representar mediante un modelo HVRP, ya que cuenta con una flota cuya capacidad de carga y costo asociado de operación es diferente, información que fue extraída de la descripción y observación de la situación actual, permitiendo dar soporte a la toma de decisiones de tipo operativo relacionadas con el ruteo de vehículos, planteando como objetivo la reducción de la distancia total recorrida durante el proceso de distribución.

Se pudo apreciar que el modelo es sensible a los cambios en la flota de vehículos además se percibe una correlación positiva del 95,22% al incremento en el requerimiento de los clientes, por lo que se puede concluir que el modelo es representativo de la realidad, ya que arroja resultados coherentes con las variaciones realizadas.

El modelo propuesto muestra una disminución de la distancia total recorrida del 6.8% para el conjunto de rutas estudiado, lo que contribuye con la reducción de $11.455 en el costo variable asociado al consumo de combustible y redujo en un 33.3% el tamaño de flota utilizada. Mejorando el funcionamiento del sistema con los recursos disponibles a costo cero.

11. RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones realizar un análisis de demanda para predecir su comportamiento y alimentar el modelo con una distribución de probabilidad que permita una programación a largo plazo.

Teniendo en cuenta el alcance de la investigación, se sugiere realizar un análisis de costos o inclusive un proyecto de factibilidad para la implementación de la propuesta, así como el diseño de una aplicación que permita correr el modelo de manera periódica y con información cada vez más actualizada.

12. BIBLIOGRAFÍA

ANDER EGG, Ezequiel. 2011. Aprender a investigar: nociones básicas para la investigación social. . Córdoba : Brujas , 2011. 978-987-591-271-7.

BALDACCI, Roberto, BATTARRA, Maria y VIGO, Daniele. 2008. Routing a Heterogeneous Fleet of Vehicles. s.l. : Springer Verlag, 2008.

BALDERRAMA TELLEZ, Victor Hugo. 2013. Modelo de ruteo para maximizar la cantidad de precios recopilados por el programa "Quién es quién en los precios". México D.F : s.n., 2013.

BALLOU, Ronald H. 2004. LOGÍSTICA. Administración de la cadena de suministros. México : Pearson Educación de México, 2004.

BERMÚDEZ COLINA, Yeicy. Aplicaciones de programación lineal, entera y mixta. [En línea] https://www.redalyc.org/html/2150/215024822007/.

BLUM, Christian y ROLI, Andrea. 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. s.l. : ACM Computing Surveys, 2003. págs. 268-308.

BOSCHETTI, Marco y MANIEZZO, Vittorio. 2009. Banders descomposition, Lagrangean relaxation and metaheuristic design. 2009.

COLOMBIA, MINISTERIO DE TRANSPORTE. Ley 1383 (16, marzo, 2010). Por la cual se reforma la Ley 769 de 2002 - Código Nacional de Tránsito, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial Bogotá D.C., No : 47653.

COLOMBIA, MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 228. (1, febrero, 2013).Por la cual se fijan tarifas de peaje para las estaciones a cargo del Instituto Nacional de Vías (Invías) y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial Bogotá D.C., 2013 No : 48691.

CONTRERAS PINTO, Claudia Marcela y DÍAZ DELGADO, María Fernanda. 2010. Métodos heuristico para la solución de problemas de ruteo de vehículos con capacidad (CVRP). Bucaramanga : s.n., 2010.

Council of Supply Chain Management Professionals. Citado por BALLOU, Ronald H. [En línea] https://cscmp.org/.

FEDERGRUEN, Awi y SIMCHI LEVI, David. 1995. Analysis of Vehicle Routing and Inventory-Routing Problems. In Handbooks in Operations Research and Management Science. 1995. págs. 297-373.

FERRER, L.; COVES, A.M. y SANTOS, M.A. de los. Modelado del Transporte de Distribución Mediante Programación Lineal Entera. Inf. tecnol. [online]. 2004, vol.15, n.4 [citado 2019-03-26], pp.65-69. Disponible en: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?scr.

FLOOD, Merril M. OPERATION RESEARCH, the traveling salesman problem. s.l. : Columbia University NY, Vol. 4, págs. 61-75.

FREIVALDS, Andris y NIEBEL, Benjamin W. 2009. Ingeniería industrial: métodos, estándares y diseño del trabajo. México : McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V, 2009.

GOMEZ MONTOYA, Rodrigo A, ZULUAGA MAZO , Abdul y ESPINOZA OVIEDO, Jorge E. 2015. Modelamiento de distribución de productos cárnicos como un TSP (Traveling Salesman Problem) con teoría de grafos. 2015.

GONZÁLEZ LA ROTA, Elsa Cristina, ORJUELA CASTRO, Javier Arturo y ROCHA MEDINA, Linda Bibiana. 2011. Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. 2011. págs. 35-55.

HERNÁNDEZ PEÑALVER, Gregorio. DMATIC. [En línea] Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos. [Citado el: 29 de Abril de 2019.] http://www.dma.fi.upm.es/personal/gregorio/grafos/.

LEUKEL, Joerg y SCHEUERMANN, Andreas. 2014. Supply chain management ontology from an ontology engineering perspective. s.l. : Computers in Industry, 2014, Vol. 65, págs. 913-923.

LUQUE, Pedro Luis. 2000. Lenguaje AMPL. 2000. 2.

MAGUIÑA AGURTO, Lucero Lizeth. 2016. Implantación de VRP - Solver aplicando la heurística de Clarke Wright para el ruteo del transporte terrestre en el área de distribución caso de estudio: industrias alimentarias. Lima : s.n., 2016.

MATOS, Ana Cristina y CARVALHO OLIVEIRA, Rui. 2004. 286-293 p.. An Experimental Study of the Ant Colony System for the Period Vehicle Routing Problem. Bruselas : Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. 286-293 p.

MILLER, C. E., TUCKER, A. W. y ZEMLIN, R. A. 1960. Integer Programming Formulation of Traveling Salesman Problems. New York : Journal, 1960.

Ministerio de Tecnologías de la información y las Comunicaciones. Portal Datos Abiertos Colombia. [En línea] wwww.datos.gov.co.

MOLINA GÓMEZ, José Carlos. 2013. Problema de optimización de rutas de vehículos con aspectos medioambientales. Sevilla : s.n., 2013.

MONTERROSA, Heidy. 2018. Logística se lleva 13.5% de los ingresos de las compañías en Colombia. La República. 2018.

NOSSA GUERRERO, Silvia Alejandra. 2016. Propuesta de un modelo de ruteo basado en programación dinámica aplicado a una empresa de productos de consumo masivo. Bogotá : s.n., 2016.

ORELLANA, Ronald José, y otros. 2017. Aplicación del problema de agente viajero a los principales hoteles de la ciudad de Barranquilla. 2017.

ORREGO CARDOZO, Juan Pablo, OSPINA TORO, Daniela y TORO OCAMPO, Eliana Mirledy. 2016. Solución al Problema de Ruteo de Vehículos con Capacidad Limitada (CVRP) usando una técnica metaheurística. Universidad Tecnológica de Pereira. 2016.

RODRÍGUEZ VILLALOBOS, Alejandro. 2006. Grafos: herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos. Valencia : X Congreso de Ingeniería de Organización, 7 y 8 de Septiembre de 2006.

ROJAS SERRANO Rodrigo;. 2014. MBA & Educación Ejecutiva. [En línea] 02 de Febrero de 2014. [Citado el: 20 de Abril de 2019.]

https://mba.americaeconomia.com/articulos/reportajes/la-importancia-del-transporte-en-la-cadena-logistica.

SALCEDO GIL, Juan Sebastian. 2018. Propuesta de ruteo para una flota heterogénea de vehículos en la recolección de leche de una empresa del eje cafetero. Zarzal : s.n., 2018.

TAHA, Hamdy A. 2012. . Investigación de operaciones. Novena. México : Pearson, 2012.

WADSWORTH, J. 1997. Análisis de Sistemas de Producción Animal - Tomo 2: las Herramientas Básicas. 1997. Vol. 2.

13. ANEXOS

ANEXO A. Registro de pedidos por cliente.

			Número de cajas - ABRIL 2019										
CONTROL DE ENTREGA DE PEDIDOS			Abril 03	Abril 04	Abril 05								
#	CLIENTE	ZONA											
1	CARDOBA ANIBAL	ANSERMANUEVO		4									
2	MARIN CARLOS	ANSERMANUEVO		4									
3	ROJAS GILMA	CAICEDONIA	2										
4	SALAZAR LINA MARCELA	CAICEDONIA	18										
5	GALLON GEOVANNY	CAICEDONIA	2										
6	JURADO VIDALES LUIS ALVARO	CAICEDONIA	4										
7	ESTRADA SALAZAR GINNO ALEXANDER	CAICEDONIA	6										
8	MOLINA GRANADA CRISTIAN CAMILO	CAICEDONIA	5										
9	MEJIA JAIME	CAICEDONIA	2										
10	**SONIA	CAICEDONIA	1										
11	**RAMON	CAICEDONIA	1										
12	HOYOS ARISTIZABAL FERNANDO	CAICEDONIA	2										
13	HOYOS EUGENIO	CAICEDONIA	3										
14	BILLARES TITAN	CAICEDONIA	1										
15	ROMAN OCAMPO JHON FREDY	CARTAGO		10									
16	JIMÉNEZ VARGAS ANDRÉS MAURICIO / MORALE	CARTAGO		4									
17	BETANCOURT GARCIA RUBY ALBA	CARTAGO		12									
18	VELASQUEZ BUCHELLI LUZ AIDE	CARTAGO		19									
19	OROZCO ARCILA DIEGO ALEJANDRO	CARTAGO		5									
20	MARULANDA HEBER	CARTAGO		11									
21	CUERO LUZ ESTELLA	LA PAILA		3									
22	HERMOSO GOMEZ OSWALDO	LA PAILA		1									
23	**LUZ DARY	LA PAILA		2									
24	**YOLANDA	LA PAILA		1									
25	**KATERINE	LA PAILA		1									
26	**JUAN DAVID	LA PAILA		3									
27	**NICOLAS	LA UNIÓN		2									
28	DELGADO CESAR	LA UNIÓN		1									
29	**JUAN	LA UNIÓN		12									
30	PARADOR DE LA URIBE	LA URIBE		11									
31	COMA SABROSO	LA URIBE		6									
32	COMA SABROSO 2	LA URIBE		8									
33	**LUIS	LA URIBE		1									
34	CORREA RAUL	LA URIBE		2									
35	VASQUEZ JORGE	LA URIBE		4									
36	ROJAS JOSE NELSON	LA VICTORIA		2									
37	SANCHEZ VELEZ JORGE ELIECER	QUEBRADA NVA	2										
38	MUÑOZ CARLOS ALBERTO	ROLDANILLO		16									
39	ARDILA FABIO	ROLDANILLO		5									
40	OBANDO TORO CLARIBEL	ROLDANILLO		7									
41	HORTUA GOMEZ GLORIA ENITH	ROLDANILLO		28									
42	TOBON JUAN DAVID	SEVILLA	9										
43	MARIN MEJIA JUAN BAUTISTA	SEVILLA	4										
44	CIGARRERIA NEBRASKA SEVILLA SAS	SEVILLA	17										
45	DELGADO DIAZ FABIOLA	SEVILLA	1										
46	SERGIO	SEVILLA	9										
47	DURAN MEDINA HAROLD ALEXIS	TORO		8									
48	VARON DIEGO	TULUA			12								
49	VARON DIEGO	TULUA			3								
50	SMENTARIOS	TULUA			2								
51	MEJIA MOLINA AGUSTIN	TULUA			13								
52	EL CANGRE	TULUA			7								
53	SOSSA ECHAVARRIA ADIELA PATRICIA	TULUA			1								
54	VELASQUEZ VELASQUEZ DANNA / VELASQUEZ SOTO LUZ MERY	TULUA			4								
55	PERDOMO PALMA KAREN ANDREA	TULUA			8								
56	DUQUE ROBLES CARLOS ELEAZAR	TULUA			13								
57	HUMO Y LICOR	TULUA			2								
58	TASCON JARAMILLO DORIAN FELIPE / MARMOLEJO DANIELA / BERNAL UNA MARCELA / ARANGO JUAN PABLO	TULUA			8								
59	LUQUE NAVARRO JAVIER JOSÉ	TULUA			11								
60	VILLEGAS ZULUAGA MARIA INES	ZARZAL		3									
61	HERNANDEZ LUZ AYDA	ZARZAL		2									
62	ZAPATA GONZALEZ MARIA ELIDA	ZARZAL		60									
63	MORA ALONSO	ZARZAL		4									
64	SOLARTE RUBEN	ZARZAL		3									
65	NOREÑA CARLOS	ZARZAL		5									
66	BETANCOURTH ADRIANA	ZARZAL		4									
67	HERRERA NESTOR MARIO	ZARZAL		4									
68	GALINDEZ CRISTIÁN	ZARZAL		1									

Fuente Autores

ANEXO B. Peso promedio.

PRODUCTO	PESO (kg)	PRODUCTO	PESO (kg)
Producto 1	21,8	Producto 19	15,4
Producto 2	20,8	Producto 20	15,3
Producto 3	20,3	Producto 21	14,8
Producto 4	20	Producto 22	14,5
Producto 5	19,5	Producto 23	13,8
Producto 6	19,3	Producto 24	10,5
Producto 7	19,3	Producto 25	10,2
Producto 8	19,1	Producto 26	9,8
Producto 9	19	Producto 27	9,7
Producto 10	18,6	Producto 28	9,5
Producto 11	18,5	Producto 29	8,7
Producto 12	18,2	Producto 30	7,45
Producto 13	16,8	Producto 31	7
Producto 14	16,1	Producto 32	6,95
Producto 15	16,1	Producto 33	6,5
Producto 16	16	Producto 34	6,5
Producto 17	16	Producto 35	6,3
Producto 18	15,95	Producto 36	5,3
	PROMEDIO		**14**

Fuente Autores

ANEXO C. Matriz de distancias entre municipios.

KILÓMETROS	ANDALUCÍA	ANSERMANUEVO	CAICEDONIA	CARTAGO	LA PAILA	LA UNIÓN	LA URIBE	LA VICTORIA	QUEBRADA NUEVA	ROLDANILLO	SEVILLA	TORO	TULUÁ	ZARZAL
ANDALUCÍA		88,5	61,4	76,7	21,7	54,0	11,9	47,0	36,8	38,7	42,8	63,0	11,0	30,0
ANSERMANUEVO	88,7		107	11,9	67,6	38,2	78,0	42,8	82,0	71,3	107	27,7	99,4	59,2
CAICEDONIA	61,7	105		93,6	40,6	71,0	49,9	63,9	24,8	55,6	20,2	80,8	72,4	46,9
CARTAGO	77,1	12,2	95,0		56,0	41,0	66,4	33,5	70,4	60,0	95,9	35,9	87,8	47,1
LA PAILA	21,5	69,9	42,7	58,0		35,4	10,8	28,3	18,1	20,0	40,3	44,4	32,3	11,3
LA UNIÓN	54,8	37,2	72,7	41,9	33,7		44,1	8,9	48,1	18,9	73,6	11,7	65,5	25,3
LA URIBE	12,6	76,6	49,5	64,8	9,7	42,1		35,1	24,9	26,8	30,9	51,1	39,0	18,1
LA VICTORIA	49,9	42,9	67,8	33,2	28,8	8,4	39,2		43,2	23,0	68,6	17,4	60,6	20,4
QUEBRADA NUEVA	37,1	80,9	24,6	69,1	16,1	46,4	26,4	39,3		31,1	35,9	55,4	47,9	22,4
ROLDANILLO	38,7	53,0	56,6	60,6	17,7	18,5	28,0	22,9	32,1		57,5	27,5	49,5	10,0
SEVILLA	43,1	107	20,2	95,2	40,2	72,5	32,4	65,5	35,8	57,2		81,5	53,8	48,5
TORO	63,1	27,9	81,1	35,9	42,1	12,7	52,4	17,2	56,5	27,2	81,9		73,9	33,6
TULUÁ	11,5	100	72,9	88,2	33,2	65,5	23,8	58,5	48,3	50,2	54,3	74,5		41,5
ZARZAL	30,0	60,6	47,9	51,8	8,9	26,1	19,3	22,1	23,3	9,7	48,8	35,2	40,7	

Fuente Autores