

**EL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS: CASO APLICADO A LA
DISTRIBUCIÓN DE UN PRODUCTO EN UNA AGRO AVÍCOLA DEL VALLE
DEL CAUCA**

FABIÁN GUILLERMO HOYOS PINEDA

CÓDIGO 201554092

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PALMIRA
2020**

**EL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHÍCULOS: CASO APLICADO A LA
DISTRIBUCIÓN DE UN PRODUCTO EN UNA AGRO AVÍCOLA DEL VALLE
DEL CAUCA**

FABIÁN GUILLERMO HOYOS PINEDA

CÓDIGO 201554092

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE: INGENIERO INDUSTRIAL**

DIRECTOR

MSc. RAÚL ANTONIO DÍAZ PACHECO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PALMIRA
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

AGRADECIMIENTOS

A la energía universal y a mi familia por su apoyo, comprensión, amor y motivación que me ha permitido crecer como persona y culminar satisfactoriamente cada una de las etapas de mi vida.

Agradezco a todos los profesores del programa de Ingeniería Industrial, por transmitir todos sus conocimientos y experiencia favoreciendo mi formación como profesional. A mi director de trabajo de grado Raúl Díaz Pacheco por la confianza depositada, colaboración y apoyo brindado a lo largo de este ciclo, permitiéndome adquirir conocimientos vitales para mi desarrollo como ingeniera.

Fabian Guillermo Hoyos

RESUMEN

El sector transporte juega un papel importante en la productividad y competitividad de un país, es decir, la gestión de los problemas de distribución afecta directamente la eficiencia. Por ende, el establecimiento de rutas y horarios para vehículos constituye un conjunto de problemas habituales que deben resolverse de manera óptima, de lo contrario, generarían un incremento en los costos logísticos logrando alcanzar niveles críticos de hasta un 50% adicional a lo presupuestado (Alvarez Hernandez, 2017; Hernández Ortiz, 2016).

Esto se evidencia, por ejemplo, en el caso de estudio correspondiente a la empresa Agroavícola Bunsan S.A., la cual durante el último trimestre del año presentó un aumento en los costos de distribución de las aves Cobb Avian 48 (pollito de un día de nacido), principalmente por la inexistencia de una modelo de ruteo para el abastecimiento de clientes nacionales.

De tal modo que, el presente trabajo se enfoca en el diseño de un sistema de ruteo de vehículos para la distribución de productos por parte de la Agroavícola, mediante la utilización de un modelo MDVRP de dos fases, donde la primera se enfoca en la asignación de clientes a una planta de incubación mediante la utilización de un modelo de programación lineal que minimice costos, y la segunda en el establecimiento de rutas de distribución empleando el método de los ahorros. Logrando así, el planteamiento de una propuesta de mejora contrastada con la situación actual de la empresa, principalmente enfocado en la tasa de utilización de la flota y la minimización de las distancias para el suministro de productos los clientes.

Palabras Claves: Ruteo, Sector transporte, Distribución, Heurística, Logística, Agroavícola.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	3
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
1.1. ENUNCIADO DEL PROBLEMA	4
1.2. OBJETIVOS.....	6
1.2.1. General	6
1.2.2. Específicos.....	6
2. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA	7
2.1. MARCO CONCEPTUAL	11
2.1.1. Transformación de coordenadas geodésicas y planas cartesianas ...	11
2.1.2. Problema de enrutamiento vehicular (VRP)	15
2.1.3. Ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP)	20
2.1.4. Metodologías de solución.....	22
2.1.5. Costos de transporte	26
2.1.6. Indicadores de gestión logística	26
3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA AGRO AVÍCOLA	28
3.1. PROCESO PRODUCTIVO	29
3.2. PRODUCTO	32
3.3. PLANTAS DE INCUBACIÓN	33
3.4. OPERACIONES LOGÍSTICAS	34
3.5. PLANEACIÓN DE PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE	34
3.6. PROCESO DE TRANSPORTE	37
3.6.1. Restricciones de transporte.....	38
3.6.2. Cliente	39
3.6.3. Planificación de las rutas actual	42
3.6.4. Flota de transporte	49
3.6.5. Costos de transporte y tasa de utilización.....	50
3.7. DEMANDA.....	54
3.8. CONSIDERACIONES CLAVES.....	55
4. MODELO DE RUTEO	57

4.1. Fase 1: Asignación de plantas de incubación.....	58
4.1.1. Costos de transporte.....	59
4.1.2. Matriz de distancias.....	59
4.1.3. Capacidad de las plantas de incubación	66
4.1.4. Modelo de programación lineal	67
4.2. Fase 2: Construcción de rutas	69
4.2.1. Consideraciones.....	69
4.2.2. Método de los ahorros y determinación de las rutas	70
4.2.3. Indicadores de mejora.....	72
5. RESULTADOS EN CASO DE ESTUDIO	74
5.1. Consideraciones	90
CONCLUSIONES	91
BIBLIOGRAFÍA.....	93
ANEXOS.....	100
ANEXO 1. COORDENADAS PLANAS CARTESIANAS CLIENTES AGROAVÍCOLA	100
ANEXO 2. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 1.....	107
ANEXO 3. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 2.....	109
ANEXO 4. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 3.....	110
ANEXO 5. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 4.....	111
ANEXO 6. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 1	112
ANEXO 7. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 2	114
ANEXO 8. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 3	115
ANEXO 9. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 4	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Criterios para clasificación ABC de ciudades clientes	40
Tabla 2 Listado de clientes tipo A	41
Tabla 3 Flota de transporte	49
Tabla 4 Clasificación de los vehículos por indicador.....	53
Tabla 8 Costeo Ruteo Actual para cuatro muestras	56
Tabla 9 Costos de transporte desde las plantas	59
Tabla 10 Coordenadas geodésicas de clientes y plantas de incubación.	60
Tabla 11 Parámetros del elipsoide GRS80	61
Tabla 12 Parámetros del DATUM correspondiente a San Antonio Cali.....	61
Tabla 13 Coordenadas cartesianas de nodos de clientes y plantas	64
Tabla 14 Matriz de distancias de plantas de incubación a clientes.....	66
Tabla 15 Flota de vehículos disponible para cada planta	70
Tabla 16 Capacidades plantas Muestras	74
Tabla 17 Detalle demanda a abastecer por cada planta para Muestra No.1	76
Tabla 18 Rutas propuesta planta No.1 Muestra No. 1	77
Tabla 19 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 1	78
Tabla 20 Costo rutas Muestra No.1	80
Tabla 21 Rutas propuesta planta No. 1 muestra No. 2	81
Tabla 22 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 2	82
Tabla 23 Costo rutas Muestra No. 2	83
Tabla 24 Rutas propuesta planta No. 1 muestra No. 3	83
Tabla 25 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 3	84
Tabla 26 Costo rutas Muestra No. 3	86
Tabla 27 Rutas propuesta planta No. 1 muestra No. 4	86
Tabla 28 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 4	87
Tabla 26 Costo rutas Muestra No. 3	88
Tabla 30 Costo asignación propuesta.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Costos de entrega por producto	5
Figura 2 Heurística método de los ahorros	24
Figura 3 Ubicación regionales Agroavícola Bunsan S.A.....	28
Figura 4 Diagrama de flujo del proceso productivo	31
Figura 5 Cobb Avian 48	32
Figura 6 Ubicación de plantas de incubación	33
Figura 7 Proceso de distribución.....	35
Figura 8 Cronograma distribución.....	36
Figura 9 Proceso de transporte.....	37
Figura 10 Ubicación geográfica de algunos clientes de la empresa	39
Figura 11 Ubicación geográfica de las ciudades de entrega tipo A	42
Figura 12 Sectorización de rutas	44
Figura 13 Índice de capacidad por rutas.....	46
Figura 14 Variación de costos por ave en función de la capacidad utilizada	47
Figura 15 Índice de distancia cargado	48
Figura 16 Costos de combustible por kilómetro recorrido para cada camión	50
Figura 17 Unidades transportadas por camión	51
Figura 18 Fases modelo de optimización	58
Figura 19 Comparativo entre distribución real de nodos y distribución en plano cartesiano	65
Figura 21 Gráfico ruta planta 1 Muestra No.1	79
Figura 22 Gráfico ruta planta 2 Muestra No.1	79
Figura 24 Gráfico ruta planta 1 Muestra No. 2	81
Figura 25 Gráfico ruta planta 1 Muestra No. 2	82
Figura 27 Gráfico ruta planta 1 Muestra No. 3	84
Figura 28 Gráfico ruta planta 2 Muestra No. 2	85
Figura 29 Muestra No. 4	86
Figura 30 Gráfico ruta planta 2 Muestra No. 2	87
Figura 31 Gráfico ruta planta 2 Muestra No. 2	88

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Gran Normal (N).....	12
Ecuación 2 Radio de curvatura del elipsoide (M).....	13
Ecuación 3 Conversión de coordenadas método de León.....	14
Ecuación 4 Calculo de delta de longitud y latitud método de León	15
Ecuación 5 Método de los ahorros, ahorro en distancia	24
Ecuación 6 Índice de capacidad	46
Ecuación 7 Índice de distancia cargada.....	48
Ecuación 8 Latitud en grados decimales y radianes	61
Ecuación 9 Longitud en grados decimales y radianes	62
Ecuación 10 Latitud media.....	62
Ecuación 11 Valor de la gran normal	63
Ecuación 12 Valor de la curvatura M	63
Ecuación 13 Distancia euclidiana	65
Ecuación 14 Adaptación método de los ahorros.....	71
Ecuación 15 Porcentaje de reducción de costos	72

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Coordenadas cartesianas clientes y plantas.....	106
Anexo 2 Matriz distancia Muestra No. 1	108
Anexo 3 Matriz distancia Muestra No. 2	109
Anexo 4 Matriz distancia Muestra No. 3	110
Anexo 5 Matriz distancia Muestra No. 4	111
Anexo 6 Matriz de los ahorros Muestra No. 1 Planta 1.....	112
Anexo 7 Matriz de los ahorros Muestra No. 1 Planta 2.....	113
Anexo 8 Matriz de los ahorros Muestra No. 2 Planta 1.....	114
Anexo 9 Matriz de los ahorros Muestra No. 2 Planta 2.....	114
Anexo 10 Matriz de los ahorros Muestra No. 3 Planta 1.....	115
Anexo 11 Matriz de los ahorros Muestra No. 3 Planta 2.....	115
Anexo 12 Matriz de los ahorros Muestra No. 4 Planta 1.....	116
Anexo 13 Matriz de los ahorros Muestra No. 4 Planta 2.....	116

INTRODUCCIÓN

Las empresas se encuentran inmersas en un entorno caracterizado por cambios continuos, los cuales condicionan las relaciones que sostienen con proveedores, competidores, clientes, personal, etc. Esta tendencia afecta la productividad empresarial, de manera que, puede conllevar a incrementos en costos y gastos asociados (Porter, 1990). Por tal razón, los empresarios mantienen en búsqueda de herramientas que minimicen los efectos cambiantes del mercado (Eliana Mirledy Toro Ocampo et al., 2016).

A nivel mundial, dentro de los costos que generan mayor impacto en las utilidades de una empresa, se encuentran los costos de transporte, los cuales constituyen más de la mitad de los costos de la logística empresarial, y son por tanto uno de los ejes claves a ser controlados y programados, mediante la utilización de métodos de ruteo que permitan minimizar su impacto y satisfacer de manera adecuada las entregas pactadas con los clientes (Eibl, 1996).

Por ende, el problema que será tratado en el presente trabajo de grado se relaciona con la aplicación de un método de ruteo para la distribución de productos fabricados por un agro avícola colombiana, de tal manera que se obtengan mejoras empresariales enfocadas en la reducción de costos para la distribución de productos. En primer lugar, en el capítulo 2 se va a consolidar una información relacionada al tema de estudio como por ejemplo modelos de ruteo y conceptos clave; luego en el capítulo 3 se realizará una caracterización de la situación actual de la empresa; en el capítulo 4, se planteará el modelo de ruteo a ejecutar. Finalmente, en el capítulo 5 se validará el modelo en el agro avícola colombiana, mediante el análisis de los resultados obtenidos tras la ejecución del modelo de ruteo.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. ENUNCIADO DEL PROBLEMA

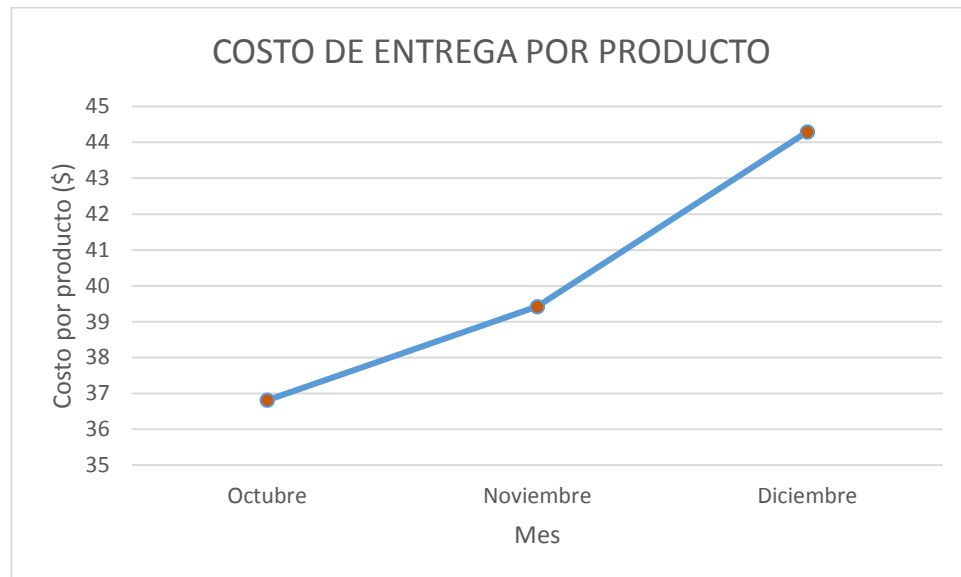
En el mundo empresarial los costos logísticos (transporte, inventario y gestión o planeación de recursos), adjudicados a un producto suelen ser relativamente altos. Según un estudio realizado en Logistics Costs and Service, el porcentaje de estos costos con respecto al precio total están entre el 20% y 30%, logrando alcanzar niveles críticos de hasta 50% (Alvarez Hernandez, 2017).

Según plantea Ronald Ballou & Eibl (Ballou, 2004; Eibl, 1996) las actividades de transporte incurren en costos más altos que cualquier otro componente logístico del producto. Por este motivo, es determinante la identificación de las mejores rutas y la correcta coordinación de las entregas al cliente final, con el fin de mejorar la productividad, la satisfacción del cliente (en términos de tiempos de entrega), y a su vez contribuir a la disminución de costos asociados a las distancias recorridas con las cargas (Bowersox et al., 2007).

Este fenómeno no solo se ve a nivel internacional, sino también en el territorio nacional. En Colombia, se destaca la falta de competitividad en el sector logístico, debido a deficiente infraestructura vial que se manifiesta en daños, cierres de vías, entre otros, además de costos altos en peajes (con respecto a otros países de Latinoamérica) e impedimentos para transportar en determinadas fechas; lo cual repercute en un aumento significativo en costos de transporte, superando el 58 por ciento (Estrada Vélez, 2015).

De acuerdo con lo anterior, se puede destacar lo presentado en la empresa de estudio Agroavícola BUNSAN S.A., que incurrió en un aumento en los costos, generado por las operaciones de entrega como se observa en la figura No. 1.

Figura 1 Costos de entrega por producto



Fuente. Adaptado Informe de Bunsan S.A..

Esta situación fue producto básicamente de la inexistencia de rutas establecidas para la distribución de las aves tipo Cobb Avian 48 (pollito), a clientes internos y externos en el territorio colombiano; ocasionando dificultades a la hora de seleccionar rutas y cantidades a enviar desde determinadas plantas hacia un cliente.

Como se evidencia, es necesario la creación de un modelo de ruteo para la distribución, que permita garantizar la competitividad por parte de las empresas (Hernández Ortiz, 2016), como en el caso de Agroavícola Bunsan S.A.S; de tal

manera, que al realizar el diseño y planificación de las rutas de distribución se mejore el nivel de servicio y la utilización de los recursos para su ejecución.

Formulación del problema

¿Es posible disminuir las distancias recorridas y los costos asociados al proceso de transporte de entrega de la Agroavícola objeto de estudio?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

Diseñar un modelo de ruteo que minimice las distancias recorridas por los vehículos para la distribución de un producto en una Agro avícola del Valle del Cauca

1.2.2. Específicos

- Analizar la situación actual de la empresa con respecto al proceso de ruteo y distribución de un producto (aves Cobb Avian 48) en una Agro avícola del Valle del Cauca.
- Construir un modelo aplicando técnicas de ruteo y programación de vehículos para la distribución de un producto (aves Cobb Avian 48) en una Agro avícola del Valle del Cauca.
- Evaluar la propuesta de mejora en el programa de distribución mediante la evaluación de indicadores.

2. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA

La siguiente revisión de literatura permite conocer sobre los estudios realizados acerca del problema de ruteo en los últimos años, permitiendo un acercamiento a la comprensión del concepto. Como también, se amplía información para la contextualización acerca del modelo de ruteo a aplicar en el caso estudio.

El inicio del análisis de problema de ruteo de vehículos se remonta a 1959, con la investigación realizada por Dantzing y Ramster, los cuales ofrecieron una generalización para el problema del agente viajero, analizando el despacho de gasolina a varias estaciones de servicio por medio de una flota de camiones, desde una terminal (Rocha Medina et al., 2011).

Luego, Stewart y Golden en 1983, modelaron el problema de ruteo de vehículos estocástico, presentando enfoques para la resolución de modelos donde se apliquen heurísticas para la adaptación de modelos SVRP, considerando las demandas en las ubicaciones como variables aleatorias que se modifican de acuerdo a los requerimientos de los clientes o consumidores (Stewart & Golden, 1983). Permitiendo así acercarse a un modelo que incluya eventos inesperados que surgen en la vida cotidiana.

En el año 2003, Secomandi presenta un algoritmo donde el problema de enrutamiento lo involucra en problemas inmersos en ambientes dinámicos y estocásticos por lo que examina la aplicabilidad en vehículos que deben abastecer (Secomandi, 2003).

Dedong y Chen, en el año 2008, efectuó un estudio basado en ruteo de vehículos estocásticos, donde se plantea que la demanda de los clientes es estocástica, modelándose como una variable aleatoria. En este tipo de problema se atiende un cliente de un nodo precedente cuya demanda solo se conoce al momento de la atención. Este tipo de modelo genera una solución bastante cercana a la óptima, garantizando la convergencia a una solución simulada (Wang et al., 2008).

En el año 2011, Albornoz, Oneto & Sánchez, plantean un problema de diseño de rutas para establecer los recorridos de los buses de una empresa, abordándose el problema mediante la programación entera. En la solución obtenida se construye un equilibrio entre nivel de servicio y costo de transporte para la organización, por otro lado, los resultados validan el uso de una estrategia jerárquica alternativa que puede ser útil para resolver instancias mayores de determinados problemas (Albornoz et al., 2011).

En el 2016, es propuesto un modelo matemático para abordar una variante del problema de enrutamiento de vehículos, es el problema de localización y ruteo con flota propia y subcontratada, para ello reemplazan las restricciones tradicionales para evitar sub-tours con unas que establecen conexiones radiales entre los clientes y depósitos. Los autores concluyen sobre las novedades que presenta el modelo propuesto y los resultados óptimos que se pueden lograr, además destacan la posibilidad de adaptación que tiene la propuesta para la solución de problemas con algunas variantes (por ejemplo, múltiples depósitos) (Eliana Mirledy Toro Ocampo et al., 2016)

En el 2017, se presenta un nuevo problema de enrutamiento de vehículos considerando restricciones de tiempo y plataformas de carga, para resolverlo

proponen un enfoque híbrido donde combinan dos algoritmos logísticos, el de búsqueda tabú y colonia artificial de abejas (ABC), generando así una nueva herramienta que denominan Tabu-ABC. La conclusión de los autores gira entorno a los resultados experimentales del algoritmo, donde manifiestan que “es altamente efectivo en comparación con otras heurísticas en las instancias VRPTW” (Zhang et al., 2017)

En el 2017, Huang, Zhao, Van Woensel & Gross, trabaja el problema del enrutamiento de vehículos considerando flexibilidad de rutas, esto quiere decir que para viajar entre dos nodos existen diferentes rutas geográficamente que representan una decisión a considerar en el problema, la formulación del problema se realiza con situaciones de tráfico determinísticas y estocásticas. Según lo manifiestan los autores, considerar la flexibilidad de ruta en la programación y el enrutamiento genera ahorros significativos en costos y en consumo de combustible. Para brindar solución al problema se emplea un método ruta a ruta con el que se obtiene una buena aproximación al problema. Los autores concluyen que es necesario estudiar y desarrollar algoritmos eficientes para resolver las instancias del problema dado que con la inclusión de esta consideración la complejidad de este aumenta significativamente (Huang et al., 2017).

En el estudio realizado en el 2017 por Mohammed y otros, se busca dar solución a un problema de ruteo en la Universiti Tenaga Nasional (UNITEN) mediante el uso de algoritmo genético con la finalidad de encontrar la solución óptima que permita alcanzar una serie de objetivos como son reducir costos de transporte, tiempo y distancia de rutas, entre otros. Los autores concluyen sobre la efectividad de la herramienta que utilizaron catalogándola como apropiada y fuerte en términos de ofrecer resultados adecuados, además mencionan la capacidad que tiene este para

adaptarse a cualquier problema con pequeñas modificaciones (Mohammed et al., 2017).

Por su parte, en el 2018 se aborda un problema de enrutamiento de vehículos en dos niveles, con el objetivo de dividir el problema en dos, bajo un criterio de ubicación geográfica. En este se conformó conglomerados de clientes, donde el primer subproblema consistió en determinar las rutas para visitar cada conglomerado iniciando en el depósito y regresando a este al final del viaje. El segundo subproblema hace referencia al programa de rutas a realizar al interior de cada conglomerado. Para la solución de estos problemas se utilizó un algoritmo genérico (Pop et al., 2018).

Luego, se planteó una investigación se enfocó en un caso especial del problema de enrutamiento de vehículos para una cadena de suministro de semiconductores mediante programación entera mixta. En esta investigación se propusieron dos modelos para la solución del problema, donde se consideraron restricciones clásicas como son capacidad de vehículos, compatibilidad de productos, tiempos, entre otros, esto con el objetivo de encontrar la ruta que genere menos costo. Como también se tomó en cuenta los precios de combustible en diversos puntos de recarga (Madankumar & Rajendran, 2018).

En el 2018, Abdulkader, Gajpal, & ElMekkawy plantean un sistema en el cual los centros de distribución (CEDIS) utilizan una flota de vehículos para abastecer tiendas minoristas con sus productos, donde las entregas de mercancías se daban según la disponibilidad en inventario, dicha mercancía es entregada directamente al consumidor final, esto evidencia que se encuentran presentes dos sistemas de distribución, el primero es el del minorista y el otro el del consumidor. Para la

solución del problema los autores proponen dos enfoques de solución, el algoritmo de colonia de hormigas múltiples (MAC) es el que mejores resultados presenta. Se concluye que el sistema de distribución propuesto reduce los costos de distribución hasta en un 44% (Abdulkader et al., 2018).

En el 2018, en una investigación realizada por Soleimani, Chaharlang & Ghaderi, se propone un modelo de programación no lineal multiobjetivo para resolver un problema de ruteo de vehículos ecológico, este incluye la distribución de productos originales y remanufacturados, los autores manifiestan que la mayor contribución del modelo que proponen se presenta cuando dicha distribución es simultánea y se presenta en canales compartidos, además ratifican la importancia de la incorporación de aspectos ecológicos o ambientales, en el desarrollo de problemas de ruteo (Soleimani et al., 2018).

2.1. MARCO CONCEPTUAL

Con el propósito de fundamentar teóricamente de forma adecuada el proceso de desarrollo de la propuesta de diseño de rutas, se presenta lo siguiente

2.1.1. Transformación de coordenadas geodésicas y planas cartesianas

Un sistema geodésico tridimensional hace referencia a un sistema de referencia ortogonal (O, X, Y, Z), cuyo origen se encuentra en las cercanías del centro de masa de la Tierra, y su eje se aproxima al eje de los polos y define el meridiano de origen.

En este sistema se puede asociar a todo punto P un trío de coordenadas cartesianas (X, Y, Z), haciéndose necesario el uso de un elipsoide (cuerpo cerrado) de

referencia que permita realizar una aproximación a una región específica del geoide (país, continente, etc.) (Albornoz et al., 2011).

Una vez elegido un elipsoide asociado al sistema (o, X, Y, Z), se puede definir un punto P, con base a un trio de coordenadas geográficas que son: la longitud geográfica, la altitud geográfica (φ) y la altura respecto al elipsoide (h_e). Estos valores se encuentran definidos tomando el semiplano meridiano que contiene P y la normal a partir de P con respecto al elipsoide cuyo pie P_e se halla en ese semiplano (Albornoz et al., 2011).

Considerando que (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2019):

- λ , hace referencia al ángulo diedro entre el semimeridiano de origen y ese semimeridiano ($-\pi \leq -\lambda \leq \pi_o$)
- φ , corresponde al ángulo entre la normal y el plano o_{xy} , h_e es la distancia algebraica, tomando como vector unidad el vector normal unidad exterior.

Para efectuar la transformación bidimensional de coordenadas se debe tomar en cuenta las siguientes ecuaciones (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004):

$$N_{\varphi} = \frac{\partial}{\sqrt{1 - \ell^2 \sin^2 \varphi}}$$

Ecuación 1 Gran Normal (N)

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

$$M_{\varphi_m} = \frac{a (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_m)^{\frac{3}{2}}}$$

Ecuación 2 Radio de curvatura del elipsoide (M)

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

Además, de aplicar alguno de los métodos existentes para la transformación, para el desarrollo de este trabajo se emplearán los modelos planteados por León para la transformación bidimensional de coordenadas debido a que las soluciones suministrados por este generan una solución que esta un 20% cercana a la real, comparando con el resto de los métodos mencionados para la realización de la conversión, además, que requiere un uso menor en recursos computacionales (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2019).

2.1.1.1 Método de transformación Bidimensional de Coordenadas Geodésicas a Coordenadas Planas Cartesianas: Método de León

Se utiliza una representación plana de la tierra con el objetivo de plasmar sobre una superficie plana parte de un modelo elipsoidal de la superficie terrestre, obtener valores métricos más prácticos de utilización que las unidades angulares y facilitar la evaluación de las distancias. Para esto se considera el origen del sistema de coordenadas cartesianas. Coordenadas geodésicas, altura del plano de proyección, semieje mayor del elipsoide de referencia, excentricidad, coordenadas planas norte y este, latitud en radianes, longitud en radianes y latitud media (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004).

$$E = \Delta\lambda_{\text{rad}2} N_{\varphi} \cos\varphi \left[1 + \frac{P_p}{N_{\varphi_0}} \right] + E_o$$

$$N = M_{\varphi_0} \left[\Delta\varphi_{\text{rad}2} + \frac{\tan\varphi_0 \Delta\lambda_{\text{rad}2}^2 N_{\varphi}^2 \cos^2\varphi}{2M_{\varphi_0} N_{\varphi_0}} \right] \times \left[1 + \frac{P_p}{M_{\varphi_m}} \right] + N_o$$

Ecuación 3 Conversión de coordenadas método de León

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

Tomando en cuenta que (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004),

N_o, E_o	Origen del sistema de coordenadas cartesianas.
φ, λ	Coordenadas geodésicas del punto de cálculo
φ_o, λ_o	Origen del sistema de coordenadas geodésicas
P_p	Altura del plano de proyección
∂	Semieje mayor del elipsoide de referencia
ℓ^2	Primera excentricidad del elipsoide de referencia
$\Delta N = N - N_o$	Delta de coordenadas planas norte
$\Delta E = E - E_o$	Delta de coordenadas planas este
$\Delta\varphi_{\text{rad}2} = \varphi - \varphi_o$	Delta de latitud en radianes
$\Delta\lambda_{\text{rad}2} = \lambda - \lambda_o$	Delta de longitud en radianes
$\varphi_m = \frac{\varphi + \varphi_o}{2}$	Latitud media

2.1.1.2 Método de transformación Bidimensional Coordenadas Planas Cartesianas a Coordenadas Geodésicas: Método de León

Este método emplea un mecanismo inverso al método precedente, que consiste en primero calcular la gran normal y posteriormente obtener el delta de latitud y longitud (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004)

$$\Delta\varphi_{\text{rad1}} = \frac{\Delta N}{\left[1 + \frac{P_p}{\partial(1 - \ell^2)}\right] M_{\varphi_o}} - \left[\frac{\tan\varphi_o}{2M_{\varphi_o} N_{\varphi_o}} \times \left(\frac{\Delta E}{1 + \frac{P_p}{\partial}} \right)^2 \right]$$

$$\Delta\lambda_{\text{rad1}} = \frac{\Delta\text{Este}}{N_{\varphi} \cos\varphi \left(1 + \frac{P_p}{\partial}\right)}$$

Ecuación 4 Cálculo de delta de longitud y latitud método de León

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

Una vez calculados los deltas de latitud y longitud del origen seleccionado, para posteriormente, realizar la conversión a grados decimales de lo obtenido y de ahí se pasa a coordenadas geodesias utilizando fórmulas de aproximación proporcionadas por la herramienta Excel.

2.1.2. Problema de enrutamiento vehicular (VRP)

El ruteo vehicular hace referencia a la secuencia en la que se deben visitar distintos puntos de interés con uno o más vehículos. El ruteo busca minimizar la distancia y/o el tiempo recorrido, generándose así el problema de ruteo vehicular conocido como VRP (Vehicle Routing Problem) (Networking and Emerging Optimization, 2014).

El VRP ha sido abordado desde mediados del siglo XX por diferentes autores, los primeros fueron Dantzig y Ramser en 1959. En el 2008, Golden, Raghavan & Wasi, definen el VRP como uno de los problemas de optimización combinado más estudiados, puesto que permite diseñar una combinación óptima de rutas que será

utilizado por un conjunto de vehículos propios o alquilados y que servirán para abastecer a una serie de clientes (Golden et al., 2008).

En el 2011, se añade a esta definición un punto de comienzo y otro de terminación conocido como bodega o deposito principal, el cual debe ser abastecido por un vehículo, en donde se busca minimizar el costo global de transporte cumpliendo con las restricciones aportadas, que pueden ser de demanda, capacidad, tiempos de entrega, etc. (Farahani et al., 2011).

El VRP por tanto supone la existencia de un depósito central (origen), que cuenta con una flota de vehículos que deben atender a un conjunto de clientes dispersos geográficamente dispersos; permitiendo mediante la aplicación del modelo encontrar una ruta óptima para la distribución del producto a un mínimo costo (Golden et al., 2008).

2.1.2.1 Aplicaciones

Dentro de las aplicaciones del VRP se pueden destacar las siguientes:

- Ruteo para la recolección de residuos sólidos.
- Ruteo de autobuses escolares.
- Establecimiento de rutas de vendedores (comerciales)
- Ruteo para la realización de la limpieza de calles.

Como se puede observar, la aplicación del VRP es amplia y es utilizada en diversas situaciones cotidianas, en las cuales es necesario establecer algún tipo de logística

para la ejecución de rutas, permiten cumplir con los intereses de las organizaciones (Farahani et al., 2011).

2.1.2.2 Variantes

El VRP básico es aquel donde se busca cumplir la demanda de determinado cliente con la distribución de productos en vehículos propios, en dicho problema se consideran solamente costos de transporte y restricciones de demanda, su campo de aplicación es amplio, como, por ejemplo, en cadenas de suministro, transporte público, servicios de mensajería, entre otros (Farahani et al., 2011).

Posteriormente, se comenzaron a realizar modificaciones al VRP básico, incluyendo restricciones reales, con el fin de obtener resultados óptimos y acoplados a la situación real del caso (Farahani et al., 2011); obteniendo de tal manera nuevas variantes, entre las cuales destacan las presentadas a continuación:

- VRP capacitado: Esta es la variante más sencilla, es conocida como Capacity VRP (CVRP). En el problema se considera una restricción de los vehículos, ningún vehículo podrá ser cargado con un número de unidades mayor a las que dictamina su capacidad, además que esto contarán con una capacidad idéntica. En esta variante se cuenta con n clientes, un depósito único y se conocen las distancias entre los clientes; por lo cual, el problema a solucionar consiste en encontrar los recorridos que deben realizar los vehículos de tal manera que se minimice la distancia total y se satisfaga con las entregas programadas a los clientes. En este tipo de VRP, no se tiene un número de camiones definido y el inicio y fin del mismo es el depósito central (Daza et al., 2010).

- VRP con restricciones de capacidad y distancia: Es también conocido por sus siglas DCVRP (Distance-constrained capacitated vehicle routing), al problema de CVRP se añade una restricción de distancia máxima a recorrer por cada vehículo, esta consideración genera un acercamiento a la realidad puesto que en muchas ocasiones los vehículos no pueden recorrer más de cierta cantidad de kilómetros por seguridad del vehículo, o el conductor no puede manejar tantas horas de manera continua por normas establecidas (Segura Peñuela & Padua Dueñas, 2018).
- VRP con ventana de tiempo: En el VRPTW (vehicle Routing Problem with Time Windows), el servicio al cliente debe realizarse dentro de un intervalo de tiempo específico y el vehículo asignado no puede trasladarse a ningún otro lugar durante la atención (Restrepo et al., 2008).
- VRP con recolección de productos: En el VRPB (Vehicle Routing Problem with Backhaul), los clientes pueden devolver los productos adquiridos, es por ello que cada vehículo debe entregar una determinada cantidad de productos y también debe recoger un número de estos. Se trabaja bajo un supuesto, cada ruta realiza primero las entregas y luego procede a recolectar los productos que serán devueltos (Jacobs Blecha & Goetschalckx, 1992).
- VRP con recogida y entrega: En el VRPPD (Vehicle Routing Problem With Pickup And Delivery), los vehículos cumplen dos labores, la primera es la recogida de productos en las ubicaciones de los clientes y la segunda es la entrega de bienes a los clientes (Ballesteros Silva & Escobar Zuluaga, 2016).

- VRP abierto: Es también conocido como OVRP (Open Vehicle Routing Problem), este tipo de variante tiene como característica principal el hecho de no obligar a los vehículos a retornar al final de las rutas al depósito, es adecuado para algunos casos donde se presentan situaciones de envíos mediante empresas de mensajería (Tangarife Álvarez, 2017).
- VRP con multi-depósito: El MDVRP (Multiple Depot VRP) es una variante directa del problema clásica en el cual se cuenta con más de un depósito para el abastecimiento de los clientes. De tal manera, que este tipo de VRP se desarrolla en dos fases, la primera consistirá en la asignación de los clientes a algunos de los depósitos y la segunda se enfocará en el establecimiento de las rutas a seguir, permitiendo cumplir el objetivo que es el de servir a todos los clientes mientras se reduce el número de vehículos que efectuarán el recorrido (Eliana M Toro Ocampo et al., 2016).
- VRP estocástico: Esta variante presenta a su vez sub-variantes pues se puede presentar con demanda estocástica, o tiempos de servicio, entre otros. El nivel de complejidad de este tipo de VRP hace que solo pequeñas instancias del problema puedan ser resueltos de manera óptima (Gonzalez et al., 2015).

De acuerdo a lo planteado en el problema a desarrollar se abordará un MVRP, ya que para la realización del ejercicio se contarán con dos plantas para abastecer los distintos clientes que hacen parte de la zona a atender por parte de la Agroavícola Bunsan S.A.

2.1.3. Ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP)

Es una variante del VRP, la cual se caracteriza por tener más de un depósito disponible para el abastecimiento de los clientes. Cuando los clientes están agrupados en torno a un depósito, el problema se modela como un VRP independiente. Sin embargo, si los clientes y los depósitos están mezclados, el problema de ruteo debe ser resuelto como un sistema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos (MDVRP) (Tansini et al., 2002).

En la configuración del MDVRP, los clientes deben ser atendidos por un único depósito, donde cada vehículo debe salir y regresar al mismo depósito, de tal manera que la solución obtenida por este método se desarrolla por algoritmos metaheurísticos donde la solución se acerca a la óptima o exacta (Tansini et al., 2002).

En el MDVRP se requiere la asignación de clientes a los depósitos, así como una flota de vehículos determinada para cada depósito. El objetivo del problema es encontrar rutas para los vehículos que presten el servicio a todos los clientes a un costo mínimo en términos de número de rutas y distancia total del viaje, sin violar la capacidad y las limitaciones de tiempo de viaje. Generalmente se utilizan dos fases para resolver el MDVRP, la primera se enfoca en el agrupamiento en la cual los clientes son asignados a un depósito determinado, posteriormente en la segunda fase se realiza el proceso de enrutamiento en donde se establecen rutas cuyas distancias sean mínimas y por tanto se disminuyan los costos (Geetha et al., 2012).

De acuerdo a lo anterior, el MDVRP consiste en un modelo que arroja un conjunto de vehículos agrupados por depósito, y luego programa los vehículos de cada grupo. Esto genera por ende, un algoritmo que permite resolver problemas de

tamaño real, pudiendo resolverse de una manera aproximada a la exacta (Daza et al., 2009).

2.1.3.1 Algoritmo de Ruteo para el MDVRP

El VRP con múltiples depósitos es un problema cuya solución con un algoritmo exacto requiere mucho tiempo, por tanto, para su desarrollo se pueden emplear diversas heurísticas de aproximación. Dentro de estas se encuentra el método de los ahorros de Clark and Wright, el cual se ampliará en el siguiente apartado. Este método tuvo posteriormente una modificación generándose dos etapas, las cuales consistía primero en la asignación de clientes a los depósitos más cercanos, seguido por la aplicación del algoritmo de los ahorros en cada depósito (Geetha et al., 2012).

Posteriormente a esto, se ha trabajado diversos procedimientos que permiten la solución del MDVRP, dentro de los cuales se encuentra una metaheurística denominada Genetic Clustering and Tabu Routing, con la cual se soluciona el problema de ruteo de vehículos a través de la metodología de dos fases que consiste en emplear algoritmos como en la primera fase para la asignación de clientes a depósitos y heurísticas de barrido en la segunda fase (Gonzalez Vargas & Gonzalez Aristizabal, 2007).

Luego, Crevier, Cordeau y Laporte presentaron el VRP Multi-depósito con rutas entre depósitos, el cual consiste en que los vehículos pueden ser reabastecidos en depósitos intermedios a lo largo de su ruta. Se propone una metodología de tres fases basada en la memoria adaptativa y búsqueda tabú para la generación de un conjunto de rutas, y en la programación entera en la ejecución de un algoritmo de

conjunto de particiones para la determinación de las rotaciones factibles menos costosas (Crevier et al., 2007).

Liu, Jiang y Geng propusieron un algoritmo híbrido para VRP abierto Multi-depósito. El MDOVRP, es una variante del VRP, en la que los vehículos parten de varios depósitos y no están obligados a regresar a la estación. En el enfoque propuesto, tres algoritmos heurísticos clásicos se adoptan para proporcionar buenas soluciones iniciales (Liu et al., 2014).

De acuerdo, a lo consultado y el caso de estudio, el método que se empleara es un MDVRP de dos fases mediante la aplicación del método de los ahorros.

2.1.4. Metodologías de solución

Para las empresas que trabajan con la recolección y/o entrega de bienes y servicios, la reducción de tiempos y costos logísticos juega un papel importante dentro de sus organizaciones, convirtiendo el VRP en una herramienta útil para la mejora en el servicio y reducción en los costos (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2014).

Los problemas de ruteo hacen parte de muchas investigaciones realizadas en los últimos años por su utilidad para las compañías, y existen técnicas exactas y heurísticas para su resolución; los casos en los que el número de nodos no es muy grande es común emplear técnicas exactas, pero si al contrario el problema consta de muchos nodos y el modelo es complejo, se deben aplicar técnicas no exactas

que dan una buena solución cercana a la óptima y disminuyen los tiempos empleados para determinarla, como son las heurísticas y meta-heurísticas (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2014).

2.1.4.1 Técnicas exactas

Las técnicas exactas son algoritmos que ofrecen una solución óptima, pero que no pueden ser implementados para resolver problemas complejos o con muchas variables. Generalmente estas técnicas se emplean para resolver problemas con pocos clientes, y son desarrollados en su mayoría para fines académicos. Dentro de estas técnicas destacan el método de ramificación y acotamiento, y el método de ramificación y corte (Networking and Emerging Optimization, 2014).

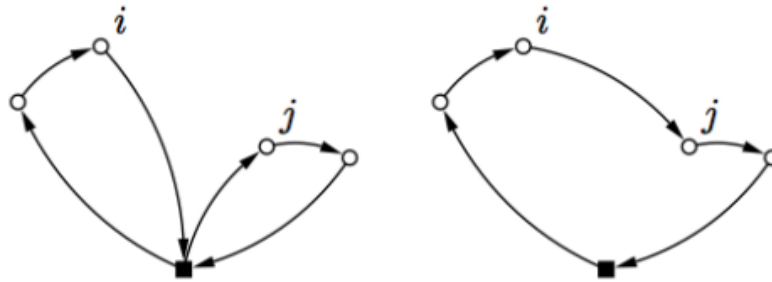
2.1.4.2 Heurísticas

Las heurísticas son consideradas como técnicas que realizan una exploración del espacio de búsqueda ofreciendo una solución factible en un periodo de tiempo aceptable. Las heurísticas utilizadas por lo general se clasifican en métodos constructivos (ahorros), de dos fases y de mejoramiento (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2014).

Dentro de estas heurísticas se encuentran los siguientes:

- Método de ahorros. Este método consiste en realizar una exploración limitada del espacio búsqueda y dar una solución de calidad aceptable en un tiempo moderada. El algoritmo se desarrolla partiendo de una solución con dos rutas $(0, \dots, i, \dots, 0)$ y $(0, \dots, j, \dots, 0)$, las cuales pueden ser combinadas generando así una sola ruta (Olivera, 2004).

Figura 2 Heurística método de los ahorros



Fuente. Tomado de Castañeda y Cardona (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2014).

El ahorro en distancia se encuentra representado por la ecuación No. 5.

$$S_{ij} = C_{io} + C_{oj} - C_{ij}$$

Ecuación 5 Método de los ahorros, ahorro en distancia

Fuente. Olivera (2004)

Al unir las rutas, los arcos (i,0) y (0,j) desaparecen y se agrega el arco (i,j). El algoritmo parte de una solución inicial y realiza las uniones que mayor ahorro generen siempre y cuando cumpla con las restricciones planteadas en el problema. Para usar este método es necesario conocer los costos o las distancias que existen entre los diferentes nodos, o sea el costo de cada trayecto (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2014).

Esta heurística es una herramienta de solución flexible que permite manejar un amplio rango de restricciones y arrojar resultados óptimos para problemas pequeños (Ballou, 2004).

El método de los ahorros busca principalmente disminuir la distancia recorrida por los vehículos para atender las solicitudes de los clientes y maximizar el uso de la capacidad del vehículo, en este segundo aspecto la heurística es atractiva para el caso de estudio dado que se puede conseguir una mejora en el indicador de utilización de las rutas.

- Heurística de dos fases. Las heurísticas de dos fases permiten construir soluciones factibles que normalmente no resultan óptimas, para ello dividen el problema en dos fases, la primera para el agrupamiento de los nodos y la segunda para la asignación de las rutas a los vehículos (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2014).
- Método de mejora iterativa. Son métodos que se utilizan para mejorar una solución p a través de búsqueda local. En la mejora de las soluciones del VRP, las movidas se pueden realizar dentro de una sola ruta con el objetivo de cambiar el orden de visitas d sin alterar los clientes asignados. También se emplea para modificar varias rutas al tiempo, cambiando el orden dentro de las rutas y el conjunto de clientes asignados (Corona León, 2005).

2.1.4.3 Metaheurísticas

Las metaheurísticas son algoritmos que combinan las heurísticas básicas en esquemas de alto nivel, para realizar eficientemente y efectivamente la exploración de un espacio de búsqueda. Para la realización de la combinación en este tipo algoritmos se utiliza herramientas computacionales que permitan la evaluación de modelos en corto tiempo (Olivera, 2004).

2.1.5. Costos de transporte

El problema de ruteo de vehículos es planteado como un método de asignación el cual permite basado en criterios específicos establecer una ruta óptima entre clientes que minimice los tiempos de entrega y los costos asignados para la ejecución de la repartición de productos. Por lo cual, los costos de transporte hacen referencia al costo de trasladar productos por parte de un productor o distribuidor hasta un cliente o consumidor (Sánchez Galván et al., 2017).

2.1.6. Indicadores de gestión logística

Un indicador es una magnitud que refleja el desempeño obtenido por un proceso en su ejecución, si es realizada una comparación frente a un marco de referencia será posible detectar desviaciones positivas o negativas presentadas en el mismo. Los indicadores de gestión son parte fundamental en el monitoreo de una organización dado que permite establecer las condiciones de funcionamiento de los procesos e identificar los diversos síntomas que son derivados del desarrollo normal de las actividades (Mora García, 2008).

2.1.6.1 Objetivos de indicadores de gestión logística

Dentro de los objetivos de los indicadores de la gestión logística, destacan aquellos orientados al levantamiento y monitoreo de procesos (Mora García, 2008).

- Identificar y tomar acciones sobre los problemas operativos que se presentan en un proceso.
 - Satisfacer las expectativas del cliente mediante la reducción del tiempo de entrega y la optimización del servicio prestado.
 - Medir el grado de competitividad que tiene la empresa en el sector.
-
- Mejorar el uso de los recursos y activos asignados en busca de aumentar la productividad y efectividad de las actividades.
 - Reducir gastos y aumentar la eficiencia operativa.
 - Realizar un adecuado Benchmarking para tomar acciones de mejora.

3. SITUACIÓN ACTUAL DE LA AGRO AVÍCOLA

Agroavícola Bunsan S.A. (nombre ficticio de la empresa utilizado únicamente para su identificación en este proyecto) es una empresa colombiana dedicada a la comercialización y producción de genética avícola y piscícola en el país. Su incursión en el mercado inició en 1996, generando un crecimiento en materia industrial y de ventas considerable en los últimos cinco (5) años, convirtiéndose así en una de las empresas líderes del sector a nivel nacional.

Actualmente cuenta con cuatro (4) regionales principales encargadas de cumplir las demandas de la zona asignada, clasificadas en regional costa, regional oriente, regional centro y regional occidente, tal como y se ve en la figura No. 3.

Figura 3 Ubicación regionales Agroavícola Bunsan S.A.



Fuente. Elaboración propia

Cada regional cuenta con sus propias plantas de incubación distribuidas en el territorio que le corresponde, de tal manera, que cada seccional posee sus propios clientes y se encarga de abastecer sus necesidades. En caso de presentarse alguna necesidad de producto en alguna de las regionales como consecuencia de una falta de capacidad de producción, se genera un proceso de maquila interno, es decir, cualquier de las otras regionales abastece la cantidad necesaria para cumplir con la demanda de la planta respectiva.

El proyecto será desarrollado en el regional occidente que incluye los departamentos de Nariño, Valle del Cauca, Quindío, Caldas, Risaralda, entre otros.

3.1. PROCESO PRODUCTIVO

Del portafolio de productos ofertados por la empresa, se tomará como objeto de estudio en esta investigación el pollito de un día (aves Cobb Avian 48).

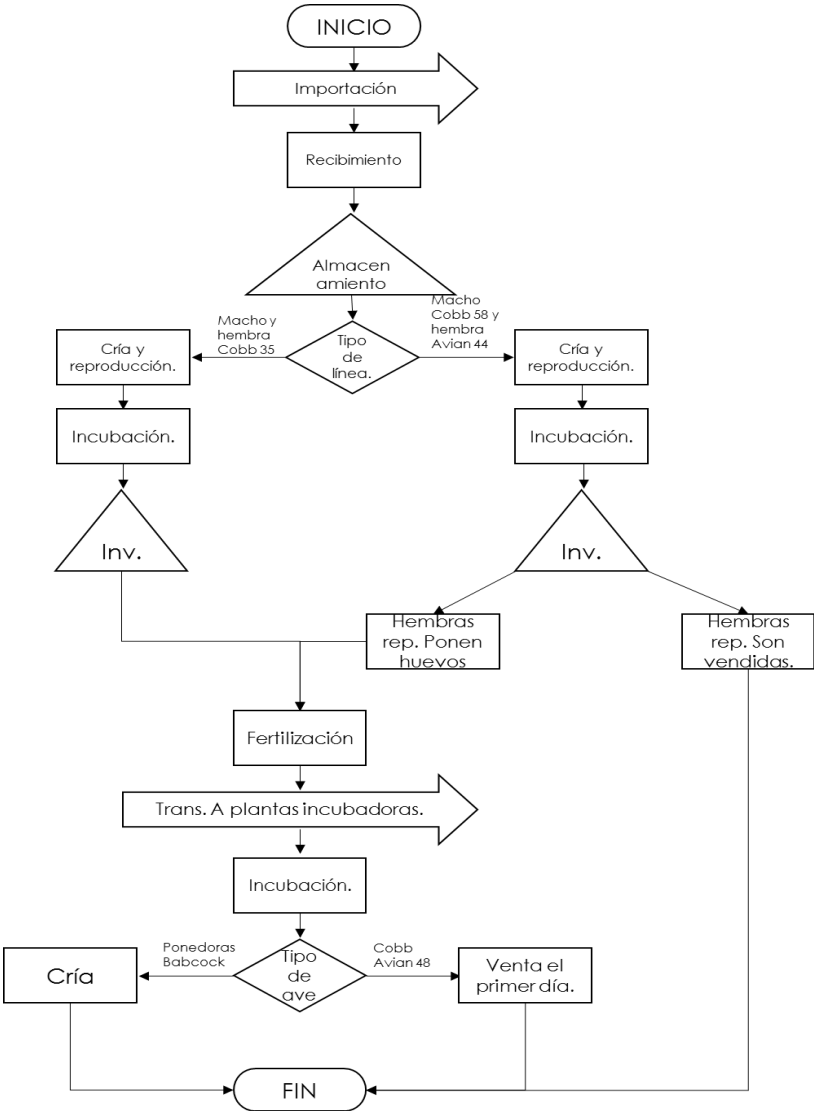
El proceso productivo inicia con la importación de dos líneas de aves de un día de nacidas desde Estados Unidos o Brasil denominadas “abuelas”, la primera línea es conocida como línea macho, que consta de un macho y una hembra Cobb 35 de donde resultarán machos reproductores; la segunda línea, consta de un macho Cobb 58 y una hembra Avian 44, de esta combinación se obtiene una hembra ponedora.

Posteriormente luego del proceso de reproducción, los huevos producidos por cada una de las líneas son incubados en la planta de incubación durante aproximadamente veintiún (21) días, proporcionándoles la humedad y la temperatura necesaria para garantizar el éxito de la operación (ave nacida sin complicaciones).

Posterior a esto, las aves son sexadas y vacunadas para transportarlas a las granjas reproductoras; dieciocho (18) semanas después, las hembras reproductoras empiezan a poner huevos los cuales son fertilizados por los machos reproductores y manejados bajo los más altos estándares de calidad para obtener huevos sanos.

El producto obtenido pasa nuevamente por el proceso de incubación y se obtienen pollitos de la raza Cobb Avian 48 que se destinan al mercado de carne y pollitas Babcock que serán las futuras ponedoras de huevo comercial para consumo humano, estas últimas no son vendidas de un día, son criadas en la granja de ponedoras de BUNSAN S.A. en la ciudad de Palmira hasta aproximadamente las dieciséis (16) semanas de edad que es la etapa en la que todavía no ponen huevos, posteriormente son distribuidas a comercializadoras y productoras de huevo para el consumo humano.

Figura 4 Diagrama de flujo del proceso productivo



REPRESENTACIÓN	SIGNIFICADO
	Importación o traslado a otras plantas.
	Operación.
	Almacenamiento.
	Decisión o clasificación.
	Inicio-Fin
	Conector.

Fuente. Elaboración propia

3.2. PRODUCTO

Agroavícola Bucsan S.A. ofrece al mercado, pollitos con un día de nacidos producidos con la mejor tecnología y con un equipo de trabajo formado por profesionales especializados. La línea de pollitos distribuidos es conocida técnicamente como Cobb Avian 48 (Ver Figura No. 5) y popularmente identificada como pollito de un día, estos son usados para engorde, provienen de la línea genética ROSS para la producción de pollos de excelentes condiciones que son suministradas al mercado colombiano.

Además de ser pollos altamente competitivos en crecimiento, responden adecuadamente a variadas condiciones de manejo y de programas nutricionales que el cliente tenga estipulado para su crecimiento y desarrollo.

Figura 5 Cobb Avian 48



Fuente. Tomada de la página corporativa de la empresa

3.3. PLANTAS DE INCUBACIÓN

La empresa cuenta actualmente con dos plantas de incubación en la regional Occidente, estas se encuentran ubicadas en el departamento del Quindío y en el Valle del Cauca.

Ambas plantas poseen situaciones similares en aspectos relacionados con maquinaria y operación, y su principal diferencia radica en la capacidad, en donde destaca la planta del Valle, ubicada en el corregimiento de Bolo San Isidro de la ciudad de Palmira.

A continuación, se muestra la ubicación geográfica de las plantas, en la figura No. 6.

Figura 6 Ubicación de plantas de incubación



Fuente. Tomada de la página corporativa de la empresa

3.4. OPERACIONES LOGÍSTICAS

La regional occidente realiza sus operaciones logísticas de transporte mediante la entrega del producto directamente en el lugar donde el cliente lo ha solicitado y de acuerdo a la cantidad que se ha pactado para determinada fecha, esto genera que la demanda para cada día de distribución sea variable, es decir, para una fecha se debe entregar en ciertas ciudades y para la próxima en lugares completamente diferentes, es por esto que las rutas no se encuentran estandarizadas, adicionalmente, el orden de entrega no es definido previamente por el jefe de transportes y queda a disposición del conductor del camión y su conocimiento empírico.

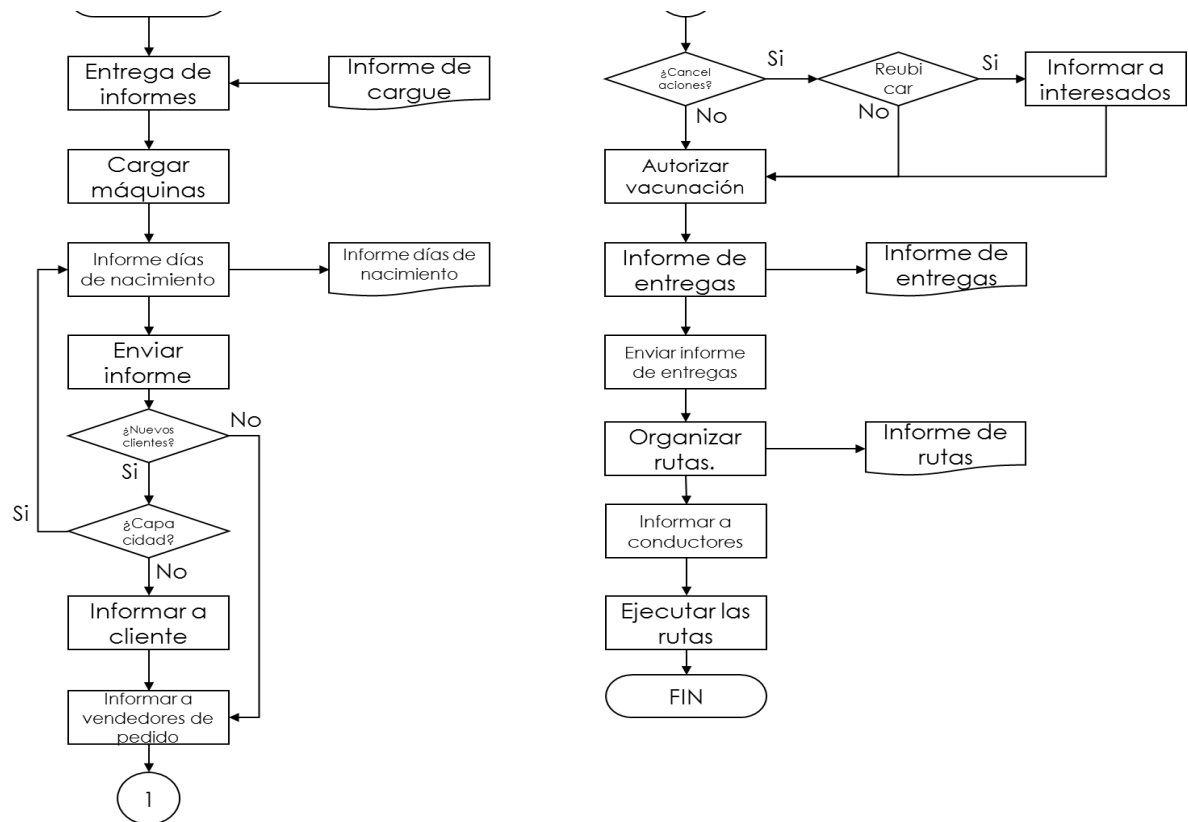
3.5. PLANEACIÓN DE PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE

El proceso de planeación de producción y transporte en la empresa abarca el cargue de las incubadoras por el tipo de producto para el que se realiza; de tal manera que se colocan huevos suficientes para el nacimiento de los pollitos pedidos, considerando variables como la tasa de mortalidad histórica de la planta.

Posterior a la realización de esta labor, la zona administrativa de la planta de incubación realiza un informe en donde se detalla la cantidad de pollitos solicitada y el cliente que lo requiere para determinadas fechas; este documento es enviado

al departamento de transportes, a la coordinadora de despachos y al área de Cartera.

Figura 7 Proceso de distribución



Fuente. Adaptado de empresa en estudio

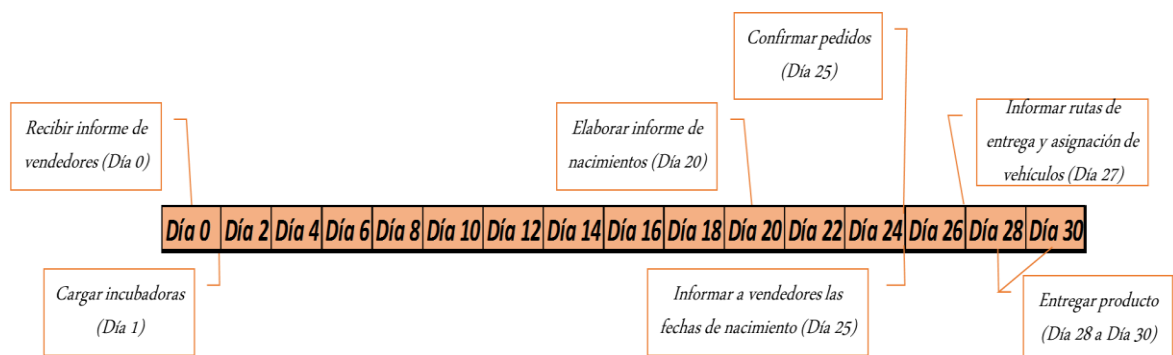
Por otra parte, durante la incubación a los vendedores se les pueden presentar clientes nuevos, para atender esta demanda deberá consultar a las plantas de incubación si existe disponibilidad de producto, en caso de una respuesta negativa se informará al cliente que no puede ser cumplida su petición.

Tres (3) días antes de presentarse el nacimiento, la coordinadora de despachos informa a los vendedores el día en que su pedido estará disponible para iniciar la confirmación de pedido con los clientes. En caso de presentarse una cancelación de pedido, el vendedor y la coordinadora de despachos se darán a la tarea de encontrar un nuevo comprador para el producto, con el fin de obtener un nuevo cliente destino.

Si se consigue un nuevo destino, se deberán informar a todos los interesados (Planta de incubación, Departamento de transportes y Área de Cartera), para así poder realizar el informe de entregas, en donde se detalla las ciudades de entrega, las cantidades que deberán ser entregadas, los precios de venta, el nombre del cliente, entre otros datos. Este documento es modificado por el jefe de transportes estableciendo los lugares que debe visitar, los camiones y los conductores utilizados en la distribución.

Para el día del nacimiento se procede a realizar el cargue de los vehículos y la entrega del producto cuya ruta es determinada de manera empírica de acuerdo a la experticia del repartidor y los lugares que debe visitar.

Figura 8 Cronograma distribución



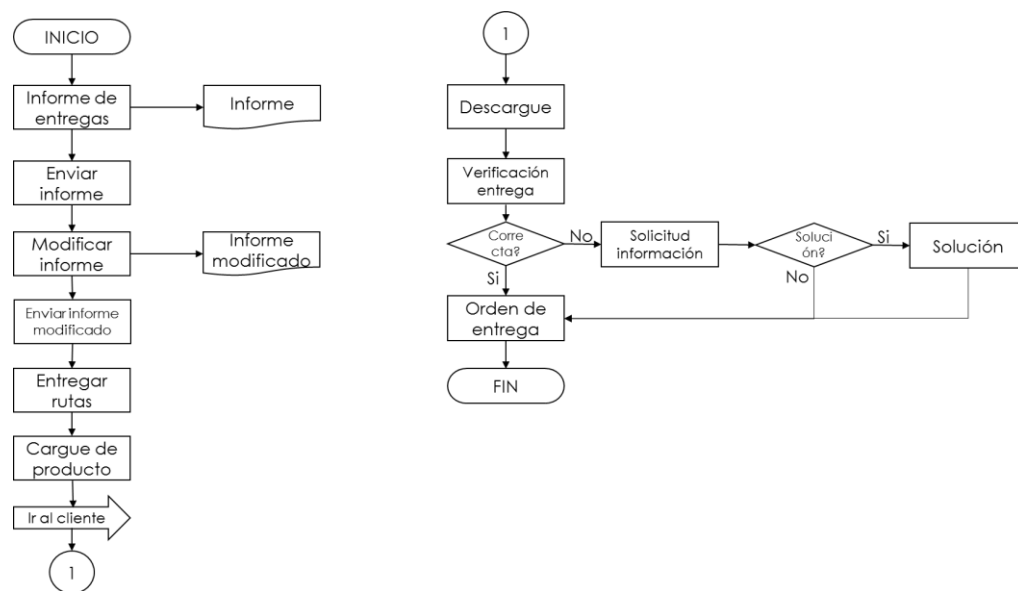
Fuente. Adaptado de empresa en estudio

3.6. PROCESO DE TRANSPORTE

Para transportar el producto (Cobb Avian 48), la empresa realiza una fase de planeación, donde se conoce los clientes con una anticipación de aproximadamente veintiún (21) días. Para los cual se cuenta con un informe detallado de las entregas por fechas, generado dos días antes por parte de la coordinadora de despachos; en este documento se resalta información del cliente, la cantidad a entregar, el precio y la ciudad.

El informe anteriormente mencionado, es enviado por medio de correo electrónico al jefe de transportes quien lo modifica de acuerdo a los criterios establecidos por la empresa, los cuales serán detallados posteriormente en el presente documento; en la actualidad no existe un modelo o proceso para regular el control de cambios presentados en el informe realizado.

Figura 9 Proceso de transporte



Fuente. Adaptado de empresa en estudio

Según la información suministrada por la coordinadora de despachos, la empresa no tiene obligatoriedad en el cumplimiento de estos criterios, sin embargo, es una consideración que el jefe de transportes ha determinado como óptima para la realización de las entregas. Para el desarrollo del presente trabajo, se obviará el cumplimiento de los mismos. Posteriormente, el informe de entregas es modificado por el jefe de transportes adicionando información adicional para las partes interesantes.

El día de la entrega, los camiones ubicados en sus respectivas plantas son cargados con la cantidad del producto que detalla el informe de entregas modificado. Realizado el cargue, los conductores viajan a donde el cliente y realizan la entrega del producto, el cliente deberá verificar si el producto cumple con las condiciones preestablecidas con la empresa, para luego firmar una orden de entrega que avala el retiro por parte del conductor.

Una vez culminado el proceso con el cliente, el conductor se dirige al siguiente punto de entrega que considere más cercano, esto es realizado hasta visitar todas las ciudades que les fueron asignadas, regresando finalmente a la planta de incubación en donde entrega las órdenes de entrega debidamente firmadas.

3.6.1. Restricciones de transporte

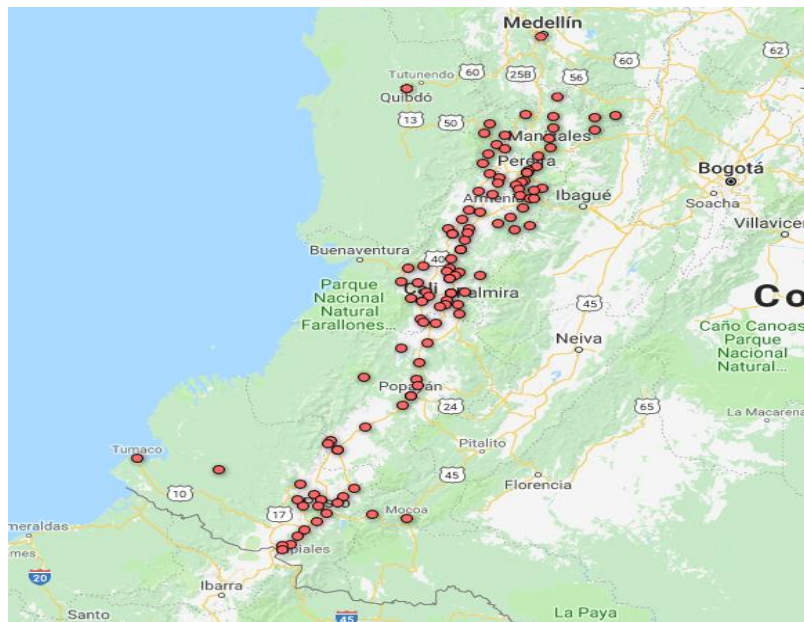
- Cantidad. La empresa cuenta actualmente con diez (10) vehículos con capacidad limitada para realizar la entrega a cada cliente, los valores de capacidad se encuentran descritos en la tabla No. 3 de capacidades de vehículos.

Tiempo. El producto no puede ser entregado después de tres (3) días calendario desde su nacimiento, es decir, se tiene un plazo máximo de setenta y dos (72) horas para entregar al cliente la cantidad solicitada. Es decir, si el pollito nace el día diecinueve (19) del mes, la fecha máxima de entrega al cliente es el veintidós (22) del mismo mes.

3.6.2. Cliente

La demanda de los clientes del sector occidental que posee la empresa Agroavícola Bunsan S.A. no es una demanda constante en cada uno de los días de nacimiento, es por ello que las ciudades donde se debe entregar producto son variables para cada fecha de entrega, en la figura No. 9 se presenta la ubicación geográfica de las ciudades y corregimientos donde fueron realizadas entregas en el periodo comprendido del 1 de diciembre de 2018 y al 2 de febrero de 2019.

Figura 10 Ubicación geográfica de algunos clientes de la empresa



Fuente. Tomado de la Información suministrada por la empresa. Aplicación utilizada: Fusión Table

Como se puede observar en la a figura No. 10, existe una concentración de los clientes en la zona central-norte de la regional Occidente (Cauca, Valle del Cauca, Caldas, entre otros), es decir, que se encuentran estos puntos aledaños a ambas plantas de incubación (Bolo San Isidro y Barcelona), permitiendo que los costos de transporte de mercancía no sean tan elevados, con respecto a tener las plantas ubicadas a una mayor distancia de los clientes potenciales de la compañía. Por esto, la organización actualmente no considera probable abrir una nueva planta de incubación en el sur-occidente o cambiar una de las plantas a dicha zona.

Es válido aclarar que algunas de las ciudades que se encuentran descritas en el mapa son visitadas con poca frecuencia, para ser más precisos, el 55,08% (65 puntos entre ciudades y corregimientos) de los puntos de entrega fueron visitados en menos de cinco (5) ocasiones en el periodo de estudio y el 17,8% solo fue recurrido una vez durante el mismo lapso de tiempo, es decir, dichos puntos no son de mucha recurrencia para las rutas, por lo cual no son considerados en el ejercicio.

Para encontrar los nodos (ciudades de entrega) se empleará una investigación realizada en el año 2011, para el establecimiento mediante una clasificación ABC multicriterio de las ciudades tipo A, es decir, los puntos de entrega más constantes durante el periodo de tiempo en estudio (Castro Zuluaga et al., 2011).

Tabla 1 Criterios para clasificación ABC de ciudades clientes

CRITERIO	PONDERACIÓN
Unidades compradas en el periodo	75%
Frecuencia de pedidos	20%
Distancia a las plantas	5%

Fuente. Elaboración propia

La tabla No. 1 representa las ponderaciones propuestas, las cuales fueron establecidas con el apoyo de la coordinadora de despachos de la empresa y el jefe de transportes.

Las ciudades que resultaron clasificadas como tipo A, son:

Tabla 2 Listado de clientes tipo A

1	Medellin
2	Armenia
3	Pereira
4	Pasto
5	Chinchina
6	Toro
7	Cartago
8	Popayan
9	Sandona
10	San Jose de alban
11	Yanala
12	Anserma nuevo
13	Quimbaya
14	Cali
15	Mocoa
16	Nariño
17	Quibdo
18	Ipiales
19	Dosquebradas (Risaralda)
20	Suarez (Cauca)
21	Mojarras (Nariño)
22	Santa rosa de sonso
23	Palmira

Fuente. Elaboración propia.

Figura 11 Ubicación geográfica de las ciudades de entrega tipo A



Fuente. Tomado de la Información suministrada por la empresa. Aplicación utilizada: Fusión Table

En la figura No. 11, representa las ciudades más importantes de acuerdo a los criterios establecidos, las cuales servirán de punto de partida para el modelo de optimización que será evaluado.

3.6.3. Planificación de las rutas actual

Como se pudo evidenciar en la descripción del proceso de distribución, las demandas de los clientes se conocen con anterioridad, es por ello que para la planificación de las rutas se cuenta con información a tiempo para realizar una correcta estrategia de entrega.

Actualmente la empresa cuenta con una serie de rutas determinadas y que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Ruta Valle: Recorre ciudades centrales del departamento del Valle y ciudades cercanas, es realizada por un camión de baja capacidad (2.500 unidades), según un informe suministrado por la empresa, el 81,25% es asignado un vehículo con capacidad para 3.000 unidades de producto, esto debido a la poca demanda que se presenta (Ver Figura No. 12).
- Ruta Pasto: El vehículo asignado a esta ruta se encarga de abastecer ciudades del departamento del Cauca y Nariño, en ocasiones realiza entregas en el departamento del Putumayo, de acuerdo a la demanda del día. Esta es una de las rutas de mayor duración debido a las largas distancias que se deben recorrer (superiores a 1.000 Km) (Ver Figura No. 12).
- Ruta eje cafetero: Esta ruta incluye ciudades de los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y algunas del norte del Valle del Cauca, puede ser abastecida en ocasiones por la planta del Bolo San Isidro o por la ubicada en Barcelona, todo depende de la disponibilidad de producto que se tenga (Ver Figura No. 12).
- Rutas de galpones: Los galpones son clientes internos de la empresa que se encuentran en el departamento del Cauca. En esta ruta no se realiza más entregas a otro cliente. No se muestra a la figura debido a que son clientes puntuales y esporádicos.
- Ruta Medellín: La empresa realiza una maquila interna para otra planta de incubación de la región centro, este es el cliente más importante para la empresa según la clasificación ABC presentada anteriormente. El vehículo que abastece a la

planta no realiza ninguna otra entrega en su recorrido. No se muestra a la figura debido a que son clientes puntuales y esporádicos.

- Rutas de granjas: Las granjas de la empresa suelen necesitar producto para su proceso productivo, esta necesidad la satisface la misma empresa mediante sus plantas de incubación. Estas rutas son directas ya que generalmente no realizan entregas a ningún otro cliente. No se muestra a la figura debido a que son clientes puntuales y esporádicos.
- Rutas clientes mayoristas: Algunos clientes mayoristas que piden grandes cantidades (generalmente superiores a 20.000 unidades) son abastecidos en una ruta independiente o con visitas a pocos clientes (menos de 5). No se muestra a la figura debido a que son clientes puntuales y esporádicos.

Figura 12 Sectorización de rutas



Fuente. Elaboración propia.

Es válido aclarar que estas rutas no son estándar y que se pueden presentar combinaciones de ellas.

Para realizar la distribución es parte clave conocer el origen del producto, por ello la empresa cuenta actualmente con unos criterios que sirven de soporte al jefe de transporte para realizar la planificación de las rutas. Estos criterios no son de obligatorio cumplimiento, su función es servir como guía para la asignación de ciudades (o clientes) a cada viaje.

Los criterios se mencionan a continuación:

- Los clientes de las ciudades ubicadas en Nariño o Cauca son abastecidos por la planta de incubación del corregimiento Bolo San Isidro.
- Las granjas de la Agroavícola reciben el suministro de producto de la planta de Barcelona.
- La maquila interna que se realiza con destino a la ciudad de Medellín sale de la planta de Barcelona.

Para evaluar las rutas en primera instancia se decide utilizar un indicador de utilización conocido como el Índice de capacidad o Utilización definido como:

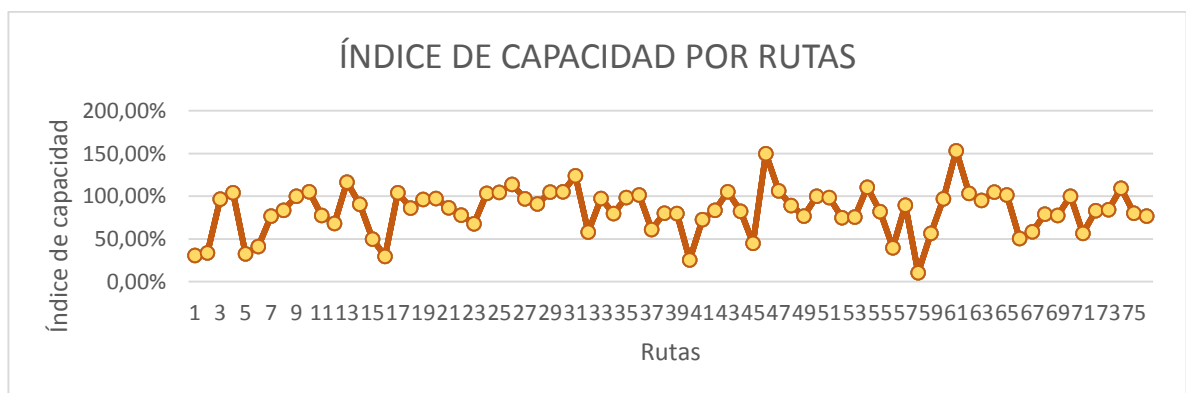
$$\text{Índice de capacidad} = \frac{\text{Capacidad utilizada}}{\text{capacidad total o disponible}}$$

Ecuación 6 Índice de capacidad

Fuente. Mora García (2008)

El cual, permite evidenciar el porcentaje de aprovechamiento que se está obteniendo de los vehículos en una ruta (Mora García, 2008), los datos son producto de un informe suministrado por la empresa que fue realizado entre octubre del 2018 y marzo del 2019, según los valores obtenidos, el promedio de utilización es del 83,44% con una desviación estándar del 26,8% para una muestra de setenta y seis (76) rutas, la cual refleja la variabilidad entre una ruta y otra. Además, se evidencia que en ocasiones (26,31% de los viajes) se sobre utiliza la capacidad de los vehículos, como se muestra en la figura No. 13.

Figura 13 Índice de capacidad por rutas

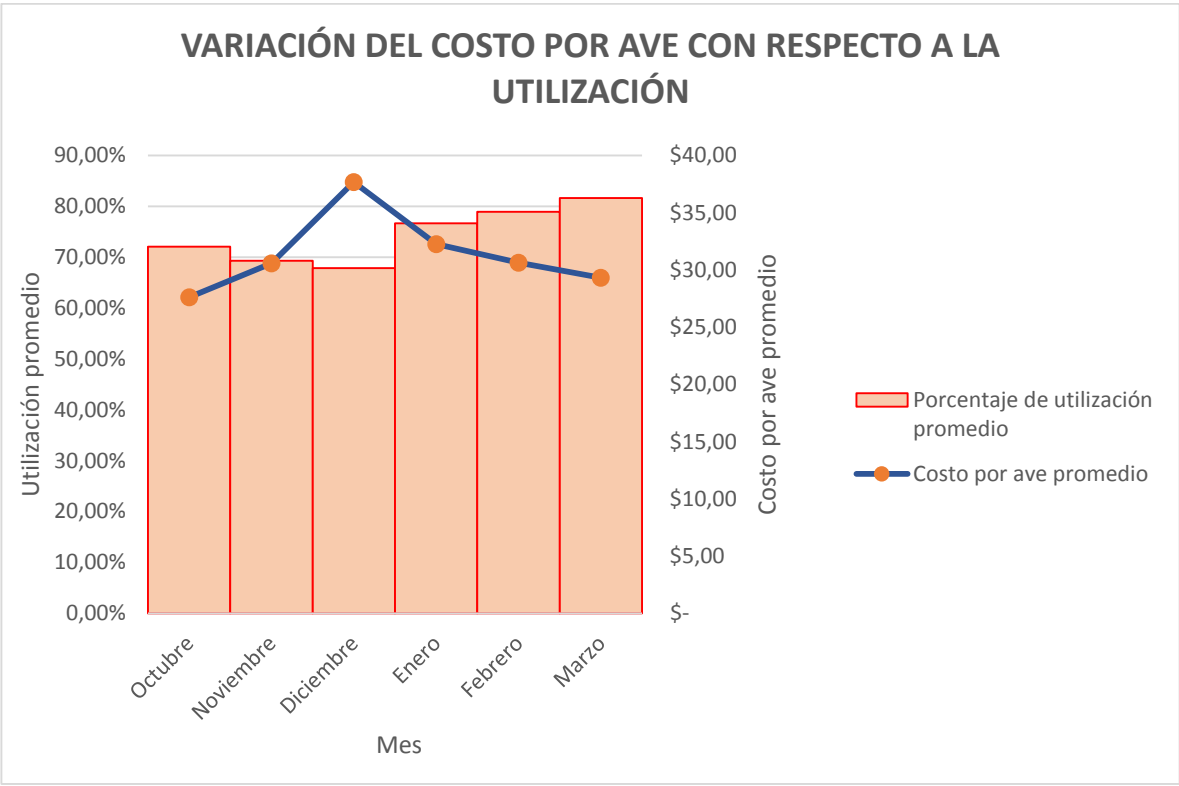


Fuente. Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura No. 13, aproximadamente el 14,47% de las rutas generan que los vehículos sobrepasen su capacidad instalada en más del 5%,

una situación que puede acarrear problemas en el funcionamiento. Como también, se evidencia que aproximadamente el 19,73% de los planes de entrega no logran incluir las cantidades suficientes para cubrir el 60% de la capacidad del vehículo, generando que los costos de transporte por unidad sean mayores, lo que conduce a un aumento en el costo total del producto. En la siguiente gráfica, se presenta como cambian los costos por ave en función del índice de utilización promedio por mes.

Figura 14 Variación de costos por ave en función de la capacidad utilizada



Fuente. Elaboración propia

En la figura No. 14, se puede observar que se presenta una disminución en los costos por ave cuando la utilización aumenta, considerando esto y si se observa la información recolectada de las rutas, la organización tiene un foco de mejora que lograría reducir sus costos.

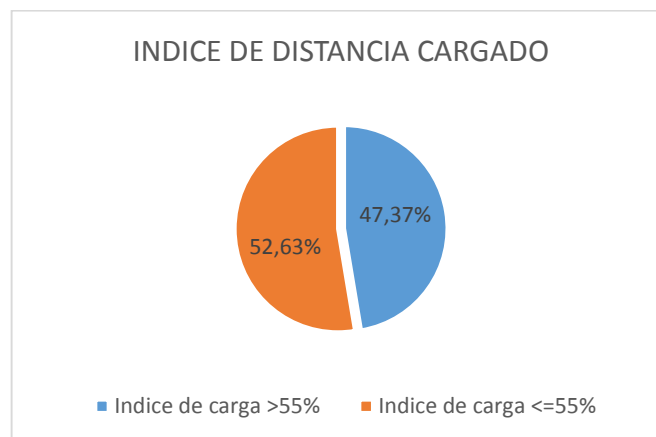
Por otro lado, es necesario verificar la cantidad de kilómetros recorridos por los vehículos sin carga ya que este representa un viaje que no genera valor debido a que no se realizan entregas, a continuación, se presenta el índice de distancia cargada el cual se calculó para cada una de las rutas estudiadas, mediante la utilización de la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de distancia cargada} = \frac{\text{Km recorridos con carga}}{\text{Km recorridos totales}}$$

Ecuación 7 Índice de distancia cargada

Fuente. Mora García (2008)

Figura 15 Índice de distancia cargado



Fuente. Elaboración propia

Según la información detallada en el gráfico anterior, el 52,63% de las rutas estudiadas presentan un índice de distancia cargado menor al 55%, esto quiere decir que aproximadamente la mitad de los kilómetros recorridos por cada vehículo son realizados sin carga y, por ende, sin aportar valor al proceso de transporte, estos recorridos podrían ser aprovechados para entregar a otros clientes que se encuentren en dichos trayectos.

3.6.4. Flota de transporte

La empresa cuenta actualmente con la siguiente flota de transporte:

Tabla 3 Flota de transporte

	PLACA DEL VEHÍCULO	CAPACIDAD (Pollitos de un día)	PLANTA DE INCUBACIÓN	RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE (Km/Gal)
1	SXE-118	41.600	Barcelona	17,54
2	WMX-022	38.000	Bolo San Isidro	20,12
3	CMF-825	33.000	Bolo San Isidro	21,72
4	TJV-819	33.000	Barcelona	24,14
5	TTS-768	30.000	Barcelona	19,02
6	TZO-212	28.000	Bolo San Isidro	25,57
7	VCM-170	28.000	Barcelona	25,24
8	BOZ-560	28.000	Barcelona	19,00
9	KUN-462	26.400	Bolo San Isidro	24,72
10	GOC-795	3.000	Bolo San Isidro	38,66

Fuente. Elaboración propia.

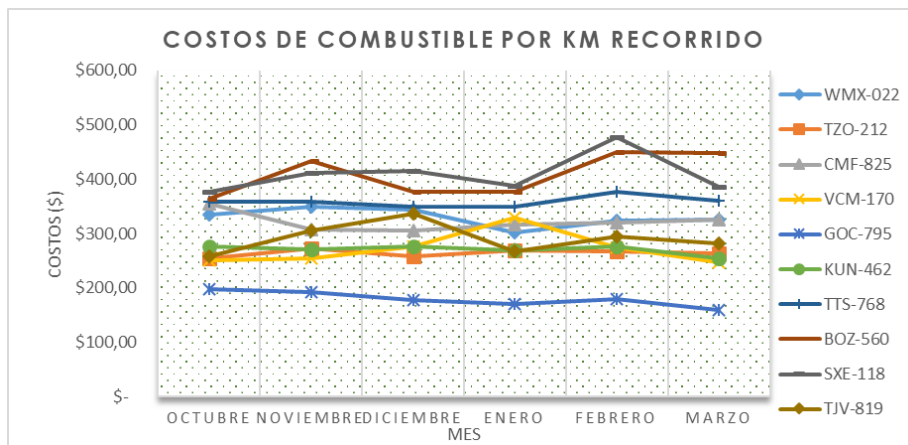
Cada vehículo cuenta con capacidad diferente lo que genera una decisión de asignación para el proceso de transporte de la empresa dado que se debe asignar un vehículo para la atención de cada cliente.

3.6.5. Costos de transporte y tasa de utilización

Parte importante de la selección del transporte para cada ruta es la consideración de los costos, cada vehículo es diferente a otro, es por esto que la inversión en cada uno también presenta variación, los costos que son asociados directamente a la planeación de rutas son el de combustible, mantenimiento de vehículos, mano de obra y el causado por peajes.

A continuación, se presentan los costos de combustible recolectados por el departamento de transporte de la empresa en el periodo de octubre de 2018 a marzo de 2019 por kilómetro recorrido para cada camión.

Figura 16 Costos de combustible por kilómetro recorrido para cada camión



Fuente. Elaboración propia.

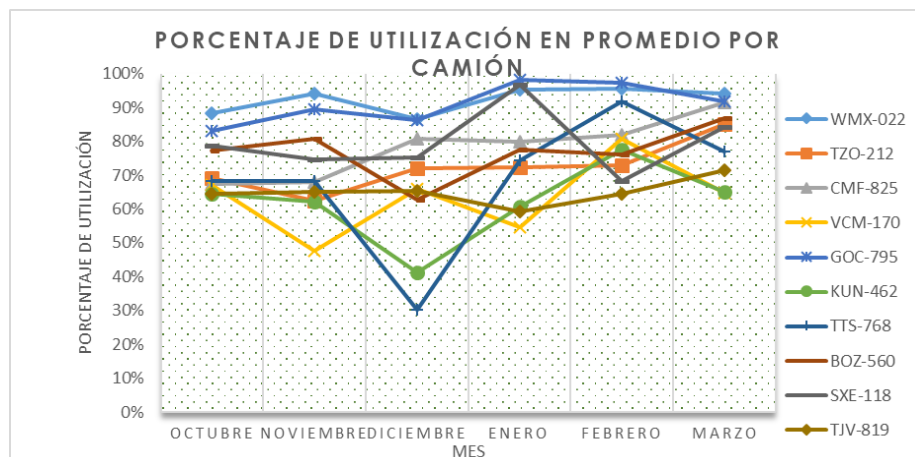
En la gráfica anterior se observa que la capacidad (variable para cada tipo de vehículo) con la que cuenta el camión se encuentra relacionada con su consumo de combustible y por consiguiente, con sus costos, esto es una consideración que se

presume obvia puesto que, si el vehículo cuenta con mayor capacidad, su peso será más elevado y por tanto será superior el consumo.

De los factores mencionados, los que se encuentran relacionados con la planeación de rutas son la cantidad de unidades transportadas y la idoneidad del conductor, para este último se trabaja bajo el supuesto de contar por completo con operadores con conocimiento suficiente de los vehículos; este supuesto es válido porque los trabajadores con los que cuenta la empresa para estas actividades son antiguos y conocen el funcionamiento de toda la flota.

Por lo anterior, la cantidad de unidades transportadas se convierte en un factor a considerar en la planeación de las rutas, para realizar un análisis correcto se considera que se debe establecer una relación entre la capacidad con la que cuenta el vehículo y el número de unidades que transporta, para ello se propone el indicador de capacidad utilizada promedio por viajes en cada mes, a continuación, se presentan los resultados obtenidos.

Figura 17 Unidades transportadas por camión



Fuente. Elaboración propia.

Al observar la figura No. 16 y No. 17, se concluye lo siguiente:

- En el vehículo SXE-118 se observa que presenta una relación inversa que se fundamenta en tres momentos en la gráfica:

En el mes de noviembre, los costos de combustible aumentaron con una disminución en el porcentaje de utilización de la capacidad.

En el mes de enero, se presentó un aumento del 28,23% con respecto al mes anterior en el porcentaje de utilización de la capacidad y se evidenció una disminución de los costos de combustible por kilómetro, en un 6,82% menos con respecto a diciembre. En el mes de febrero, una disminución en el porcentaje de utilización pudo haber generado un aumento en los costos de combustible por kilómetro.

- El camión TTS-768 no presenta grandes cambios en su consumo de combustible por kilómetro recorrido con respecto a las variaciones presentadas por el indicador de utilización de la capacidad en el periodo de estudio.
- Para el vehículo BOZ-560 se evidencia un comportamiento variable, en los primeros tres meses de estudio (octubre a diciembre de 2018), se presentó una relación directa entre las variables, para el segundo periodo de estudio (de enero a marzo de 2019) se presentó un comportamiento sin un patrón definido.
- El caso del camión KUN-462 es de poca influencia de la utilización en capacidad del camión con el costo de combustible por kilómetro.

De la información proporcionada por las gráficas se consolida mediante la realización de una comparación en la Tabla No. 4, en donde se presenta el costo de combustible por kilómetro promedio y el porcentaje de utilización de la capacidad por viaje promedio; tal y como se muestra en la tabla No. 4.

Tabla 4 Clasificación de los vehículos por indicador

NÚMERO	VEHÍCULO	PROMEDIO DE COSTO DE COMBUSTIBLE POR KILOMETRO	PROMEDIO DE PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN DE LA CAPACIDAD POR VIAJE
1	SXE-118	17,540	78,181%
2	WMX-022	20,123	92,300%
3	CMF-825	21,723	63,504%
4	TJV-819	24,137	76,824%
5	TTS-768	16,148	68,296%
6	TZO-212	25,570	61,890%
7	VCM-170	25,238	79,603%
8	BOZ-560	19,003	91,000%
9	KUN-462	24,722	64,944%
10	GOC-795	38,658	72,274%

Fuente. Elaboración propia.

De la tabla No. 4 se puede afirmar lo siguiente:

- El vehículo de placa WMX-022 se encuentra entre los de mayor capacidad y presenta en promedio el índice de ocupación más alto de los vehículos con un 92,3%, ofreciendo un buen rendimiento entre consumo de combustible y unidades cargadas, de acuerdo la programación de rutas generadas.

- El vehículo de placa GOC-795 presenta unos costos de combustible por kilómetro muy bajos comparados con los otros vehículos utilizados por la empresa y viaja en promedio con un porcentaje de capacidad cubierto del 91% (aproximadamente 2730 unidades de pollito), el aspecto negativo de este vehículo son las unidades que logra transportar en cada viaje las cuales son como máximo 3000 aves.
- Caso contrario a los anteriores se presenta con los vehículos de placa BOZ-560 y TTS-768 que no son de gran capacidad (octavo y quinto lugar respectivamente) y generaron costos superiores a camiones de mayor tamaño (el WMX-022, CMF-825, entre otros) sin realizar en promedio viajes con un porcentaje de capacidad cubierta superior al 80% (76,82% y 68,3% respectivamente).

Como conclusión, algunos vehículos presentaron un mejor rendimiento (en cuanto a inversión en combustible) en el periodo en estudio, esto permite inferir que son de mayor relevancia para el proceso de transporte si el objetivo de este es disminuir los costos de combustible por kilómetro o no permitir que aumenten.

3.7. DEMANDA

La Agroavícola Bunsan distribuye su producto cuatro (4) veces a la semana (lunes, martes, jueves y viernes), de acuerdo, a lo pactado con el cliente por parte de los vendedores, cada día de entrega presenta una demanda y destinos de entrega variables.

A lo largo del año 2018 la empresa recibió pedidos diferentes para cada día de despacho, pero siempre teniendo en cuenta la capacidad para realizar la distribución de las aves.

La máxima demanda que recibió la empresa en el año 2018 fue de 240.000 unidades (viernes de la semana 18 del año), aun así, según lo descrito anteriormente Bunsan cuenta con una flota propia para el transporte de 289.000 aves Cobb Avian 48 que le permitió cumplir con un buen margen de seguridad.

Por otro lado, en lo referente a la demanda que tiene el producto no se consideró para el presente trabajo como una variable si no por el contrario se abordó con como una demanda estocástica.

3.8. CONSIDERACIONES CLAVES

Como se mencionó a lo largo del capítulo, actualmente la empresa no cuenta con un método de ruteo para la distribución de productos a cada uno de los clientes con lo que se cuenta en la zona. Este ruteo solo se efectúa de manera empírica de acuerdo a la experticia de los conductores con los que cuenta la empresa, por lo que para la evaluación de este método solo se conoce los costos asociados a cuatro muestras tomadas correspondientes a datos extraídos en el mes de enero de 2018 (Ver Tabla No. 8), y los cuales se tomarán como referencia de la evaluación de la propuesta de mejora.

Tabla 5 Costeo Ruteo Actual para cuatro muestras

MUESTRA	COSTO RUTEO ACTUAL (EMPÍRICO)
Muestra 1	\$ 3.208.497
Muestra 2	\$ 2.795.040
Muestra 3	\$ 2.907.814
Muestra 4	\$ 2.924.548

Fuente. Elaboración propia.

Además de esto es importante destacar la subutilización de la capacidad de los vehículos (Ver Figura No. 13) y que por tanto genera un aumento en los costos por unidad de producto repercutiendo en las utilidades de la organización.

Por otro lado, otro aspecto a mejorar del proceso de transporte son las distancias recorridas sin carga porque estas no agregan valor al mismo, sin embargo, generan un aumento de los costos logísticos del producto, lo cual deberá ser considerado en el modelo de optimización.

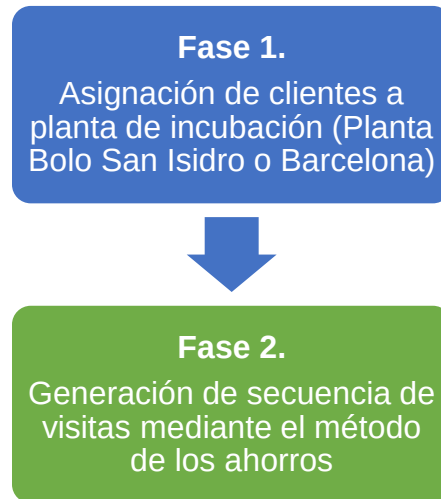
4. MODELO DE RUTEO

En el siguiente modelo de distribución involucra la aplicación de técnicas de ruteo y programación de vehículos para el proceso objeto de estudio.

Para la construcción del modelo que permita mejorar la entrega de las aves Cobb Avian 48 por parte de la Agroavícola Bunsan S.A. se debe considerar lo presentado en la situación actual referente al proceso de distribución del producto Cobb Avian 48, se propone generar las rutas de entrega en un modelo MDVRP de dos fases (Ver figura No. 18):

- Fase 1: En esta fase se busca la asignación de cada cliente a alguna de las dos plantas de incubación (planta Bolo san isidro o Barcelona) que presenta la empresa en la región suroccidente, a través de un modelo de programación lineal entero mixto.
- Fase 2: Se genera la secuencia de visitas de los clientes de acuerdo a la asignación de plantas obtenidas en la fase anterior. Para resolver este problema se ha seleccionado la heurística constructiva del método de los ahorros (heurística de Clarke-Wright), puesto que permite atender clientes en relación con la minimización de distancias, como también se utiliza para generar soluciones casi optimas en corto tiempo. Además, al ser un problema de optimización complejo no puede ser resuelto por técnicas exactas por el gran tamaño (número de nodos y clientes) y el tiempo que tardaría en encontrarse el ruteo óptimo (ya que el tiempo se incrementa a medida que los nodos n aumentan) (Castañeda Jiménez & Cardona Arias, 2014).

Figura 18 Fases modelo de optimización



Fuente. Elaboración propia

4.1. Fase 1: Asignación de plantas de incubación.

El problema de asignación de instalaciones puede ser planteado y solucionado a través de programación lineal en variables binarias (entera mixta) donde se deben considerar parámetros de costos o distancia entre plantas y clientes (Vallhonrat et al., 1991).

Para la asignación de las incubadoras a cada uno de los clientes se propone un modelo de programación lineal que determinará las cantidades a enviar a cada cliente desde cada una de las plantas (variable X_{ip}) considerando la capacidad de las plantas (C_p), la demanda de los clientes (D_i), los costos de transporte (C_p) y el costo por unidad en cada planta (C_{unid_p}).

4.1.1. Costos de transporte

Los costos de transporte son calculados con la información recolectada por la organización en el periodo de octubre de 2018 a marzo de 2019, dicha información fue suministrada por el jefe de transportes de la empresa. Para calcular el costo de transporte se considera el promedio de los costos obtenidos por todos los vehículos asignados en cada planta de incubación. Esta consideración es válida dado que los vehículos retornan a la planta siempre que terminan el recorrido (Sánchez Galván et al., 2017).

A continuación, en la tabla No. 8 se presentan los costos por kilómetro para cada vehículo

Tabla 6 Costos de transporte desde las plantas

PLACA DEL VEHICULO	PLANTA	COSTO POR KILOMETRO POR UNIDAD TRANSPORTADA						PROMEDIO VEHICULO	PROMEDIO PLANTA
		OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO		
WMX-022	Bolo San Isidro	\$ 1.988,6	\$ 1.697,2	\$ 1.367,2	\$ 1.643,6	\$ 2.032,1	\$ 1.679,0	\$ 1.734,6	\$ 1.352,1540
TZO-212		\$ 1.135,4	\$ 1.067,4	\$ 1.002,4	\$ 1.489,2	\$ 1.179,8	\$ 1.439,3	\$ 1.218,9	
CMF-825		\$ 1.960,0	\$ 1.428,3	\$ 988,8	\$ 1.353,1	\$ 1.316,5	\$ 1.249,3	\$ 1.382,7	
GOC-795		\$ 598,6	\$ 543,0	\$ 870,5	\$ 429,8	\$ 551,1	\$ 320,5	\$ 552,2	
KUN-462		\$ 1.593,8	\$ 1.698,1	\$ 1.476,6	\$ 1.273,9	\$ 1.801,4	\$ 3.390,2	\$ 1.872,3	
VCM-170	Barcelona	\$ 1.177,8	\$ 783,0	\$ 1.504,3	\$ 2.195,0	\$ 1.586,5	\$ 1.624,2	\$ 1.478,5	\$ 1.464,8243
TTS-768		\$ 1.382,3	\$ 1.129,6	\$ 1.500,0	\$ 1.631,2	\$ 1.700,0	\$ 1.618,6	\$ 1.493,6	
BOZ-560		\$ 1.137,3	\$ 1.341,8	\$ 1.147,4	\$ 1.131,3	\$ 1.114,0	\$ 1.012,6	\$ 1.147,4	
SXE-118		\$ 1.767,8	\$ 1.271,3	\$ 1.636,5	\$ 1.567,3	\$ 1.560,7	\$ 2.219,2	\$ 1.670,5	
TJV-819		\$ 1.446,4	\$ 1.122,4	\$ 1.686,5	\$ 1.631,2	\$ 1.700,0	\$ 1.618,6	\$ 1.534,2	

Fuente. Elaboración propia

4.1.2. Matriz de distancias

Para la ejecución del modelo de programación lineal es requerido calcular las distancias entre las plantas de incubación y los clientes. Para el cálculo de estos se procedió de la siguiente manera:

Para obtener la ubicación de los nodos, se utilizaron coordenadas geodésicas, brindadas por la Google Maps, tal y como se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 7 Coordenadas geodésicas de clientes y plantas de incubación.

CIUDAD	COORDENADAS GEODESICAS	
	Latitud	Longitud
PLANTA BOLO	3,465577	-76,358473
PLANTA BARCELONA	4,480880	-75,698286
AEROPUERTO	3,543865	-76,384107
ARMENIA	4,535253	-75,676258
BUGA	3,901496	-76,302824
CAPULI	1,349815	-77,366756
CEBADAL	1,116402	-77,368000
EL REMOLINO	1,674699	-77,330188
FLORIDA	3,321249	-76,235146
GORGONA	3,397268	-76,386223
GUACARI	3,763152	-76,332343
PEREIRA	4,809561	-75,692301
QUIMBAYA	4,626250	-75,762896
RESTREPO	3,821691	-76,521980
SALONICA	4,128861	-76,369651
TRUJILLO	4,211961	-76,318599

Fuente. Tomado de Google Maps

Para la conversión de las coordenadas geodésicas a cartesianas, se emplea el método de transformación bidimensional según el método de León, mencionado en la caracterización teórica del presente documento. En el cual, se hace necesario conocer el elipsoide de referencia para Colombia y el DATUM (sistema de puntos de referencia sobre la superficie terrestre que permite representar puntos geográficos), permitiendo así la realización de la transformación (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004).

Según el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) el elipsoide más utilizado a nivel mundial es el GRS80 (Geodetic Reference System, 1980) cuyos parámetros se encuentran detallados en la siguiente tabla (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2019).

Tabla 8 Parámetros del elipsoide GRS80

Elipsoide GRS80		
Elemento	Valor	Unidad
a (Semieje mayor)	6378137	Metros
b (Semieje menor)	6356752,314	Metros
Excentricidad	0,0818191910	-
2a Excentricidad	0,0820944380	-
e^2	0,0067394970	-
c (Radio polar de curvatura)	6399593,626	Metros

Fuente. Adaptado de Instituto Geográfico Agustín Codazzi

En el caso del DATUM, se deciden elegir los parámetros del punto San Antonio Cali para la transformación de coordenadas geodésicas de los nodos que son presentados en el caso de estudio, esto debido a su centralización con respecto a todos los puntos de ubicación de los clientes y plantas de incubación. Los parámetros del DATUM seleccionado se presentan en la tabla 11.

Tabla 9 Parámetros del DATUM correspondiente a San Antonio Cali

SAN ANTONIO CALI					
Latitud	Longitud	Lat. Radianes	Long. Radianes	Normal N	Curvatura M
3,515575	-76,27036667	0,061358359	-1,33116902	6379118	5858987

Fuente. Adaptado de Agustín Codazzi

Luego, se realiza el cálculo de las coordenadas planas cartesianas para la planta de incubación ubicada en el corregimiento Bolo San Isidro de la ciudad de Palmira, a través de la transformación de las coordenadas geodésicas proporcionadas por la herramienta cartográfica de Google Maps.

Convirtiéndolas posteriormente a grados decimales y radianes, mediante la utilización de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Latitud (decimales)} = X = \frac{\text{Latitud} * \pi}{180}$$

Ecuación 8 Latitud en grados decimales y radianes

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

Aplicando la formula, con el siguiente dato ejemplo queda:

$$\text{Latitud (decimales)} = X = \frac{3,465577\pi}{180} = 0,061$$

Luego se calcula la longitud

$$\text{Longitud (decimales)} = Y = \frac{\text{Longitud} * \pi}{180}$$

Ecuación 9 Longitud en grados decimales y radianes

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

Aplicando la formula, se obtiene:

$$\text{Longitud (decimales)} = Y = \frac{-76,3014333\pi}{180} = -1,332$$

Se procede a calcular el valor de la latitud media.

$$\text{Latitud media} = \varphi_m = \frac{X + X_o}{2}$$

Ecuación 10 Latitud media

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

$$\varphi_m = \frac{0,061 + 0,061358359}{2} = 0,061$$

Donde X_o corresponde a la latitud en decimales del DATUM seleccionado.

Es necesario calcular el valor de la gran normal N y de la curvatura M de la ciudad con las siguientes ecuaciones.

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - (Exc * (\text{sen}^2(X)))}}$$

Ecuación 11 Valor de la gran normal

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

$$N = \frac{6378137}{\sqrt{1 - (0,081819191 * (\text{sen}^2(0,061)))}} = 6379116,564$$

$$M = \frac{a * (1 - Exc)}{\left(1 - (Exc * \text{sen}^2(\varphi_m))\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Ecuación 12 Valor de la curvatura M

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

$$M = \frac{6378137 * (1 - 0,081819191)}{(1 - (0,081819191 * \text{sen}^2(0,061)))^{\frac{3}{2}}} = 5858984,109$$

Con estos valores se procede a calcular la coordenada Y y X de los nodos, obteniendo los siguientes valores:

$$Y = 105686,296$$

$$X = 100206,985$$

En la tabla No. 12 se presentan las coordenadas calculadas para los nodos de clientes utilizados en este caso.

Tabla 10 Coordenadas cartesianas de nodos de clientes y plantas

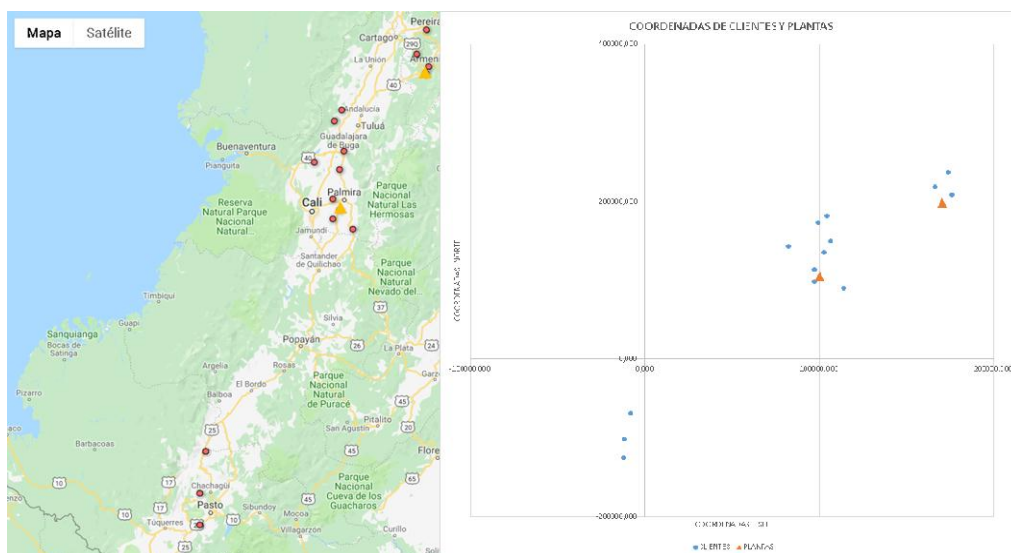
CIUDAD	Coordenada norte (Y)	Coordenada Este (X)
PLANTA BOLO	105686,296	100206,985
PLANTA BARCELONA	203569,001	173514,891
AEROPUERTO	113926,009	97358,739
ARMENIA	208933,003	175956,002
BUGA	149764,755	106393,992
CAPULI	-101454,645	-12037,532
CEBADAL	-125313,956	-12185,837
EL REMOLINO	-68567,233	-7950,986
FLORIDA	89805,506	113915,313
GORGONA	98952,197	97121,729
GUACARI	135883,402	103113,409
PEREIRA	237136,292	174151,896
QUIMBAYA	219019,380	166331,150
RESTREPO	143593,308	82043,354
SALONICA	173624,534	98972,337
TRUJILLO	181660,626	104643,281

Fuente. Elaboración propia

Si se tiene en cuenta el resultado obtenido al graficar las coordenadas planas cartesianas de los nodos en el plano (ver figura No. 19) y realizar la comparación con la distribución geográfica establecida por Google Maps, es posible determinar que la representación en coordenadas cartesianas presenta similitud con la presentada realmente en el mapa geográfico.

Para el cálculo de las coordenadas cartesianas de todos los clientes con los que la empresa se procedió de la misma forma, originando la tabla resumen correspondiente al Anexo No. 1

Figura 19 Comparativo entre distribución real de nodos y distribución en plano cartesiano



Fuente. Elaboración propia

Cuando se tienen las coordenadas cartesianas de los nodos requeridos, se procede a elaborar la matriz de distancias euclidianas de las plantas de incubación a los clientes. Para el cálculo de estos valores se emplea la ecuación No.

$$Distancia\ euclidiana = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Ecuación 13 Distancia euclidiana

Fuente. Tomado de Agustín Codazzi

Los resultados obtenidos para la matriz de distancia entre plantas de incubación y clientes se presentan en la tabla No. 13 (los valores se encuentran en metros).

Tabla 11 Matriz de distancias de plantas de incubación a clientes

MATRIZ DE DISTANCIAS		
	PLANTA 1	PLANTA 2
AEROPUERTO	8718,11	112389,02
ARMENIA	128053,88	11166,88
BUGA	44510,56	81047,90
FLORIDA	20978,98	123148,09
GORGONA	7407,22	124258,61
GUACARI	30336,65	92537,11
CAPULI	235597,54	351731,72
EL REMOLINO	205091,29	321796,25
PEREIRA	150820,92	38220,59
QUIMBAYA	131212,78	20426,13
RESTREPO	42034,02	104599,69
SALONICA	67949,46	76125,55
CEBADAL	256891,54	372396,73
TRUJILLO	76103,74	68331,00

Fuente. Elaboración propia

4.1.3. Capacidad de las plantas de incubación

La capacidad de las plantas de incubación es conocida por el jefe de transporte con anterioridad de acuerdo al cargue de producto informado por la administradora de la incubadora, estas varían, por tanto, cada día de acuerdo a la disponibilidad del producto

Para la realización del ejercicio, se tomaron en cuenta cuatro muestras aleatorias, cuyas capacidades de las plantas se encuentran descriptas en el capítulo 5 del presente documento.

4.1.4. Modelo de programación lineal

Una vez establecidas las distancias mediante las matrices, se procede a desarrollar un modelo de programación lineal que permite la asignación de los clientes a cada una de las plantas de incubación considerando los costos que se incurren por el transporte del producto y la producción de cada unidad, restricciones de capacidades, demandas, entre otros.

El modelo se formuló de la siguiente manera:

- Variables

X_{ip} = Cantidad de unidades a enviar desde la planta p al cliente i [unidades]

Y_{ip} = Variable binaria que toma el valor de 1 si la planta p es asignada al cliente i ,
0 en caso contrario.

- Parámetros

C_p = Costo por Km de enviar una unidad desde la planta p $\left[\frac{\$}{Km} \right]$

C_{unid_p} = Costo de producir una unidad en la planta p $\left[\frac{\$}{unidad} \right]$

$Dist_{ip}$ = Distancia desde la planta p al cliente i [Km]

D_i = Demanda del cliente i [unidades]

Cap_p = Capacidad de la planta p [Unidades]

- Función objetivo

Minimizar los costos asociados al transporte y cubrimiento de la totalidad de la demanda.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^2 X_{ip} * C_{unid_p} + \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^2 Y_{ip} * C_p * Dist_{ip} \quad [\$]$$

- Restricciones

Restricción de capacidad de plantas. Esta restricción permite que la sumatoria de las unidades enviadas desde la planta p a cada uno de los clientes i no supere la capacidad que posee cada una de las plantas incubadoras.

$$\sum_{i=1}^n X_{ip} \leq Cap_p \quad \forall p = 1, 2$$

Restricción de demanda. Con esta restricción se asegura que se satisfaga la demanda de cada uno de los clientes que han solicitado producto a la Agroavícola, es decir, el cumplimiento de los requerimientos del cliente.

$$X_{ip} \geq D_i * Y_{ip} \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \wedge p = 1, 2.$$

Restricción de plantas asignadas por cliente. Solo se considera que una sola planta abastecerá un solo cliente, con el fin de generar orden en las entregas generadas por parte de la empresa.

$$\sum_{p=1}^n Y_{ip} = 1 \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Restricciones lógicas. Lo cual garantiza la no negatividad en el resultado obtenido.

$$X_{ip} \geq 0$$

Una vez establecido el anterior modelo de programación de lineal, se procederá a la ejecución y solución del modelo mediante la utilización de la herramienta *Solver de Microsoft Excel*.

4.2. Fase 2: Construcción de rutas

4.2.1. Consideraciones

Para la construcción de las rutas se empleará el método de los ahorros. Para lo cual se consideró lo siguiente:

La selección de los vehículos se realizó de acuerdo a la capacidad que sería enviada.

El método es trabajado con el supuesto de tener la flota de transporte completamente disponible, esta consideración es válida dado que los vehículos se encuentran a disposición de la empresa todos los días de entrega y hacen parte de la propiedad de la misma (flota propia).

Matriz de distancias. Para la aplicación del método de los ahorros al caso de estudio es requerido conocer las distancias entre los nodos (clientes e incubadoras). Para la construcción de la matriz de distancia es utilizada la misma metodología que se presentó anteriormente, donde se encontraron las distancias entre las plantas de incubación y los clientes (Ver Anexos No. 1, 2, 3, 4, 5 y 6)

Capacidad de vehículos. La capacidad de los vehículos se presenta como una restricción para las rutas que serán seleccionadas, dado que cada planta cuenta con una flota establecida que se encuentra a disposición para cualquier distribución que realice la compañía. En la tabla No. 14 se presentan los vehículos que tiene asignados cada planta para la entrega del producto.

Tabla 12 Flota de vehículos disponible para cada planta

VEHICULOS DISPONIBLES PLANTA 1 (BOLO SAN ISIDRO)	
WMX-022	38000
CMF-825	33000
TZO-212	28000
KUN-462	26400
GOC-795	3000
VEHICULOS DISPONIBLES PLANTA 2 (BARCELONA)	
SXE-118	41600
TJV-819	33000
TTS-768	30000
VCM-170	28000
BOZ-560	28000

Fuente. Elaboración propia

4.2.2. Método de los ahorros y determinación de las rutas

Una vez realizada la asignación de cada uno de los clientes (i) a su respectiva planta (p), se procede a la realización de la matriz correspondiente al método de los

ahorros, que determinara la ruta de abastecimiento a emplear por parte de la empresa.

Para su ejecución se utilizará las coordenadas planas cartesianas calculadas en el Capítulo 3 (Ver anexo 1) y la hoja de cálculo de Excel, con el fin de minimizar la distancia total recorrida por la ruta, determinando la secuencia óptima de visita de clientes.

Para el desarrollo del ruteo de Clarke Wright, se procede a recopilar información de las coordenadas de ubicación de las plantas y los clientes (coordenadas planas cartesianas), como también de las distancias calculadas previamente (Ver Capítulo 3 y numeral 4.1.2).

Con base en esta información se aplicó la formulación propia del algoritmo, hallando la diferencia entre, la suma de las distancias de las incubadoras (plantas) a los clientes y la distancia existente entre los dos clientes observados, realizando la adaptación de la fórmula de la siguiente forma (Herrera & Alarcón, 2017).

$$S_{ij} = D_{pi} + D_{pj} - D_{ij}$$

Ecuación 14 Adaptación método de los ahorros

Fuente. Adaptado de Herrera & Alarcón

Donde

S_{ij} Ahorro entre el punto ij (km)

D_{pi} Distancia entre la planta p y el cliente i (km)

D_{pj} Distancia entre la planta p y el cliente j (km)

D_{ij} Distancia entre los puntos i – j (km)

De esta forma se obtienen los ahorros para cada uno de los pares existentes en el modelo. A partir del mayor ahorro obtenido, sin olvidar las restricciones capacidad de los vehículos, se evalúa cada ruta por día y por vehículo teniendo en cuenta los tramos a cubrir por ésta de manera descendente en cuanto al ahorro de distancia.

4.2.3. Indicadores de mejora

Para la evaluación de la mejora se emplearán la tasa de utilización de los vehículos y la reducción de costos puesto que la empresa no maneja como tal un reporte de distancias si no de costos generados por el desarrollo de las rutas.

4.2.3.1 Reducción de costos

El primero hace referencia a la reducción de costos y se calcula mediante la ecuación No. 19 (Correa Mejía et al., 2018).

$$\text{Reducción de costos} = \left| \frac{Cm_i - Ca_i}{Ca_i} \right| \times 100$$

Ecuación 15 Porcentaje de reducción de costos

Fuente. Adaptado de Correa, Martínez et al

Donde

Cm_i Costo total de transporte (mejora) para la distribución de producto de la muestra i

Ca_i Costo total de transporte (actual) para la distribución de producto de la muestra i

Con este indicador se pretende validar la reducción de costos con la implementación de la asignación de clientes a las plantas de incubación y posterior ruteo para la muestra correspondiente.

Como se evidencia con esto, se consideraría la fase del modelo MDVRP, que se enfoca en la reducción de costos considerando la asignación de clientes a un depósito.

4.2.3.2 Capacidad utilizada

El índice de capacidad utilizada determina el porcentaje de uso del vehículo, es decir, de la capacidad total que posee el camión cuantas unidades están siendo transportadas. Para el cálculo de este indicador se empleará la ecuación explicada en el Capítulo 3 del presente documento.

5. RESULTADOS EN CASO DE ESTUDIO

Como se mencionó en el capítulo 4 para el desarrollo del ejercicio se utilizó la herramienta de simulación de Excel Solver.

Para la ejecución del modelo se seleccionaron cuatro muestras de manera aleatoria del mes de enero de 2019, con el fin de comparar los resultados obtenidos con el modelo empírico utilizado en la actualidad.

Para la ejecución del modelo programación lineal correspondiente a la fase 1. Asignación de plantas, se tomó en cuenta las siguientes capacidades proporcionadas por la Agroavícola para cada una de las muestras en estudio

Tabla 13 Capacidades plantas Muestras

CAPACIDADES DE PLANTAS (UNIDADES)		
MUESTRA	PLANTA 1 (UNIDADES)	PLANTA 2 (UNIDADES)
1	50.000	99.600
2	52.600	95.500
3	57.500	97.200
4	59.000	95.000

Fuente. Elaboración propia

Mediante el empleo de la herramienta de Solver se introdujo cada una de las restricciones planteadas en el Capítulo 4. Modelo de optimización, generando la

asignación de plantas por cada uno de los clientes, enfocada en la disminución en Km recorridos desde el origen (planta de incubación) hasta cada uno de los nodos (clientes); permitiendo así la minimización de los costos asociados al transporte tal y como se ve en las siguientes figuras:

Tabla 14 Fase 1 Muestra No.1

CAPACIDADES DE PLANTAS	
CAPACIDAD PLANTA 1	50000
CAPACIDAD PLANTA 2	99600

FUNCIÓN OBJETIVO	
\$	115.771.494,13

CANTIDADES A ENVIAR A CADA CLIENTE POR PLANTA										
	PLANTA 1					PLANTA 2				
	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Unid	Costo / Km	Distancia (Km)	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Uni	Costo / Km	Distancia (Km)
Ciente 1	2000	1	746	1352,15	9	0	0	753	1464,82	118
Ciente 2	0	0	746	1352,15	233	800	1	753	1464,82	116
Ciente 3	0	0	746	1352,15	135	48300	1	753	1464,82	23
Ciente 12	400	1	746	1352,15	260	0	0	753	1464,82	380
Ciente 14	0	0	746	1352,15	122	9700	1	753	1464,82	0
Ciente 151	200	1	746	1352,15	149	0	0	753	1464,82	271
Ciente 17	2100	1	746	1352,15	224	0	0	753	1464,82	344
Ciente 29	0	0	746	1352,15	136	1000	1	753	1464,82	38
Ciente 39	0	0	746	1352,15	116	5000	1	753	1464,82	9
Ciente 71	5400	1	746	1352,15	93	0	0	753	1464,82	211
Ciente 80	0	0	746	1352,15	183	950	1	753	1464,82	62
Ciente 81	0	0	746	1352,15	218	400	1	753	1464,82	96
Ciente 82	8000	1	746	1352,15	232	0	0	753	1464,82	354
Ciente 83	12800	1	746	1352,15	291	0	0	753	1464,82	181
Ciente 86	2200	1	746	1352,15	180	0	0	753	1464,82	302
Ciente 88	7000	1	746	1352,15	241	0	0	753	1464,82	362
Ciente 99	0	0	746	1352,15	228	950	1	753	1464,82	106
Ciente 97	0	0	746	1352,15	151	32300	1	753	1464,82	34
Ciente 98	200	1	746	1352,15	70	0	0	753	1464,82	190
Ciente 102	800	1	746	1352,15	106	0	0	753	1464,82	224
Ciente 110	600	1	746	1352,15	233	0	0	753	1464,82	170
Ciente 119	300	1	746	1352,15	213	0	0	753	1464,82	95
Ciente 124	3200	1	746	1352,15	212	0	0	753	1464,82	332
Ciente 126	3200	1	746	1352,15	246	0	0	753	1464,82	368
Ciente 133	300	1	746	1352,15	112	0	0	753	1464,82	233

Fuente. Elaboración propia

De la información arrojada por Solver para la Muestra No. 1, se extrajo la tabla No. 17 que contiene la los datos relacionados a la demanda-cliente asignado para una cada de las dos plantas incubadoras

Tabla 15 Detalle demanda a abastecer por cada planta para Muestra No.1

PLANTA 1		
CLIENTE	ABREV.	DEMANDA (UNIDADES)
Planta 1	P1	
Cliente 1	C1	2000
Cliente 12	C12	400
Cliente 151	C151	200
Cliente 17	C17	2100
Cliente 71	C71	5400
Cliente 82	C82	8000
Cliente 83	C83	12800
Cliente 86	C86	2200
Cliente 88	C88	7000
Cliente 98	C98	200
Cliente 102	C102	800
Cliente 110	C110	600
Cliente 119	C119	300
Cliente 124	C124	3200
Cliente 126	C126	3200
Cliente 133	C133	300
PLANTA 2		
CLIENTE	ABREV.	DEMANDA (UNIDADES)
Planta 2	P2	
Cliente 2	C2	800
Cliente 3	C3	48300
Cliente 14	C14	9700
Cliente 29	C29	1000
Cliente 39	C39	5000
Cliente 80	C80	950
Cliente 81	C81	400
Cliente 99	C99	950
Cliente 97	C97	32300

Fuente. Elaboración propia

Una vez establecido las demandas y asignación de clientes por plantas, se procede a la aplicación del algoritmo del método de los ahorros generando una matriz de los ahorros (Ver Anexos No. 6), permitiendo así el establecimiento de las rutas con base en los mayores ahorros generados.

Para ello se empleó la Ecuación No. 14, calculando las matrices de ahorro que se encuentran en los Anexos y posteriormente estableciendo como nodo inicial el que genera mayor ahorro, en donde el camión sale de una planta de incubación y visita un cliente, y así sucesivamente. Considerando en el establecimiento de los arcos las demandas y capacidades que poseen las flotas asignadas en la primera fase del método.

Como se evidencia la demanda de todos los nodos no puede ser abastecida por un solo vehículo, por lo cual la agrupación de nodos desencadena el establecimiento de rutas a las cuales se la asignara su camión correspondiente. En las tablas No, 18 y 19 se organizan las rutas según el tramo de mayor ahorro y se van asignando clientes o nodos según la cercanía o menor recorrido entre clientes, generando así un conjunto de rutas que cubren la totalidad de los clientes y permitiendo la asignación y posterior evaluación de la tasa de utilización de los vehículos.

Tabla 16 Rutas propuesta planta No.1 Muestra No. 1

RUTAS PLANTA NO. 1 MUESTRA NO. 1																			
RUTA 1	NODOS		P1	C88	C126	C82	C17	C124	C86	C151	C133	C102	C71	C98	C1	C119	C110	C12	P1
	DEMANDA	35500,00		7000	3200	8000	2100	3200	2200	200	300	800	5400	200	2000	300	600	400	
	RECORRIDO	897		241	13	17	20	12	45	32	38	22	13	24	77	207	135	432	260
RUTA 2	NODOS	0,00	P1	P83	P1														
	DEMANDA	12800,00		12800															
	RECORRIDO	582,87		291	291														

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO	
	WMX-022 CAPACIDAD 38000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	93,42%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	KUN-462 CAPACIDAD 26400	
	TASA DE UTILIZACIÓN	48,48%

Fuente. Elaboración propia

A pesar que la tasa de utilización del vehículo KUN-462 es interior al 50% se evidencia que no se utiliza el total de la flota que posee la planta a su servicio.

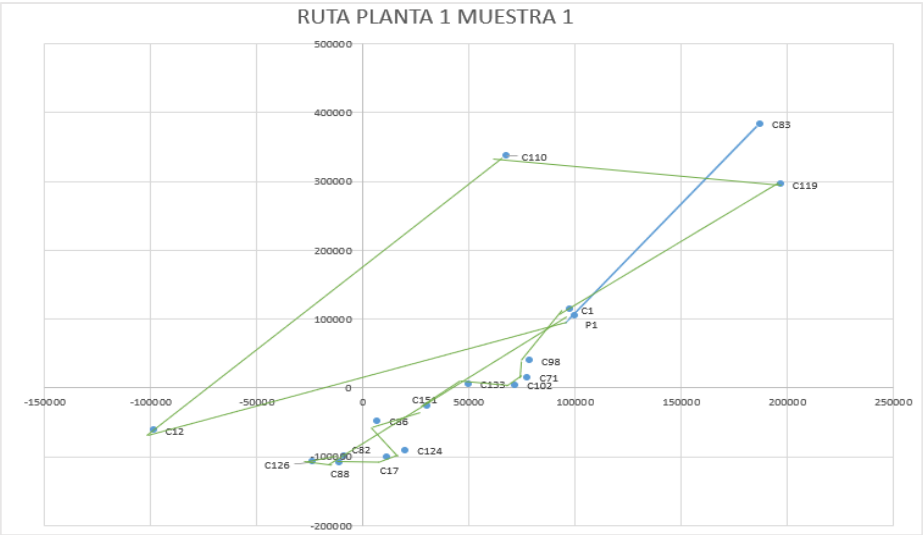
Tabla 17 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 1

RUTAS PLANTA No. 2 MUESTRA No. 1											
RUTA 1	NODOS		P2	C81	C99	C2	C80	C97	C29	C3	P2
	DEMANDA	41600,00		400	950	800	950	32300	1000	5200	
	RECORRIDO	304,51		96,102	13,174	42,165	54,796	32,213	25,175	17,283	22,607
RUTA 2	NODOS	0,00	P2	C39	C3	P2					
	DEMANDA	33000,00		5000	28000						
	RECORRIDO	64,49		9,273	31,607	22,607					
RUTA 3	NODOS	0,00	P2	C3	C14	P2					
	DEMANDA	24800,00		15100	9700						
	RECORRIDO	46,10		22,607	22,607	0,000					

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO	
	SXE-118 CAPACIDAD 41600 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	100,00%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	TJV-819 CAPACIDAD 33000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	100,00%
RUTA 3	CAMIÓN ASIGNADO	
	VCM-170 CAPACIDAD 28000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	88,57%

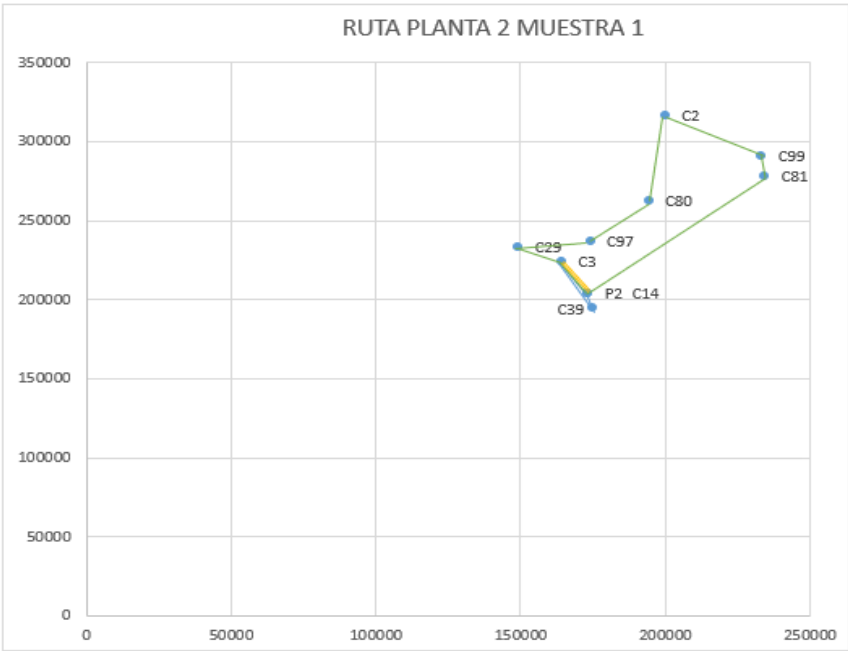
Fuente. Elaboración propia

Figura 20 Gráfico ruta planta 1 Muestra No.1



Fuente. Elaboración propia

Figura 21 Gráfico ruta planta 2 Muestra No.1



Fuente. Elaboración propia

De la información obtenida de las rutas de mejora se extrajo, la siguiente información correspondiente a los costos de transporte incurridos para la muestra información (Ver Tabla No. 20).

Tabla 18 Costo rutas Muestra No.1

TOTAL RECORRIDOS	DISTANCIA (KM)	COSTO (\$/KM)	TOTAL COSTO (\$)
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 1	1479,49	1352,15	\$ 2.000.489
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 2	415,10	1464,82	\$ 608.045
TOTAL			\$ 2.608.534

Fuente. Elaboración propia

Como se mencionó anteriormente no se dispone información acerca de la asignación de las rutas por parte de los conductores de manera empírica, por tanto, para el posterior análisis se cuenta solo con los costos de transporte de las muestras en estudio y los costos generados por las rutas establecidas con el método de los ahorros.

El mismo procedimiento se aplicó para las muestras No. 2, 3 y 4.

Tabla 19 Fase 1 Muestra No. 2

CAPACIDADES DE PLANTAS	
CAPACIDAD PLANTA 1	52600
CAPACIDAD PLANTA 2	95500

FUNCIÓN OBJETIVO	
\$	111.638.559,38

CANTIDADES A ENVIAR A CADA CLIENTE POR PLANTA										
PLANTA 1						PLANTA 2				
	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Unid	Costo / Km	Distancia (Km)	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Uni	Costo / Km	Distancia (Km)
Cliente 87	26000	1	746	1352,15	127	0	0	753	1464,82	11
Cliente 18	0	0	746	1352,15	45	6000	1	753	1464,82	86
Cliente 3	19700	1	746	1352,15	135	0	0	753	1464,82	23
Cliente 97	0	0	746	1352,15	151	62100	1	753	1464,82	34
Cliente 111	6100	1	746	1352,15	131	0	0	753	1464,82	17
Cliente 83	0	0	746	1352,15	291	12900	1	753	1464,82	181
Cliente 14	0	0	746	1352,15	122	10500	1	753	1464,82	0
Cliente 10	0	0	746	1352,15	128	1000	1	753	1464,82	6
Cliente 7	0	0	746	1352,15	170	3000	1	753	1464,82	72

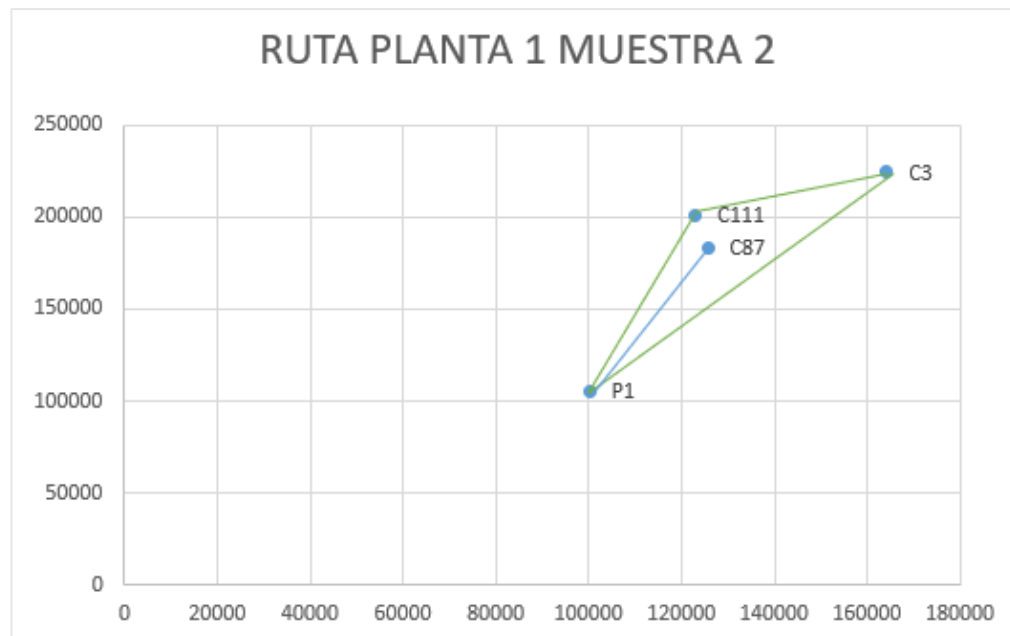
Fuente. Elaboración propia

Tabla 20 Rutas propuesta planta No. 1 muestra No. 2

RUTAS PLANTA NO. 1 MUESTRA NO. 2						
RUTA 1	NODOS		P1	C111	C3	P1
	DEMANDA	25800,00		6100	19700	
	RECORRIDO	272,24		131,213	6,307	134,725
RUTA 2	NODOS		P1	C87	P1	
	DEMANDA	26000,00		26.000,000		
	RECORRIDO	253,28		126,638	126,638	

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO	
	TZO-212 CAPACIDAD 28000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	92,14%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	KUN-462 CAPACIDAD 26400 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	98,48%

Figura 22 Gráfico ruta planta 1 Muestra No. 2



Fuente. Elaboración propia

Tabla 21 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 2

RUTAS PLANTA NO. 2 MUESTRA NO. 2								
RUTA 1	NODOS		P2	C7	C83	C97	P2	
	DEMANDA	41600,00		3000	12900	25700		
	RECORRIDO	373,53		71,575	121,135	147,249	33,573	
RUTA 2	NODOS	0,00	P2	C97	P2			
	DEMANDA	33000,00		33000				
	RECORRIDO	294,50		147,249	147,249			
RUTA 3	NODOS	0,00	P2	C97	C14	C10	C18	P2
	DEMANDA	20900,00		3400	10500	1.000,000	6000	
	RECORRIDO	477,74		147,249	147,249	5,893	91,322	86,024

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO	
	SXE-118 CAPACIDAD 41600 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	100,00%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	TJV-819 CAPACIDAD 33000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	100,00%
RUTA 3	CAMIÓN ASIGNADO	
	VCM-170 CAPACIDAD 28000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	74,64%

Figura 23 Gráfico ruta planta 1 Muestra No. 2



Fuente. Elaboración propia

Tabla 22 Costo rutas Muestra No. 2

TOTAL RECORRIDOS	DISTANCIA (KM)	COSTO (\$/KM)	TOTAL COSTO (\$)
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 1	525,52	1352,15	\$ 710.583
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 2	1145,77	1464,82	\$ 1.678.340
TOTAL			\$ 2.388.923

Fuente. Elaboración propia

Tabla 23 Fase 1 Muestra No.3

CAPACIDADES DE PLANTAS	
CAPACIDAD PLANTA 1	57500
CAPACIDAD PLANTA 2	97200

FUNCIÓN OBJETIVO	
\$	116.679.756,36

CANTIDADES A ENVIAR A CADA CLIENTE POR PLANTA										
PLANTA 1						PLANTA 2				
	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Unid	Costo / Km	Distancia (Km)	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Uni	Costo / Km	Distancia (Km)
Cliente 18	19000	1	746	1352,15	45	0	0	753	1464,82	86
Cliente 3	19800	1	746	1352,15	135	0	0	753	1464,82	23
Cliente 111	18500	1	746	1352,15	131	0	0	753	1464,82	17
Cliente 97	0	0	746	1352,15	151	34500	1	753	1464,82	34
Cliente 83	0	0	746	1352,15	291	61900	1	753	1464,82	181
Cliente 10	0	0	746	1352,15	128	800	1	753	1464,82	6

Fuente. Elaboración propia

Tabla 24 Rutas propuesta planta No. 1 muestra No. 3

RUTAS PLANTA NO. 1 MUESTRA NO. 3						
RUTA 1	NODOS		P1	C111	C3	P1
	DEMANDA	38000,00		18500	19500	
	RECORRIDO	271,51		131,213	5,575	134,725
RUTA 2	NODOS	0,00	P1	C3	C18	P1
	DEMANDA	19300,00		300,000	19.000,000	
	RECORRIDO	273,53		134,725	94,294	44,511

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO	
	WMX-022 CAPACIDAD 38000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	100,00%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	KUN-462 CAPACIDAD 26400 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	73,11%

Fuente. Elaboración propia

Figura 24 Gráfico ruta planta 1 Muestra No. 3



Fuente. Elaboración propia

Tabla 25 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 3

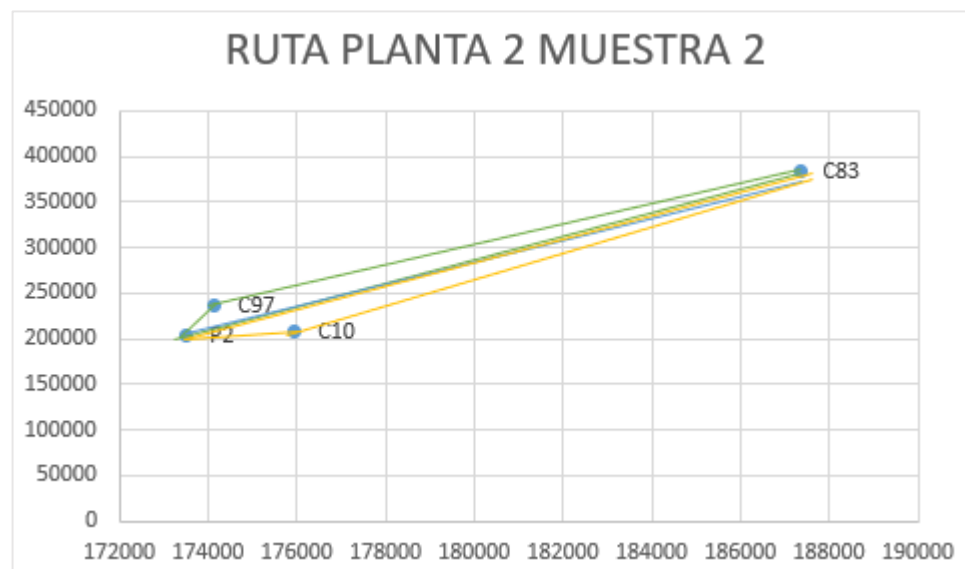
RUTAS PLANTA NO. 2 MUESTRA NO. 3						
RUTA 1	NODOS		P2	C97	C83	P2
	DEMANDA	41600,00		34500	7100	

	RECORRIDO	361,58		33,573	147,249	180,754
RUTA 2	NODOS	0,00	P2	C83	P2	
	DEMANDA	33000,00		33.000,000		
	RECORRIDO	361,51		180,754	180,754	
RUTA 3	NODOS	0,00	P2	C83	C10	P2
	DEMANDA	22600,00		21800	800	
	RECORRIDO	361,88		180,754	175,230	5,893

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO	
	SXE-118 CAPACIDAD 41600 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	100,00%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	TJV-819 CAPACIDAD 33000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	100,00%
RUTA 3	CAMIÓN ASIGNADO	
	VCM-170 CAPACIDAD 28000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	80,71%

Fuente. Elaboración propia

Figura 25 Gráfico ruta planta 2 Muestra No. 2



Fuente. Elaboración propia

Tabla 26 Costo rutas Muestra No. 3

TOTAL RECORRIDOS	DISTANCIA (KM)	COSTO (\$/KM)	TOTAL COSTO (\$)
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 1	545,04	1352,15	\$ 736.980
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 2	1084,96	1464,82	\$ 1.589.271
TOTAL			\$ 2.326.251

Fuente. Elaboración propia

Figura 26 Muestra No. 4

CAPACIDADES DE PLANTAS	
CAPACIDAD PLANTA 1	59000
CAPACIDAD PLANTA 2	95000

FUNCIÓN OBJETIVO	
\$	115.782.541,53

CANTIDADES A ENVIAR A CADA CLIENTE POR PLANTA										
PLANTA 1						PLANTA 2				
	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Unid	Costo / Km	Distancia (Km)	Cantidad a enviar	Planta asignada	Costo Uni	Costo / Km	Distancia (Km)
Cliente 102	35500	1	746	1352,15	106	0	0	753	1464,82	224
Cliente 17	20000	1	746	1352,15	224	0	0	753	1464,82	344
Cliente 31	3000	1	746	1352,15	257	0	0	753	1464,82	378
Cliente 35	0	0	746	1352,15	171	49900	1	753	1464,82	52
Cliente 83	0	0	746	1352,15	291	30900	1	753	1464,82	181
Cliente 14	0	0	746	1352,15	122	13500	1	753	1464,82	0

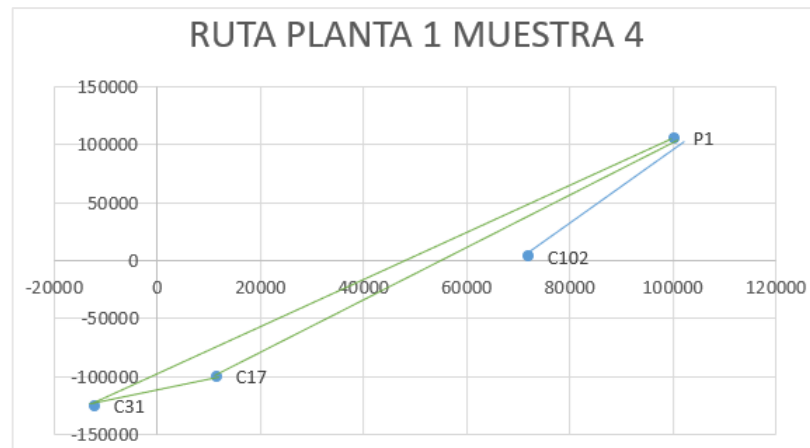
Fuente. Elaboración propia

Tabla 27 Rutas propuesta planta No. 1 muestra No. 4

RUTAS PLANTA NO. 1 MUESTRA NO. 4						
RUTA 1	NODOS		P1	C17	C31	P1
	DEMANDA	23000,00		20000	3000	
	RECORRIDO	515,53		223,878	34,756	256,892
RUTA 2	NODOS	0,00	P1	C102	P1	
	DEMANDA	35500,00		35.500,000		
	RECORRIDO	239,63		119,816	119,816	

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO	
	TZO-212 CAPACIDAD 28000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	82,14%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	WMX-022 CAPACIDAD 38000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	93,42%

Figura 27 Gráfico ruta planta 2 Muestra No. 2



Fuente. Elaboración propia

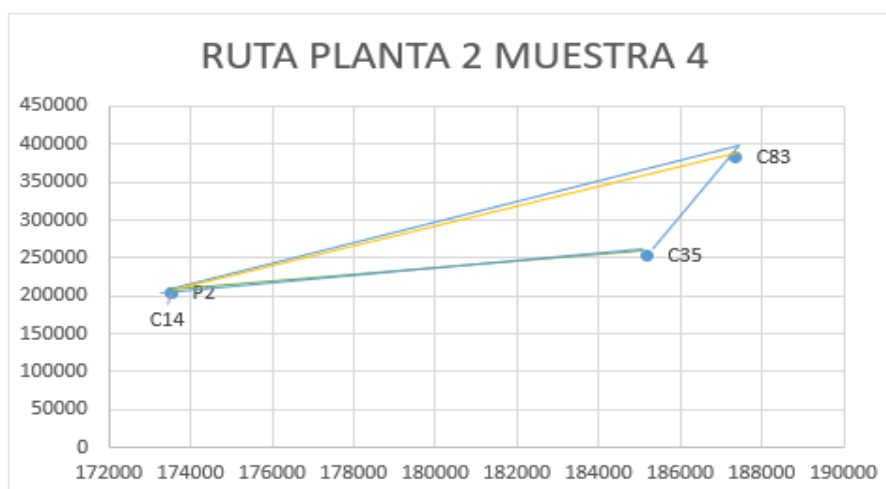
Tabla 28 Rutas propuesta planta No. 2 muestra No. 4

RUTAS PLANTA NO. 2 MUESTRA NO. 4						
RUTA 1	NODOS		P2	C35	P2	
	DEMANDA	41600,00		41600		
	RECORRIDO	103,16		51,578	51,578	
RUTA 2	NODOS	0,00	P2	C35	C83	P2
	DEMANDA	33000,00		8300	24700	
	RECORRIDO	362,33		51,578	129,997	180,754
RUTA 3	NODOS	0,00	P2	C83	C14	P2
	DEMANDA	19700,00		6200	13500	
	RECORRIDO	361,51		180,754	180,754	0,000

RUTA 1	CAMIÓN ASIGNADO
--------	-----------------

	SXE-118 CAPACIDAD 41600 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	148,57%
RUTA 2	CAMIÓN ASIGNADO	
	TJV-819 CAPACIDAD 33000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	86,84%
RUTA 3	CAMIÓN ASIGNADO	
	VCM-170 CAPACIDAD 28000 UNIDADES	
	TASA DE UTILIZACIÓN	70,36%

Figura 28 Gráfico ruta planta 2 Muestra No. 2



Fuente. Elaboración propia

Tabla 29 Costo rutas Muestra No. 3

TOTAL RECORRIDOS	DISTANCIA (KM)	COSTO (\$/KM)	TOTAL COSTO (\$)
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 1	755,16	1352,15	\$ 1.021.086
TOTAL RECORRIDO RUTAS PLANTA 2	826,99	1464,82	\$ 1.211.393
TOTAL			\$ 2.232.480

Fuente. Elaboración propia

Tras la realización del método de los ahorros y el establecimiento de las nuevas rutas se genera la Tabla No. 30 que consolida el costo de ruteo propuesto por

muestra y compara con los valores mencionados en el Capítulo 3 del presente documento.

Tabla 30 Costo asignación propuesta

MUESTRA	COSTO RUTEO ACTUAL (EMPÍRICO)	COSTO RUTEO MEJORA	% RED. COSTOS
Muestra 1	\$ 3.208.497	\$ 2.608.534	23%
Muestra 2	\$ 2.795.040	\$ 2.388.923	17%
Muestra 3	\$ 2.907.814	\$ 2.326.251	25%
Muestra 4	\$ 2.924.548	\$ 2.232.480	31%

Fuente. Elaboración propia

Como se evidencia en la tabla No. 30, con la implementación de la asignación planteada de clientes, se generarían reducciones en promedio del 24% en materia de costos por kilómetros requeridos, lo cual permite inferir que hasta el momento el planteamiento del modelo representa un cambio positivo para la empresa.

Otro aspecto a tener en consideración es la mejora en la utilización de los vehículos, debido a que el modelo permite la generación de la mejor combinación de vehículos y clientes, lo cual se corrobora con la mejora en la tasa de utilización de los vehículos los cuales en la mayoría de las rutas trabajan en un porcentaje superior al 90 por ciento. También es importante aclarar que una mejora en la asignación conlleva por tanto una mejora en el servicio en los clientes.

5.1. Consideraciones

Para la implementación del mismo en la organización se sugiere hacer una prueba para contrastar los valores teóricos con los reales, como también considerar el cansancio y desgaste de los conductores en la asignación de rutas. Como también, la inclusión de un factor de circuito puesto que este permite que los resultados de una ubicación diferente, como la mediana, sean más precisos, puesto que con este se considera empíricamente circunstancias como el terreno y las características de los caminos rurales que se pueden generar durante el desplazamiento de los vehículos (Schmitz Gonçalves et al., 2014).

El modelo como tal no responde a eventos inesperados, sin embargo, como se puede observar no se usó en ninguna de las rutas el total de vehículos con la que cuenta la empresa o tiene a su disposición, lo cual permite inferir que en caso de presentarse una falla mecánica o entre el mismo a mantenimiento se podría emplear cualquiera de las otras flotas. Por ejemplo, en la muestra no. 1 para la planta No. 1 se utilizaron dos vehículos de cinco disponibles.

CONCLUSIONES

Mediante la realización del presente documento se enuncio la situación actual de la empresa permitiendo extraer consideraciones o puntos a mejorar relacionados con su distribución de producto (aves Cobb Avian 48) por parte de la Agroavícola a cada uno de sus clientes. De este análisis se resalta que actualmente la empresa maneja un ruteo empírico o al azar que genera sobrecostos asociados a los kilómetros requeridos y la subutilización de la flota de vehículos, de tal forma, que debido a una mala planificación de las rutas de distribución de sus productos ha presentado incrementos en costos asociados a las distancias recorridas para el abastecimiento de los clientes hasta en un 31%.

Posteriormente permitió la consideración de un modelo matemático multi depósito de dos fases, que permitía primero asignar a los clientes a una de las plantas en estudio y luego analizar sus distancias mediante la implementación de una heurística como lo es el método de los ahorros, esto con el fin de minimizar distancias recorridas e indirectamente repercutir en los costos asociados.

Finalmente se ejecutó el modelo con el fin de corroborar su pertinencia, lo que permitió determinar que el método de ruteo fue más eficiente, debido a que se redujo los costos de transporte en un promedio del 24% en la etapa de asignación de plantas, o cual es un ahorro significativo para la organización. Como también se efectuó una minimización de distancia repercutiendo indirectamente en la reducción de costos de transporte y a su vez mejorando la tasa de utilización de la flota (de hasta el 100% de la capacidad).

Por último, en los modelos seleccionados para la solución del caso planteado, no se consideran aspectos como los impactos ambientales, sociales, el uso de infraestructura, la congestión, etc., lo que limita la aplicabilidad de los resultados.

Para focos de futuras investigaciones se plantea:

- Ejecución del modelo en tiempo real
- Establecer un nuevo banco de pruebas con el fin de seguir estudiando los efectos presentados en las interacciones por cada parámetro con el fin de obtener una conclusión más genérica relacionada con el ruteo en la organización.
- Aplicar otros métodos de ruteos que permitan la realización de una comparación con los resultados obtenidos, con el fin de generar un mejor aprovechamiento de los recursos y la minimización de los costos.
- Considerar aspectos relacionados a la congestión vehicular, para el establecimiento de rutas vehiculares.
- Realizar una modelación de la variabilidad de la demanda mediante función matemática

BIBLIOGRAFÍA

- Abdulkader, M. M. S., Gajpal, Y., & ElMekkawy, T. Y. (2018). Vehicle routing problem in omni-channel retailing distribution systems. *International Journal of Production Economics*, 196, 43–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.11.011>
- Albornoz, V., Oneto, F., & Sánchez, B. (2011). Localización de paraderos de detención y diseño óptimo de rutas en el transporte de personal. *Revista Chilena de Ingeniería*, 457–472. https://www.researchgate.net/publication/236260544_Localizacion_de_paraderos_de_detencion_y_diseno_optimo_de_rutas_en_el_transporte_de_personal
- Alvarez Hernandez, R. J. (2017). *Propuesta de solución al problema de ruteo de vehículos en el operador logístico Opperar S.A. para el transporte y distribución de productos alimenticios secos del grupo Nutresa S.A.* Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- Ballesteros Silva, P. P., & Escobar Zuluaga, A. (2016). Review of state of the art vehicle routing problem with pickup and delivery (VRPPD). *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 463–482. <https://doi.org/10.14482/inde.33.2.6368>
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro* (P. Educacion (ed.); Quinta).
- Bowersox, D. J., Closs, D. J., & Cooper, M. B. (2007). *Administración y logística en la cadena de suministro*.
- Castañeda Jiménez, J., & Cardona Arias, J. A. (2014). *Implementación del método del ahorro para resolver el VRP aplicado al diseño de una red de logística inversa para la recolección de aceite vehicular usado generado en los puntos de acopio ubicados en Pereira*. Universidad tecnológica de Pereira.
- Castro Zuluaga, C. A., Velez Gallego, M. C., & Catro Urrego, J. A. (2011).

Clasificación ABC Multicriterio: Tipos de Criterios y efectos en la asignación de pesos. <https://revistas.usantotomas.edu.co/index.php/iteckne/article/view/407>

Corona León, J. A. (2005). *Hiperheurísticas a través de Programación Genética para la Resolución de Problemas de Ruteo de Vehículos* [Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey]. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/567250>

Correa Mejía, D. A., Martínez Molina, L. Y., Ruiz Criollo, M. C., & Yepes Montoya, M. A. (2018). Los indicadores de costos: una herramienta para gestionar la generación de valor en las empresas industriales colombianas. *Estudios Gerenciales*, 190–199. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.147.2643>

Crevier, B., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2007). The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 756–773. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.08.015>

Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista EIA*, 12, 23–38.

Daza, J. M., Montoyra, J. R., & Narducci, F. (2010). Solving the capacitated vehicle routing problem using a twophase metaheuristic procedure. *Revista EIA*, 2012(598 CP), 445–448. <https://doi.org/10.1049/cp.2012.1012>

Eibl, P. (1996). *Computerized vehicle routing and scheduling in road transport*. Avebury.

Estrada Vélez, L. F. (2015). *Análisis de los costos logísticos en Colombia usando dinámica de sistemas*. Universidad de San Buenaventura.

Farahani, R., Rezapour, S., & Kardar, L. (2011). Logistics Operations and Management. In *Logistics Operations and Management*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67008-8>

- Geetha, S., Vanathi, P. T., & Poonthalir, G. (2012). Metaheuristic approach for the multi-depot vehicle routing problem. *Applied Artificial Intelligence*, 26(9), 878–901. <https://doi.org/10.1080/08839514.2012.727344>
- Golden, B., Raghavan, S., & Wasil, E. (2008). The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges. In *Operations Research/ Computer Science Interfaces Series* (Vol. 43). <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8>
- Gonzalez, E. C., Adarme Jaimes, W., & Orjuela Castro, J. A. (2015). Modelo matemático estocástico para el problema de ruteo de vehículos en la recolección de productos perecederos. *DYNA (Colombia)*, 82(189), 199–206. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.48549>
- Gonzalez Vargas, G., & Gonzalez Aristizabal, F. (2007). *Metaheurísticas aplicadas al ruteo de vehículos: Un caso de estudio. Parte 3: Genetic Clustering and Tabu Routing*. 106–113. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092007000200015&script=sci_abstract&tlng=es
- Hernández Ortiz, Y. A. (2016). *Diseño de un sistema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos en empresas de transporte de carga por carretera*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Herrera, O. J., & Alarcón, D. C. (2017). Modelo de ruteo del centro de acopio de la Asociación de Recicladores de Bogotá empleando el método heurístico Clarke & Wright y simulación de las rutas propuestas. *IAI*, 3, 180–188. <http://fundacioniai.org/actas>
- Huang, Y., Zhao, L., Van Woensel, T., & Gross, J. P. (2017). Time-dependent vehicle routing problem with path flexibility. *Transportation Research Part B: Methodological*, 95, 169–195. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.10.013>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2004). *Aspectos Prácticos de la Adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA SIRGAS como DATUM oficial de Colombia*.

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2019). *Tipos de coordenadas manejados en Colombia*.
- Jacobs Blecha, C., & Goetschalckx, M. (1992). The Vehicle Routing Problem With Backhauls: Properties and Solution Algorithms. *Georgia Tech Research Corporation*, 30332. <https://www2.isye.gatech.edu/~mgoetsch/cali/VEHICLE/VRPB/VRPB.HTM>
- Liu, R., Jiang, Z., & Geng, N. (2014). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. *OR Spectrum*, 36(2), 401–421. <https://doi.org/10.1007/s00291-012-0289-0>
- Madankumar, S., & Rajendran, C. (2018). Mathematical models for green vehicle routing problems with pickup and delivery: A case of semiconductor supply chain. *Computers and Operations Research*, 89, 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.03.013>
- Mohammed, M. A., Abd Ghani, M. K., Hamed, R. I., Mostafa, S. A., Ahmad, M. S., & Ibrahim, D. A. (2017). Solving vehicle routing problem by using improved genetic algorithm for optimal solution. *Journal of Computational Science*, 21, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.04.003>
- Mora García, L. A. (2008). *Indicadores de la gestión logística KPI: Clave de desempeño logístico* (Eco Editor (ed.)).
- Networking and Emerging Optimization. (2014). *Branch and Bound: Vehicle Routing Problem*. <http://neo.lcc.uma.es/vrp/solution-methods/branch-and-bound/>
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*. Universidad de la República, Montevideo.
- Pop, P. C., Fuksz, L., Marc, A. H., & Sabo, C. (2018). A novel two-level optimization approach for clustered vehicle routing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 115, 304–318. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.11.018>

- Porter, M. E. (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. Harvard Business Review.
- Restrepo, J. H., Medina V, P. D., & Cruz T, E. A. (2008). Un problema logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). *Scientia et Technica*, 39(3), 225. <https://doi.org/10.22517/23447214.9991>
- Rocha Medina, L. B., González La Rotta, 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*, 22(2), 35–55. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.ne02>
- Sánchez Galván, F., Garay Rondero, C. L., Mora Castellanos, C., Gibaja Romero, D. E., & Bautista Santos, H. (2017). Optimización de costos de transporte bajo el enfoque de teoría de juegos. Estudio de caso. *Nova Scientia*, 9(19), 185. <https://doi.org/10.21640/ns.v9i19.1051>
- Schmitz Gonçalves, D. N., De Moraes Gonçalves, C., Faria De Assis, T., & Da Silva, M. A. (2014). Analysis of the difference between the euclidean distance and the actual road distance in Brazil. *Transportation Research Procedia*, 3, 876–885. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.066>
- Secomandi, N. (2003). Analysis of a Rollout Approach to Sequencing Problems with Stochastic Routing Applications. *Journal of Heuristics*, 9(4), 321–352. <https://doi.org/10.1023/A:1025605803490>
- Segura Peñuela, Á. D., & Padua Dueñas, A. K. (2018). *Modelo para la solución de un problema de ruteo de vehículos con capacidad y ventanas de tiempo, en el servicio de transporte de canje y correo bancario*. Universidad Agustíniana.
- Soleimani, H., Chaharlang, Y., & Ghaderi, H. (2018). Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery considering sustainable and green criteria. *Journal of Cleaner Production*, 172, 960–970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.124>

- Stewart, W. R., & Golden, B. L. (1983). Stochastic vehicle routing: A comprehensive approach. *European Journal of Operational Research*, 14(4), 371–385. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90237-0](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90237-0)
- Tangarife Álvarez, A. F. (2017). Revisión del estado del arte del problema de ruteo abierto (OVRP). *Revista Universidad Tecnológica de Pereira*, T658.53 T164;6310000120194 F5370.
- Tansini, L., Urquhart, M. E., & Viera, O. (2002). Comparing assignment algorithms for the Multi-Depot VRP. *Journal of the Operational Research Society*, 53(9), 977–984. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601426>
- Toro Ocampo, Eliana M, Domínguez Castaño, A. H., & Escobar Zuluaga, A. H. (2016). Desempeño de las técnicas de agrupamiento para resolver el problema de ruteo con múltiples depósitos. *Scielo*, 22(44), 81–95. <https://doi.org/10.22430/22565337.999>
- Toro Ocampo, Eliana Mirledy, Franco Baquero, J. F., & Gallego Rendón, R. A. (2016). Modelo matemático para resolver el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad considerando flota propia y subcontratada. *Toro-Ocampo, E. M., Franco-Baquero, J. F., & Gallego-Rendón, R. A. (2016). Modelo Matemático Para Resolver El Problema de Localización y Ruteo Con Restricciones de Capacidad Considerando Flota Propia y Subcontratada. Ingeniería, Investigación y Tecnología, 17(3), 357–369. https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.006*
- Vallhonrat, J. M., Corominas, A., & Companys Pascual, R. (1991). *Localización, distribución en planta y manutención*. Marcombo.
- Wang, D., Chen, Q., & Lili. (2008). Stochastic vehicle routing problems and their solution algorithm. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, ICAL 2008*, 958–962. <https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636288>

Zhang, D., Cai, S., Ye, F., Si, Y. W., & Nguyen, T. T. (2017). A hybrid algorithm for a vehicle routing problem with realistic constraints. *Information Sciences*, 394–395, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.02.028>

ANEXOS

ANEXO 1. COORDENADAS PLANAS CARTESIANAS CLIENTES AGROAVÍCOLA

CIUDAD	CLIENTE	Coordenada norte (Y)	Coordenada Este (X)
PLANTA BOLO	Planta 1	105686,296	100206,985
PLANTA BARCELONA	Planta 2	203569,001	173514,891
AEROPUERTO	Cliente 1	113926,009	97358,739
AGUADAS	Cliente 2	316723,353	200014,562
ALCALÁ	Cliente 3	224201,971	164276,994
AMAIME	Cliente 4	119245,927	109307,484
ANDALUCÍA	Cliente 5	175983,636	121326,945
ANSERMANUEVO	Cliente 6	238316,095	140309,136
APIA	Cliente 7	269796,477	146368,561
ARABIA	Cliente 8	228101,925	171502,875
ARÁNZAZU	Cliente 9	282667,667	196382,711
ARMENIA	Cliente 10	208933,003	175956,002
BALBOA	Cliente 11	253855,031	144688,328
BARBACOAS	Cliente 12	-61663,127	-98689,909

BARBOSA	Ciente 13	333854,859	404081,074
BARCELONA	Ciente 14	203569,001	173514,891
BARRANCAS	Ciente 15	113356,990	113068,112
BELÉN DE UMBRÍA	Ciente 16	278748,561	154600,780
BUESACO	Ciente 17	-99858,235	11477,933
BUGA	Ciente 18	149764,755	106393,992
BUGALAGRANDE	Ciente 19	180228,300	122589,695
CAICEDONIA	Ciente 20	189252,991	158579,342
CAJIBÍO	Ciente 21	21391,124	76762,592
CALARCÁ	Ciente 22	207390,376	179660,485
CALI	Ciente 23	105918,477	80326,535
CALOTO	Ciente 24	61974,290	94677,479
CALUCE	Ciente 25	112153,394	119231,146
CANDELARIA	Ciente 26	100336,451	101208,566
CAPULÍ	Ciente 27	-101454,645	-12037,532
CARMELO	Ciente 28	99817,401	93537,995
CARTAGO	Ciente 29	232891,383	149337,705
CAUCASECO	Ciente 30	110173,951	88007,343
CEBADAL	Ciente 31	-125313,956	-12185,837
CELIA	Ciente 32	259742,320	139685,563
CERRITO	Ciente 33	127611,251	105412,919
CEVADAL	Ciente 34	-125273,211	-12095,096
CHINCHINÁ	Ciente 35	253814,977	185160,601
CIRCASIA	Ciente 36	216793,748	180515,396
COMBIA	Ciente 37	239882,449	166748,797
CONTADERO	Ciente 38	-144682,277	-32372,339
CÓRDOBA	Ciente 39	194377,675	174741,208
COSTA RICA	Ciente 40	133859,990	114148,100

CUBA	Cliente 41	275797,289	175377,834
DAGUA	Cliente 42	128448,969	63210,729
DELICIAS	Cliente 43	-90314,308	3977,416
DOS QUEBRADAS	Cliente 44	239137,032	176015,872
EL ÁGUILA	Cliente 45	250514,521	135294,793
EL CAPULÍ	Cliente 46	-101440,191	-11946,694
EL CONTADERO	Cliente 47	-144714,282	-32410,535
EL ESTRECHO	Cliente 48	-40715,102	15477,698
EL REMOLINO	Cliente 49	-68567,233	-7950,986
EL TAMBO	Cliente 50	-95277,310	-14792,068
EMPATE	Cliente 51	-76316,227	12578,524
ENVIGADO	Cliente 52	375302,593	185613,300
ESTRECHO	Cliente 53	-40712,818	15556,487
FLANDES	Cliente 54	175790,508	271925,335
FLORIDA	Cliente 55	89805,506	113915,313
FUNES	Cliente 56	-136344,041	-21179,648
GÉNOVA	Cliente 57	-74665,864	26710,862
GINEBRA	Cliente 58	131448,074	110368,885
GIRARDOT	Cliente 59	179509,486	270096,021
GORGONA	Cliente 60	98952,197	97121,729
GUACARÍ	Cliente 61	135883,402	103113,409
GUAYABAL DE SIQUIMA	Cliente 62	233242,450	310123,487
IBAGUÉ	Cliente 63	194481,171	227414,584
JAMUNDÍ	Cliente 64	86449,279	80052,294
KM 30	Cliente 65	119746,559	70594,948
LA CELIA	Cliente 66	259838,693	139253,066
LA CUMBRE	Cliente 67	126469,819	76747,787
LA DOLORES	Cliente 68	110118,037	86992,324

LA FLORIDA	Ciente 69	231475,470	182445,278
LA HONDA	Ciente 70	244182,649	163343,377
LA JOSEFINA	Ciente 71	15223,833	77714,993
LA PAILA	Ciente 72	190426,550	132019,035
LA TEBAIDA	Ciente 73	201556,790	163350,132
LA TUPIA	Ciente 74	98822,166	105588,600
LA UNIÓN	Ciente 75	-78034,605	14097,381
LA VICTORIA	Ciente 76	211053,208	136011,212
LA VIRGINIA	Ciente 77	246919,641	154249,384
LINARES	Ciente 78	-99906,616	-29503,021
LLORENTE	Ciente 79	-157063,719	916,857
MANIZALES	Ciente 80	262219,997	194362,748
MANZANARES	Ciente 81	277865,663	234470,793
MATITUY	Ciente 82	-99521,587	-8821,522
MEDELLÍN	Ciente 83	383793,474	187335,613
MOCOA	Ciente 84	-128250,241	67570,652
MOCONDINO	Ciente 85	-119659,756	2919,607
MOJARRAS	Ciente 86	-48471,850	6942,073
MONTENEGRO	Ciente 87	212857,140	167672,701
NARIÑO	Ciente 88	-107699,122	-11102,008
NEIRA	Ciente 89	272114,212	193204,100
OBANDO	Ciente 90	117009,157	95548,881
ORITO	Ciente 91	-175353,957	42672,414
OVERO	Ciente 92	183135,981	125631,853
PALMIRA	Ciente 93	112445,546	107291,207
PANOYA	Ciente 94	-78657,068	-10809,087
PASTO	Ciente 95	-116951,833	-2765,433
PAVAS	Ciente 96	129308,867	75073,345

PEREIRA	Cliente 97	237136,292	174151,896
PESCADOR	Cliente 98	39478,971	78625,491
PENSILVANIA	Cliente 99	290997,924	233422,726
PIENDAMO	Cliente 100	22866,017	81529,619
PILCUAN	Cliente 101	-133482,578	-23196,462
POPAYÁN	Cliente 102	3592,706	71924,406
PRADERA	Cliente 103	99805,819	112969,914
PUEBLO RICO	Cliente 104	282414,041	136533,639
PUEBLO TAPADO	Cliente 105	207624,811	163914,434
PUERTO ASIS	Cliente 106	-195854,570	84393,824
PUERTO TEJADA	Cliente 107	81182,547	93668,180
PUPIALES	Cliente 108	-147827,585	-42502,972
QUEBRADA NUEVA	Cliente 109	194688,050	145594,191
QUIBDÓ	Cliente 110	336708,887	67770,969
QUIMBAYA	Cliente 111	219019,380	166331,150
RESTREPO	Cliente 112	143593,308	82043,354
RIO FRIO	Cliente 113	175892,168	107996,412
RIOSUCIO	Cliente 114	299788,514	172734,239
RISARALDA	Cliente 115	274200,663	166153,333
ROLDANILLO	Cliente 116	200856,024	123047,186
ROSA FLORIDA	Cliente 117	-90233,267	17450,561
ROSAL DE MONTE	Cliente 118	-109351,994	9244,217
SALAMINA	Cliente 119	295899,083	196964,236
SALENTO	Cliente 120	218489,932	187736,926
SALÓNICA	Cliente 121	173624,534	98972,337
SAMANÁ	Cliente 122	292562,923	251736,816
SAN JAVIER	Cliente 123	211576,643	310142,042
SAN JOSÉ DE ALBAN	Cliente 124	-91064,522	20112,253

SAN PEDRO	Ciente 125	158635,026	114552,148
SANDONÁ	Ciente 126	-107319,335	-23703,066
SANTA ELENA	Ciente 127	124361,445	113020,104
SANTA ROSA	Ciente 128	243327,451	181487,238
SANTA ROSA DE SONSO	Ciente 129	139455,337	105949,594
SANTANDER	Ciente 130	60308,530	86156,910
SIBUNDOY	Ciente 131	-120601,110	37363,739
SUPIA	Ciente 132	302806,405	178765,811
TAMBO	Ciente 133	6090,119	49815,180
TANGUA	Ciente 134	-127278,272	-15150,726
TIMBÍO	Ciente 135	-5185,600	64116,809
TORO	Ciente 136	220230,051	131197,569
TRES ESQUINAS	Ciente 137	167812,213	120269,554
TRUJILLO	Ciente 138	181660,626	104643,281
TULUÁ	Ciente 139	168033,594	118724,913
TUMACO	Ciente 140	-43402,358	-170497,255
ULLOA	Ciente 141	226614,591	169068,591
VILLA GARZÓN	Ciente 142	-140958,281	71405,294
VILLAMARÍA	Ciente 143	259379,986	193954,297
VILLAMARÍA	Ciente 144	259595,453	194217,506
VISTA HERMOSA	Ciente 145	107084,793	77051,293
VITERBO	Ciente 146	264459,338	154168,906
YAN ALA	Ciente 147	-148181,442	-34588,208
YUMBO	Ciente 148	114941,193	85069,169
ZARAGOZA	Ciente 149	227747,737	148198,361
ZARZAL	Ciente 150	198163,312	131954,933
EL BORDO	Ciente 151	-26485,484	30561,455
ANSERMA	Ciente 152	282270,000	164180,130

PADILLA	Cliente 153	80702,093	105194,202
BOLO SAN ISIDRO	Cliente 154	105686,296	100206,985
ARGELIA	Cliente 155	232656,674	126140,314
BELALCÁZAR	Cliente 156	257162,288	160888,404
MIRANDA	Cliente 157	82620,716	114576,706
PIJAO	Cliente 158	188659,154	173106,279
MARSELLA	Cliente 159	250602,753	169062,624
AGUACATAL	Cliente 160	106720,574	77874,050

Anexo 1 Coordenadas cartesianas clientes y plantas

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 2. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 1

	Planta 1	Planta 2	Ciente 1	Ciente 2	Ciente 3	Ciente 12	Ciente 14	Ciente 151	Ciente 17	Ciente 29	Ciente 39	Ciente 71	Ciente 80	Ciente 81
Planta 1	0	122	9	233	135	260	122	149	224	136	116	93	183	218
Planta 2	122	0	118	116	23	380	0	271	344	38	9	211	62	96
Ciente 1	9	118	0	227	129	263	118	155	230	130	112	101	177	214
Ciente 2	233	116	227	0	99	482	116	383	457	98	125	325	55	52
Ciente 3	135	23	129	99	0	388	23	284	358	17	32	226	48	88
Ciente 12	260	380	263	482	388	0	380	134	117	385	375	192	437	476
Ciente 14	122	0	118	116	23	380	0	271	344	38	9	211	62	96
Ciente 151	149	271	155	383	284	134	271	0	76	285	264	63	332	366
Ciente 17	224	344	230	457	358	117	344	76	0	360	336	133	406	439
Ciente 29	136	38	130	98	17	385	38	285	360	0	46	229	54	96
Ciente 39	116	9	112	125	32	375	9	264	336	46	0	204	71	103
Ciente 71	93	211	101	325	226	192	211	63	133	229	204	0	273	306
Ciente 80	183	62	177	55	48	437	62	332	406	54	71	273	0	43
Ciente 81	218	96	214	52	88	476	96	366	439	96	103	306	43	0
Ciente 82	232	354	238	466	367	98	354	83	20	368	347	144	415	449
Ciente 83	291	181	284	68	161	529	181	439	515	156	190	385	122	116
Ciente 86	180	302	186	413	315	106	302	32	52	315	295	95	363	398
Ciente 88	241	362	247	474	375	99	362	91	24	376	355	152	423	457
Ciente 99	228	106	223	42	96	484	106	377	449	102	113	317	49	13
Ciente 97	151	34	145	84	16	405	34	300	374	25	43	242	32	73
Ciente 98	70	190	77	303	204	204	190	82	155	206	182	24	251	285
Ciente 102	106	224	113	338	239	183	224	51	120	242	217	13	286	319
Ciente 110	233	170	225	134	148	432	170	365	440	132	178	322	147	177
Ciente 119	213	95	207	21	79	464	95	363	437	79	104	305	34	42
Ciente 124	212	332	219	446	347	122	332	65	12	349	325	121	394	427
Ciente 126	246	368	252	479	381	88	368	97	36	382	361	159	429	464
Ciente 133	112	233	118	345	246	163	233	38	113	248	226	29	294	329

Ciente 82	Ciente 83	Ciente 86	Ciente 88	Ciente 99	Ciente 97	Ciente 98	Ciente 102	Ciente 110	Ciente 119	Ciente 124	Ciente 126	Ciente 133
232	291	180	241	228	151	70	106	233	213	212	246	112
354	181	302	362	106	34	190	224	170	95	332	368	233
238	284	186	247	223	145	77	113	225	207	219	252	118
466	68	413	474	42	84	303	338	134	21	446	479	345
367	161	315	375	96	16	204	239	148	79	347	381	246
98	529	106	99	484	405	204	183	432	464	122	88	163
354	181	302	362	106	34	190	224	170	95	332	368	233
83	439	32	91	377	300	82	51	365	363	65	97	38
20	515	52	24	449	374	155	120	440	437	12	36	113
368	156	315	376	102	25	206	242	132	79	349	382	248
347	190	295	355	113	43	182	217	178	104	325	361	226
144	385	95	152	317	242	24	13	322	305	121	159	29
415	122	363	423	49	32	251	286	147	34	394	429	294
449	116	398	457	13	73	285	319	177	42	427	464	329
0	522	53	8	460	383	164	131	443	446	30	17	121
522	0	468	530	104	147	361	397	129	88	503	535	402
53	468	0	62	408	331	113	83	390	393	45	66	69
8	530	62	0	468	391	172	139	451	454	35	13	129
460	104	408	468	0	80	295	330	172	37	438	474	339
383	147	331	391	80	0	220	255	146	63	363	397	262
164	361	113	172	295	220	0	37	297	282	143	179	44
131	397	83	139	330	255	37	0	333	318	108	146	22
443	129	390	451	172	146	297	333	0	135	430	453	331
446	88	393	454	37	63	282	318	135	0	425	460	325
30	503	45	35	438	363	143	108	430	425	0	47	102
17	535	66	13	474	397	179	146	453	460	47	0	135
121	402	69	129	339	262	44	22	331	325	102	135	0

Anexo 2 Matriz distancia Muestra No. 1

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 3. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 2

	Planta 1	Planta 2	Ciente 87	Ciente 18	Ciente 3	Ciente 97	Ciente 111	Ciente 83	Ciente 14	Ciente 10	Ciente 7
Planta 1	0	122	127	45	135	151	131	291	122	128	170
Planta 2	122	0	11	86	23	34	17	181	0	6	72
Ciente 87	127	11	0	88	12	25	6	172	11	9	61
Ciente 18	45	86	88	0	94	111	92	248	86	91	127
Ciente 3	135	23	12	94	0	16	6	161	23	19	49
Ciente 97	151	34	25	111	16	0	20	147	34	28	43
Ciente 111	131	17	6	92	6	20	0	166	17	14	55
Ciente 83	291	181	172	248	161	147	166	0	181	175	121
Ciente 14	122	0	11	86	23	34	17	181	0	6	72
Ciente 10	128	6	9	91	19	28	14	175	6	0	68
Ciente 7	170	72	61	127	49	43	55	121	72	68	0

Anexo 3 Matriz distancia Muestra No. 2

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 4. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 3

	Planta 1	Planta 2	Cliente 18	Cliente 3	Cliente 111	Cliente 97	Cliente 83	Cliente 10
Planta 1	0	122	45	135	131	151	291	128
Planta 2	122	0	86	23	17	34	181	6
Cliente 18	45	86	0	94	92	111	248	91
Cliente 3	135	23	94	0	6	16	161	19
Cliente 111	131	17	92	6	0	20	166	14
Cliente 97	151	34	111	16	20	0	147	28
Cliente 83	291	181	248	161	166	147	0	175
Cliente 10	128	6	91	19	14	28	175	0

Anexo 4 Matriz distancia Muestra No. 3

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 5. MATRIZ DISTANCIA MUESTRA No. 4

	Planta 1	Planta 2	Ciente 102	Ciente 17	Ciente 31	Ciente 35	Ciente 83	Ciente 14
Planta 1	0	122	106	224	257	171	291	122
Planta 2	122	0	224	344	378	52	181	0
Ciente 102	106	224	0	120	154	275	397	224
Ciente 17	224	344	120	0	35	394	515	344
Ciente 31	257	378	154	35	0	427	547	378
Ciente 35	171	52	275	394	427	0	130	52
Ciente 83	291	181	397	515	547	130	0	181
Ciente 14	122	0	224	344	378	52	181	0

Anexo 5 Matriz distancia Muestra No. 4

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 6. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 1

MATRIZ DE LOS AHORROS DESDE LA PLANTA 1																	
	Planta 1	Ciente 1	Ciente 12	Ciente 151	Ciente 17	Ciente 71	Ciente 82	Ciente 83	Ciente 86	Ciente 88	Ciente 98	Ciente 102	Ciente 110	Ciente 119	Ciente 124	Ciente 126	Ciente 133
Planta 1		8,718	259,934	149,398	223,878	93,217	232,374	291,436	180,175	240,672	69,636	105,939	233,289	213,408	212,429	246,425	111,619
Ciente 1			263,186	155,490	230,389	100,638	238,399	284,472	185,872	246,742	76,768	113,227	224,739	207,450	219,062	252,201	117,851
Ciente 12		5,467		133,953	116,601	192,433	97,517	529,379	106,452	98,949	204,133	182,668	431,752	463,963	122,386	87,792	163,231
Ciente 151		2,626	275,380		75,814	62,953	82,978	439,212	32,269	91,277	81,618	51,143	365,095	362,797	65,419	97,359	37,840
Ciente 17		2,207	367,211	297,463		132,783	20,302	514,631	51,586	23,903	154,673	119,816	440,182	437,069	12,324	35,963	112,671
Ciente 71		1,297	160,718	179,662	184,312		143,719	384,526	95,215	151,653	24,272	12,993	321,639	304,957	120,894	159,067	29,357
Ciente 82		2,693	394,791	298,794	435,949	181,872		521,604	53,428	8,490	164,220	130,967	442,903	445,764	30,144	16,801	120,798
Ciente 83		15,682	21,991	1,623	0,683	0,127	2,205		468,396	530,040	361,068	397,332	128,502	88,420	503,442	534,536	401,960
Ciente 86		3,022	333,657	297,305	352,467	178,177	359,121	3,215		61,915	113,463	83,267	389,954	393,319	44,582	66,349	69,391
Ciente 88		2,649	401,657	298,793	440,648	182,236	464,556	2,068	358,932		172,373	138,850	451,353	454,074	35,370	12,607	129,069
Ciente 98		1,586	125,437	137,417	138,841	138,580	137,790	0,004	136,348	137,935		36,507	297,428	282,410	143,057	178,944	44,100
Ciente 102		1,430	183,205	204,194	210,001	186,163	207,345	0,043	202,847	207,761	139,068		333,142	317,928	107,910	146,445	22,250
Ciente 110		17,268	61,471	17,591	16,985	4,866	22,759	396,223	23,509	22,608	5,496	6,085		135,486	430,420	453,353	331,106
Ciente 119		14,676	9,379	0,009	0,217	1,667	0,018	416,424	0,264	0,006	0,634	1,419	311,211		425,461	459,651	325,026
Ciente 124		2,085	349,977	296,408	423,983	184,752	414,658	0,423	348,022	417,731	139,008	210,458	15,297	0,375		46,733	101,594
Ciente 126		2,942	418,566	298,464	434,339	180,574	461,997	3,324	360,251	474,490	137,117	205,918	26,361	0,181	412,120		135,154
Ciente 133		2,485	208,322	223,177	222,826	175,479	223,195	1,095	222,403	223,221	137,154	195,308	13,801	0,000	222,454	222,889	

Anexo 6 Matriz de los ahorros Muestra No. 1 Planta 1

Fuente. Elaboración propia

MATRIZ DE LOS AHORROS DESDE LA PLANTA 2										
	Planta 2	Ciente 2	Ciente 3	Ciente 14	Ciente 29	Ciente 39	Ciente 80	Ciente 81	Ciente 99	Ciente 97
Planta 2		116,216	22,607	0,000	38,004	9,273	62,246	96,102	105,985	33,573
Ciente 2			99,184	116,216	97,959	124,929	54,796	51,934	42,165	83,684
Ciente 3		39,639		22,607	17,283	31,607	48,482	88,357	96,140	16,273
Ciente 14		0,000	0,000		38,004	9,273	62,246	96,102	105,985	33,573
Ciente 29		56,261	43,328	0,000		46,137	53,735	96,283	102,209	25,175
Ciente 39		0,560	0,273	0,000	1,140		70,623	102,654	113,044	42,763
Ciente 80		123,666	36,370	0,000	46,516	0,896		43,052	48,517	32,213
Ciente 81		160,384	30,352	0,000	37,824	2,721	115,297		13,174	72,782
Ciente 99		180,035	32,452	0,000	41,780	2,213	119,714	188,913		80,088
Ciente 97		66,105	39,907	0,000	46,403	0,083	63,607	56,893	59,470	

Anexo 7 Matriz de los ahorros Muestra No. 1 Planta 2

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 7. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 2

MATRIZ DE LOS AHORROS PLANTA No. 1				
	Planta 1	Ciente 87	Ciente 3	Ciente 111
Planta 1		126,638	134,725	131,213
Ciente 87			11,842	6,307
Ciente 3		249,521		5,575
Ciente 111		251,544	260,363	

Anexo 8 Matriz de los ahorros Muestra No. 2 Planta 1

Fuente. Elaboración propia

MATRIZ DE LOS AHORROS DESDE LA PLANTA 2							
	Planta 2	Ciente 18	Ciente 97	Ciente 83	Ciente 14	Ciente 10	Ciente 7
Planta 2		86,024	33,573	180,754	0,000	5,893	71,575
Ciente 18			110,566	247,631	86,024	91,322	126,513
Ciente 97		9,031		147,249	33,573	28,261	42,879
Ciente 83		19,147	67,078		180,754	175,230	121,135
Ciente 14		0,000	0,000	0,000		5,893	71,575
Ciente 10		0,595	11,206	11,417	0,000		67,674
Ciente 7		31,086	62,270	131,194	0,000	9,794	

Anexo 9 Matriz de los ahorros Muestra No. 2 Planta 2

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 8. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 3

MATRIZ DE LOS AHORROS DESDE LA PLANTA 1				
	Planta 1	Cliente 18	Cliente 3	Cliente 111
Planta 1		44,511	134,725	131,213
Cliente 18			94,294	91,590
Cliente 3		84,942		5,575
Cliente 111		84,134	260,363	

Anexo 10 Matriz de los ahorros Muestra No. 3 Planta 1

Fuente. Elaboración propia

MATRIZ DE LOS AHORROS DESDE LA PLANTA 2				
	Planta 2	Cliente 97	Cliente 83	Cliente 10
Planta 2		33,573	180,754	5,893
Cliente 97			147,249	28,261
Cliente 83		67,078		175,230
Cliente 10		11,206	11,417	

Anexo 11 Matriz de los ahorros Muestra No. 3 Planta 2

Fuente. Elaboración propia

ANEXO 9. MATRICES DE LOS AHORROS MUESTRA No. 4

MATRIZ DE LOS AHORROS DESDE LA PLANTA 1				
	Planta 1	Cliente 102	Cliente 17	Cliente 31
Planta 1		105,939	223,878	256,892
Cliente 102			119,816	153,920
Cliente 17		210,001		34,756
Cliente 31		208,910	446,014	

Anexo 12 Matriz de los ahorros Muestra No. 4 Planta 1

Fuente. Elaboración propia

MATRIZ DE LOS AHORROS DESDE LA PLANTA 2				
	Planta 2	Cliente 35	Cliente 83	Cliente 14
Planta 2		51,578	180,754	0,000
Cliente 35			129,997	51,578
Cliente 83		102,335		180,754
Cliente 14		0,000	0,000	

Anexo 13 Matriz de los ahorros Muestra No. 4 Planta 2

Fuente. Elaboración propia

