



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS  
INGENIERÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE**

***“Propuesta de optimización de costos para una empresa  
distribuidora de productos de consumo masivo”***

**INFORME DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN  
(Dentro de una materia de la malla)**

**Previo a la obtención del título de:  
Ingeniera en Logística y Transporte**

**Presentado por:  
Borbor Chicaiza Lisseth María  
Oviedo Panta Estefania Elizabeth**

**Guayaquil – Ecuador**

**2015**

# AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme salud y sabiduría para poder culminar mis metas. A mi padre Ufredo Borbor, por su cariño a pesar de nuestras diferencias de opiniones. Al Ingeniero Guillermo Baquerizo por su tiempo, dedicación y experiencia en cada una de sus clases, quien hizo posible la culminación este proyecto. A Juan José Parra por ser mi compañero y amigo incondicional, que forma parte muy importante en mi vida, por haberme apoyado en las buenas y en las malas, por ese gran amor que ha inspirado para la culminación de mi carrera. A mis compañeros con quien he compartidos memorables momentos en mi vida universitaria que siempre voy a recordar y el apoyo cuando más necesitaba de ellos y finalmente a Estefania Oviedo por ser una excelente compañera de tesis y amiga, por compartir este sueño alcanzado.

Liseth María Borbor Chicaiza.

A Dios, por bendecirme y guiar siempre mis pasos. A mis padres por su amor y su aliento en cada meta que me he propuesto. Al Ingeniero Guillermo Baquerizo por la ayuda brindada para terminar este proyecto. Finalmente a mis amigas Sonia y Liseth, mi compañero incondicional y parte importante de mi vida Gabriel, por brindarme su apoyo, ánimo y colaboración en cada momento y sobre todo cuando más necesitaba de ellos.

Estefania Elizabeth Oviedo Panta

# DEDICATORIAS

Dedico este proyecto a mi madre María Mercedes Chicaiza Espín, por ser el pilar más importante de mi vida, por darme su amor, apoyo incondicional, y sus consejos que me han enseñado a desenvolverme como madre e hija, siguiendo adelante y cumpliendo todas mis metas que me he propuesto. A mi hijo Christopher, por ser la luz de mi vida, mi inspiración y el motivo de mis luchas diarias. A tí te dedico el resultado de mis desvelos y sacrificios como un ejemplo de superación para que te sirva tanto en lo personal y profesionalmente.

Lisseth María Borbor Chicaiza

Dedico este proyecto a mis padres Carlos Oviedo y Delia Panta por ser una fuente de apoyo constante e incondicional en mi vida. A mi hermano y demás familiares por el apoyo que siempre me brindaron en el transcurso de mi vida universitaria.

Estefania Elizabeth Oviedo Panta

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

Máster Guillermo Baquerizo Palma

DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

(Dentro de una materia de la malla)



---

Máster José Villa Vásquez

DELEGADO

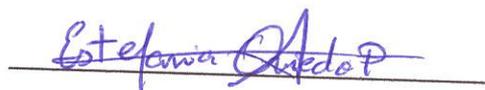
# DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Informe del Proyecto de Graduación (dentro de una materia de la malla), nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Borbor Chicaiza Lisseth María



Oviedo Panta Estefanía Elizabeth

# RESUMEN

En el presente proyecto se considera una empresa distribuidora de productos de consumo masivo en Guayaquil. Actualmente, se utiliza un modelo empírico de distribución de productos que ha generado un inmenso problema a sus clientes, conllevando a un bajo nivel de servicio y al mismo tiempo generando altos costos operativos.

El objetivo principal de este proyecto es la planificación y diseño de rutas con la finalidad de optimizar los costos de distribución, minimizar las distancias totales recorridas, cumplir las ventanas horarias del cliente, disminuir las devoluciones de mercaderías y aumentar el nivel de servicio.

Luego del análisis se plantea la utilización de la heurística de Clarke & Wright para la creación de rutas que será una solución inicial para posteriormente incorporarlas en la metaheurística de Recocido Simulado, para poder reducir los costos de distribución y cumplir con los requerimientos de los clientes.

Con los resultados previamente obtenidos se reducirá el porcentaje de utilización de los recursos de la empresa, el tiempo de entrega y las devoluciones de los productos, todo esto conllevará a aumentar el nivel de servicio del cliente.

# ABSTRACT

In this project, we consider a company that distributes products for mass consumption in Guayaquil. Nowadays, they are using an empirical model of distribution that has generated an immense problem to their clients carrying to a low level of service and at the same time generating high operative costs.

The main objectives of this project is the planning and design of routes with the purpose of optimizing the distribution costs, minimize the total crossed distances, fulfill the hourly windows of the client, reduce the returns of goods and increase the level of service.

After the analysis there appears the utilization of the Clarke & Wright heuristic for the creation of routes that are an initial solution to later incorporate them in the Simulated Annealing metaheuristic to be able to reduce the distribution costs and expire with the requirements of the clients.

With the before obtained results there will reduce the percentage of utilization of the resources of the company, the time of delivery and customer returns, all that will carry to increase the level of service of the client

# TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS .....	I
DEDICATORIAS .....	II
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN .....	III
DECLARACIÓN EXPRESA .....	IV
RESUMEN .....	V
ABSTRACT .....	VI
TABLA DE CONTENIDO .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE ALGORITMOS .....	XII
ABREVIATURAS .....	XIII
GLOSARIO DE TÉRMINOS .....	XV
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1	
ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Planteamiento del problema .....	4
1.3 Justificación del problema .....	6
1.4 Hipótesis .....	7
1.5 Objetivos .....	7
1.5.1 Objetivo general .....	7
1.5.2 Objetivos específicos .....	7
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO .....	8
2.1 Estado del arte .....	8
2.2 Marco conceptual .....	9
2.3 Redes de distribución .....	11

2.4	Modelos de distribución física y transporte .....	11
2.5	El problema de Ruteo Vehicular (VRP).....	12
2.5.1	Componentes de un problema de Ruteo de Vehicular .....	13
2.5.2	Variantes del VRP .....	14
2.6	Problema de Ruteo Vehicular con Ventanas de tiempo VRPTW.....	15
2.6.1	Formulación del Problema de Ruteo Vehicular con ventanas de Tiempo (VRPTW).....	16
2.7	Heurísticas para resolver el VRPTW .....	19
2.7.1	Heurística de Clarke & Wright .....	20
2.8	Metaheurística .....	21
2.8.1	Recocido Simulado .....	23
2.9	Modelo tarifario .....	28
2.9.1	Parámetros del modelo .....	29
2.9.2	Parámetros de la ruta .....	29
2.9.3	Costos fijos.....	30
2.9.4	Costos variables.....	30
CAPÍTULO 3		
METODOLOGÍA DE TRABAJO .....		31
3.1	Organigrama estructural de la empresa.....	33
3.1.1	Gerente General.....	33
3.1.2	Gerente de Recursos Humanos .....	34
3.1.3	Gerente Administrativa .....	34
3.1.4	Gerente de Venta .....	35
3.1.5	Supervisor de Ventas .....	35
3.1.6	Supervisor de Impulsadoras.....	36
3.1.7	Vendedores .....	36
3.1.8	Gerente Logística .....	36
3.1.9	Jefe de Distribución.....	37
3.2	Flujo de la cadena de suministro de la empresa.....	37
3.2.1	Componentes .....	39
3.3	Cronograma de actividades .....	41

## CAPÍTULO 4

PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN.....	42
4.1  Obtención de los datos .....	42
4.1.1  Coordenada de los clientes.....	43
4.1.2  Cálculo de las distancias.....	45
4.1.3  Demanda y ventana de tiempo .....	46
4.2  Modelo tarifario de transporte.....	48
4.3  Heurística de Clarke & Wright.....	51
4.4  Recocido Simulado.....	51

## CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	54
5.1  Resultados del modelo tarifario de transporte .....	54
5.2  Resultados de la heurística y metaheurística .....	56

## CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
6.1  Conclusiones .....	71
6.2  Recomendaciones .....	73
6.3  Trabajos futuros.....	74
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXOS.....	77
ANEXO 1 UBICACIÓN CLIENTES EN GOOGLE MAPS .....	78

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 SECTOR NORTE DONDE SE ENCUENTRAN UBICADOS LOS CLIENTES. ....	3
FIGURA 1.2 CAMIONES DE LA EMPRESA .....	4
FIGURA 1.3 DEVOLUCIÓN DE MERCADERÍA.....	5
FIGURA 2.1 RUTAS GENERADAS POR LOS VRP .....	10
FIGURA 2.2 HEURÍSTICA DE CLARKE & WRIGHT .....	20
FIGURA 3.1 METODOLOGÍA A SEGUIR .....	32
FIGURA 3.2 ORGANIGRAMA ESTRUCTURAL DE LA EMPRESA.....	33
FIGURA 3.3 FLUJO DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LA EMPRESA.....	38
FIGURA 3.4 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES .....	41
FIGURA 4.1 DISTANCIA ENTRE $P1$ Y $P2$ POR LA MÉTRICA DE MANHATTAN.....	45
FIGURA 5.1 GRAFICA ECUACIÓN DE DISTRIBUCIÓN .....	56
FIGURA 5.2 COMPARACIÓN PORCENTUAL DE COSTOS DEL MES DE NOVIEMBRE Y DICIEMBRE.....	70

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1 COORDENADAS DE LOS CLIENTES. ....	44
TABLA 4.2 DEMANDA Y VENTANA DE TIEMPO DE LOS CLIENTES .....	47
TABLA 4.3 MODELO TARIFARIO DE TRANSPORTE .....	48
TABLA 5.1 RESULTADO MODELO TARIFARIO DE TRANSPORTE.....	55
TABLA 5.2 COSTO FIJO Y VARIABLE DEL MODELO TARIFARIO DE TRANSPORTE.....	55
TABLA 5.3 RUTAS GENERADAS POR LA HEURÍSTICA DE CLARKE & WRIGHT.....	57
TABLA 5.4 ANÁLISIS DE COSTOS .....	57
TABLA 5.5 RESULTADOS DEL RECOCIDO SIMULADO .....	58
TABLA 5.6 DEVOLUCIONES DEL MES DE NOVIEMBRE Y DICIEMBRE .....	69

# ÍNDICE DE ALGORITMOS

ALGORITMO 1 CLARKE & WRIGHT .....	21
ALGORITMO 2 RECOCIDO SIMULADO .....	25
ALGORITMO 3 CLARKE & WRIGHT .....	51
ALGORITMO 4 RECOCIDO SIMULADO (ALGORITMO GENERAL).....	53

# ABREVIATURAS

<b>CEDI</b>	Centro de Distribución.
<b>CVRP</b>	Capacitated VRP. Problema de ruteo vehicular capacitado.
<b>GRASP</b>	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure. Procedimiento glotón de búsqueda aleatoria.
<b>MDVRP</b>	Multiple Depot VRP. Problema de ruteo vehicular con múltiples depósitos.
<b>PVRP</b>	Periodic VRP. Problema de ruteo vehicular con periodo.
<b>SA</b>	Simulated Annealing. Recocido simulado.
<b>SCM</b>	Supply Chain Management. Gestión de la cadena de suministro.
<b>SDVRP</b>	Split Delivery VRP. Problema de ruteo vehicular de entrega fraccionaria.
<b>SVRP</b>	Stochastic VRP. Problema de ruteo vehicular estocástico
<b>TSP</b>	Traveling Salesman Problem. Problema de agente viajero.
<b>VRP</b>	Vehicle Routing Problem. Problema de ruteo vehicular.
<b>VRPPD</b>	Vehicle Routing Problem with Pick-up and Deliveries. Problema de ruteo vehicular recolección y despachos.

**VRPTW** Vehicle Routing Problem with Time Windows. Problema de ruteo vehicular con ventana de tiempo.

# GLOSARIO DE TÉRMINOS

## A

**Algoritmo Genético Híbrido:** Es un algoritmo genético modificado que se realiza una propuesta híbrida, en donde la etapa de mutación se lleva a cabo mediante una estrategia de enfriamiento simulado.

## C

**Clarke & Wright:** Es un algoritmo de ahorros, se trata de una heurística constructiva basado en la creación de rutas iniciales formadas por un único cliente y mezcla de éstas por medio del criterio de ahorro para reducir su número y aumentar la cantidad de clientes que se visitan en cada ruta.

## F

**Fisher & Jaikumar:** Se trata de uno de los algoritmos más recurrentes que pertenece a los métodos de dos fases bajo la secuencia de cluster first – route second. Este algoritmo resuelve en primera instancia el problema genérico de

asignación de los clientes a una serie de nodos semilla previamente seleccionados.

## H

### **Híbrido:**

El término híbrido tiene su origen latín. Proviene de hybrida, hace referencia a todo aquello que sea el resultado de la mezcla de dos o más elementos de diferente naturaleza o tipo.

## P

### **Picking:**

Recolección de productos.

## T

### **3PL:**

Es un acrónimo para “Third Party Logistics” (logística tercerizada). Significa contratar a una empresa especializada para realizar la logística de su negocio, permitiéndole concentrarse en las actividades claves de su empresa.

### **2opt:**

Es una heurística que permite mejorar borrando dos arcos, dando la “vuelta” a uno de los caminos resultantes y luego

reconectándolos hasta que no pueda obtener ninguna mejora adicional.

# INTRODUCCIÓN

La planificación de rutas es uno de los principales problemas que tienen las empresas distribuidoras de productos de consumo masivo en Guayaquil, ya que en la vida actual existen cambios constantes que requieren una planificación que permita asimilar estos cambios para poder optimizar los costos operativos de transportes, que es uno de los objetivos principales en este proyecto de titulación.

El problema de ruteo vehicular es un problema de optimización combinatoria que consiste en atender a una serie de clientes para lo cual se cuenta con una flota de vehículos que parten desde un deposito central, el problema consiste en asignar a cada vehículo una ruta de clientes, de manera que se minimice el costo de transporte.

Un factor importante que es necesario considerar en los problemas de ruteo vehicular son las restricciones que deben satisfacer las rutas, están ligadas a los servicios que ofrece la empresa, así como también a los requerimientos de los clientes.

Si al problema de ruteo vehicular le añadimos restricciones de tiempo en el servicio nos encontramos con el problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo (VRPTW).

Para la resolución del VRPTW se tienen métodos metaheurísticos que son algoritmos genéticos, búsqueda tabú y recocido simulado, pero se plantean también métodos tipo colonias de hormigas, redes neuronales y metaheurísticos híbridos que combinan distintos métodos en varias fases.

Para el presente trabajo de titulación se propone obtener una solución al problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo mediante métodos heurísticos y metaheurísticos para la construcción de rutas las cuales serán programadas computacionalmente.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES JUSTIFICACIÓN

Y

### 1.1 Antecedentes

La distribuidora de productos de consumo masivo con la que se trabajará en el presente proyecto, inició en el año 2010, en una bodega arrendada y ubicada en Samanes. Con el pasar de los años y debido a la alta demanda de distribución de los productos de la empresa, tuvieron que cambiar sus instalaciones a un sector industrial con mayor capacidad de almacenamiento y mayor flexibilidad al momento de distribuir sus productos.

En la investigación realizada se pudo observar que actualmente se tienen 6,000 clientes que están clasificados entre mayoristas y minoristas, los días de atención son de lunes a viernes. Los lugares de distribución de los clientes se encuentran ubicados en el sector Norte de la ciudad de Guayaquil y además dos cantones adicionales que están fuera de la ciudad.

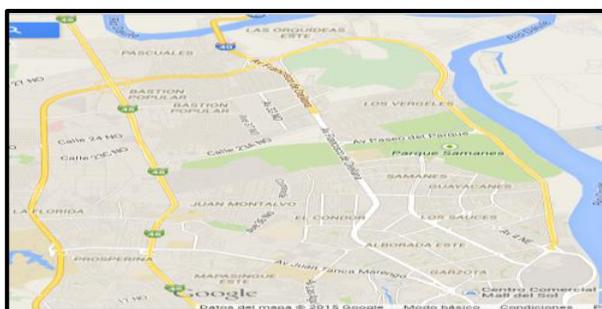


Figura 1. 1 Sector Norte donde se encuentran ubicados los clientes.

**Fuente: Tomada de Google Maps**

Para la entrega de mercaderías el CEDI cuenta con cuatro camiones, tres de capacidad de 2.8 toneladas y uno de capacidad de 3 Toneladas. La hora de inicio del reparto es a partir de las 7 am. (Ver la figura 1.2)

El área de distribución cuenta con diez personas que conocen las distintas rutas de entrega y cuatro choferes asignados a cada uno de los camiones.



*Figura 1. 2 Camiones de la empresa*  
**Fuente: Tomada por las autoras**

## 1.2 Planteamiento del problema

La empresa inicia sus labores desde la recepción de pedidos para posterior descarga, almacenamiento, manipulación, distribución y transportación.

El proceso de descarga de la mercadería es manual. Luego de esto, pasa por el proceso de estibación interno que depende de los requerimientos de los clientes.

El proceso de distribución comienza con la generación del pedido, donde se detallan las cantidades y volúmenes de los productos a transportar con la que se establece la asignación de vehículos con sus respectivas rutas.

La empresa tiene un modelo de sistema logístico, que con el tiempo se ha vuelto ineficiente, debido a que han incurrido en altos costos operativos. A continuación se describe la causa que genera los altos costos de transporte.

- Devolución de mercadería debido a que al final de la jornada hay camiones que regresan con productos, por los siguientes casos:
  - El cliente no se encontraba en el momento de la entrega.
  - El chofer no alcanzó a cumplir con su ruteo.
  - El producto no corresponde a lo que se ha facturado.
  - No se cumplió con la ventana horaria del cliente.



*Figura 1. 3 Devolución de mercadería*  
**Fuente: Tomada por las autoras**

### 1.3 Justificación del problema

La empresa tiene una serie de técnicas mal enfocadas en su sistema de transporte que generan deficiencias en la cadena de distribución, que agregan costos innecesarios, demoras en las entregas de pedido, y que provocan una devolución del producto.

Según lo detectado se desarrollará un plan de mejora en toda la cadena de distribución, que permitirá optimizar los procesos logísticos. Identificando nuevas oportunidades de mejora, reduciendo costos transportación, disminuyendo el nivel de inversión y mejorando el servicio al cliente garantizando que el producto llegue en las ventanas de tiempo establecidas y en buen estado. Esto se logrará con la planificación de rutas y la aplicación de la metaheurística de recocido simulado.

Para la planificación de las rutas óptimas se empleará la heurística del VRPTW (Problema de Ruteo Vehicular con Ventanas de Tiempo), donde los datos principales serán la ubicación de cada cliente, el tiempo que recibe su pedido y su costo asociado. Esto implica analizar todos los procesos de distribución como el despacho de mercadería, verificación y embarque para cada camión que es asignado para la entrega de productos. Para tener un mejor resultado se aplicará una metaheurística para comparar los costos de distribución con la situación actual.

## 1.4 Hipótesis

Implantando un sistema de ruteo vehicular se minimizarán los costos de la empresa y las distancias recorrida en la entrega de mercaderías desde la bodega a los clientes.

## 1.5 Objetivos

A continuación se presenta los objetivos generales y específicos que se van a obtener en el presente proyecto.

### 1.5.1 Objetivo general

Optimizar los costos de distribución aplicando el modelo matemático VRPTW para la creación de rutas.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Programar la heurística del modelo de ruteo vehicular con ventana de tiempo (VRPTW)
- Programar la metaheurística de recocido simulado para mejorar la solución.
- Comparar los resultados de la propuesta con la situación actual de la empresa.

# CAPÍTULO 2

## MARCO TEÓRICO

En este capítulo que se desarrollará a continuación, se analizarán conceptos básicos, complementarios y específicos para entender el desarrollo del presente proyecto, donde se identifican las diferentes teorías y técnicas acerca del ruteo vehicular, con el fin de comprender la importancia de una buena planificación que permitirá llevar a cabo los objetivos específicos planteados en este proyecto.

### 2.1 Estado del arte

El estado del arte nos permite conocer las investigaciones más recientes que se han realizado acerca de algún tema. Las siguientes investigaciones permiten conocer los problemas de ruteo vehicular que presentan algunas empresas y como se han podido, mediante técnicas, mejorar su productividad y calidad de servicio.

En el proyecto <sup>[10]</sup> se explicó el problema que tiene un operador logístico con el proceso de distribución, debido a que la empresa de estudio utiliza una planificación de rutas en forma empírica. Utilizando la heurística de Clarke & Wright con ventanas de tiempo se generaron las rutas de distribución con mayor cobertura y menor recorrido. Para buscar mejoras en las rutas generadas se aplicó la heurística local 2opt mediante el intercambio entre las mejores rutas.

En el trabajo <sup>[9]</sup> se explicaron los problemas que tiene el Ecuador con las empresas de Courier, planificando de manera empírica sus rutas, por ende incrementa sus costos operativos y disminuye la calidad de servicios a los clientes.

Se desarrolló la metaheurística de *Algoritmo Genético Híbrido* de tipo secuencial para resolver el problema de ruteo vehicular capacitado con ventanas de tiempo suave de la empresa, y a partir de ello plantear un sistema de soporte de decisiones para la planificación de las rutas.

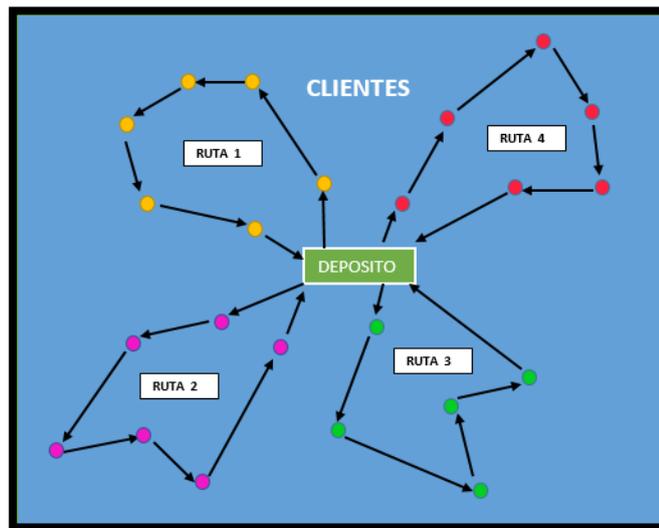
El proyecto <sup>[2]</sup> tenía como objetivo diseñar un método de ruteo vehicular para la entrega de productos de consumo masivo de un supermercado mayorista ubicado en Quevedo.

Se desarrolló un método de ruteo vehicular para la entrega de los productos a cada cliente en un tiempo determinado mediante la aplicación del algoritmo VRPTW para la generación de las rutas; y se buscó mejoras con la metaheurística del recocido simulado. También se implementaron indicadores de operaciones vinculadas a la distribución que facilita el control de la gestión.

## 2.2 Marco conceptual

Existe una amplia literatura sobre los problemas de ruteo vehicular que presentan las empresas de distribución, para este proyecto se cuenta con una buena base de información que servirá de guía y ayuda.

Los problemas de ruteo vehicular tratan de generar rutas que minimicen los costos de distribución (estos costos puede ser tiempo de entrega o distancia recorrida), siempre tratando de cumplir las restricciones que tienen dichos problemas y haciendo uso de los recursos y técnicas que sean necesarias.



*Figura 2. 1 Rutas generadas por los VRP*  
**Fuente: Creado por las autoras**

La resolución del problema de ruteo vehicular llega a ser muy complejo porque depende de muchos factores como:

- La cantidad de los clientes.
- Localización de los clientes.
- Capacidad de los vehículos.
- La demanda de los clientes.
- Tiempo de transportación.
- Costo de transportación.

Una vez definido el problema se debe formular un modelo cuantitativo empleando métodos matemáticos.

### 2.3 Redes de distribución

Las redes de distribución comprenden el transporte de los bienes desde su producción hasta el cliente.

Los bienes pueden ser transportados de diferentes modos: por ferrocarril, transporte aéreo, marítimo, fluvial, hasta llegar a su destino final.

Las redes de distribución tienen como objetivo principal disminuir los costos de transporte pero satisfaciendo las necesidades del cliente.

Algunas empresas pueden ofrecer los servicios de almacenaje, empaquetado y otros servicios de valor añadido conjuntamente con el servicio de transporte y distribución, aquellas empresas de transporte que prestan este tipo de servicios constituyen el grupo conocido third party logistics (3PL).<sup>[8]</sup>

### 2.4 Modelos de distribución física y transporte

El principal problema de la distribución es establecer una ruta a cada vehículo de la flota de manera que se entreguen los bienes a cada cliente ubicado en puntos determinados y respetando los horarios de servicio determinados por el cliente.<sup>[10]</sup>

La distribución física de un producto generalmente cuenta con cinco elementos fundamentales:

1. El procesamiento de pedidos: La empresa analiza los requerimientos de los clientes con el fin de satisfacer sus necesidades.
2. El control de inventarios: Se controla el flujo de movimiento de entrada y salida de los productos para tener un registro de abastecimiento y distribución.
3. El transporte: Se entrega al cliente los productos de acuerdo a sus requerimientos.
4. El manejo de materiales: Se sigue procedimientos de acuerdo al tipo de material que se almacena o distribuya.
5. El almacenamiento: En esta parte se guardan los productos hasta su distribución.

## 2.5 El problema de Ruteo Vehicular (VRP)

El problema de ruteo vehicular es el nombre genérico dado a la clase de problemas en los que se debe determinar una serie de rutas para una flota de vehículos basados en uno o más depósitos, para un cierto número de ciudades o clientes geográficamente dispersos. <sup>[4]</sup>

El objetivo del VRP es satisfacer a una serie de clientes con demandas conocidas, en rutas vehiculares de mínimo costo, que se originan y terminan en un depósito.

La función objetivo depende de las características del problema, algunos ejemplos son:

- Minimizar el costo total de operación.
- Minimizar el tiempo total de transporte.
- Minimizar la distancia total recorrida.
- Maximizar el nivel de servicio al cliente.
- Minimizar el uso de vehículos.

### 2.5.1 Componentes de un problema de Ruteo de Vehicular

El problema de ruteo de vehicular presenta diferentes características en cuanto a los clientes, depósitos, red vial y vehículos, estas diferencias son las que dan lugar a las diferentes variantes del problema.

**Los clientes.-** Cada cliente tiene cierta demanda que debe ser cubierta por algún vehículo, esta demanda puede ser determinística o estocástica. En algunos casos, es posible que un mismo vehículo no pueda satisfacer la demanda de todos los clientes en una misma ruta. En otros casos la demanda no es un bien sino un servicio donde se da por cumplido el objetivo si el cliente es visitado por un vehículo, lo usual es que cada cliente deba ser visitado exactamente una vez, sin embargo, en ciertos casos se acepta que la demanda de un cliente sea satisfecha en momentos diferentes y por vehículos diferentes.

Otra característica relacionada con los clientes es que se puede tener restricciones asociadas al instante de tiempo en el cual se puede visitar al cliente (horario pactado).

Usualmente estas condiciones se expresan como intervalos de tiempo conocidos como ventanas de tiempo.

**Los Depósitos.-** Los vehículos usualmente parten de un solo depósito y se tiene como condición que cada ruta definida comience y finalice en el depósito, sin embargo existen variaciones donde se tienen problemas como son los multi-depósitos en los que cada depósito tiene características propias como son su ubicación y la capacidad máxima de almacenamiento.

**Los Vehículos.-** La flota de vehículos pueden ser homogéneos o heterogéneos en cuanto a su capacidad, tipo de producto que puede transportar y el costo fijo en el que se incurre al usar cada vehículo.

Se encuentran problemas con vehículos con capacidad limitada o ilimitada. Es posible encontrar restricciones sobre el tiempo máximo que un vehículo puede estar en circulación y en algunos casos se desea que la cantidad de trabajo realizado por los vehículos (usualmente el tiempo de viaje) sea equilibrada entre ellos.<sup>[1]</sup>

### 2.5.2 Variantes del VRP

En el mundo empresarial, en los VRP aparecen muchas restricciones especiales, aparte de las nombradas. Esto crea el surgimiento de variantes del problema original. Algunas de las principales son:

El problema del vendedor viajero (Traveling Salesman Problem - TSP).

Cada vehículo tiene una capacidad limitada (Capacitated VRP - CVRP).

Cada cliente tiene que ser atendido dentro de una cierta ventana de tiempo (VRP with time windows - VRPTW).

El vendedor usa varios depósitos para abastecer a los clientes (Multiple Depot VRP - MDVRP).

Los clientes tienen la opción de devolver algunos bienes al depósito (VRP with Pick-Up and Delivering - VRPPD).

Los clientes pueden ser abastecidos por distintos vehículos (Split Delivery VRP - SDVRP).

Algunos valores (como número de clientes, sus demandas, tiempo de servicio o tiempo de viaje) son aleatorios (Stochastic VRP - SVRP).

Los pedidos pueden ser llevados sólo en ciertos días (Periodic VRP - PVRP).

[6]

## 2.6 Problema de Ruteo Vehicular con Ventanas de tiempo VRPTW

El VRPTW es el mismo VRP con la restricción adicional en donde se asocia a cada cliente una ventana de tiempo definida a través de un intervalo  $[t, t + k]$  donde el cliente o ciudad debe ser servido.

Este problema es considerado un problema de optimización múltiple ya que aparte de resolver el número de vehículos para proporcionar el servicio y disminuir el tiempo invertido de cada una de las rutas, también se debe

disminuir el tiempo de espera por el servicio definido en la ventana de tiempo.

[7]

### 2.6.1 Formulación del Problema de Ruteo Vehicular con ventanas de Tiempo (VRPTW)

Para el proyecto se utilizará una formulación del problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo (VRPTW), la cual sirve para la creación de las rutas de entrega en un intervalo de tiempo determinado.

El VRPTW puede ser formulado de la siguiente manera. Sea  $G = (V, E)$  un grafo no dirigido donde  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$  es un conjunto de vértices, en el que  $v_1, \dots, v_n$  representan a los clientes y  $v_0$  al depósito y  $E = \{(v_i, v_j) / v_i, v_j \in V, i \neq j\}$  es un conjunto de arcos, los cuales representan las interconexiones posibles entre clientes y depósitos. A cada par ordenado  $(v_i, v_j) \in E$  se asocia un costo  $c_{ij} = c_{ji}$  y  $t_{ij} = t_{ji}$ . Cada cliente  $v_i \in V/v_0$  tiene una demanda no negativa  $d_i$ , un tiempo de servicio  $s_{v_i}$  y un intervalo de tiempo  $[e_{v_i}, l_{v_i}]$  en el que se debe satisfacer su demanda. Una flota de  $M$  vehículos es conocida de antemano o considerada como una variable de decisión. Así mismo, sea  $r$  la máxima longitud que un vehículo puede recorrer. El VRPTW consiste en la construcción de un conjunto de a lo mucho  $M$  rutas que satisfagan cada una de las siguientes restricciones:

1. Cada ruta comienza y termina en el depósito.
2. Cada cliente es visitado una y sólo una vez por un solo vehículo.

3. La demanda de cada cliente es satisfecha en cada visita vehicular.
4. Los clientes son atendidos dentro de las ventanas de tiempos previamente establecidas.
5. La demanda acumulada en cada ruta no excede la capacidad  $Q$  de cada vehículo.
6. La longitud total recorrida por cada vehículo, no excede el valor límite  $r$ .
7. El costo total de las rutas es mínimo.

Para establecer el modelo matemático que satisface todas las restricciones del VRPTW se define una variable binaria:

$$x_{ijm} = \begin{cases} 1; & \text{si el arco } (v_i, v_j) \in E \text{ es considerado en la ruta de un vehículo } m \in M \\ 0; & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Sea  $c_{ij}$  el costo asociado al arco  $(v_i, v_j) \in E$  que puede ser tiempo de viaje o distancia recorrida, entonces la función objetivo dada en la ecuación 1 que va hacer minimizada involucra todos los costos asociados a los arcos que pertenecen a un solución dada [3].

$$\min \sum_{m \in M} \sum_{(v_i, v_j) \in E} c_{ij} x_{ijm} \quad (1)$$

Esta función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

En la ecuación 2 muestra que un vehículo debe visitar a uno y solamente a un cliente o al depósito.

$$\sum_{m \in M} \sum_{v_j \in \Delta^-(v_i)} X_{ijm} = 1 \quad \forall v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (2)$$

La ecuación 3 establece que cada recorrido o ruta realizada por un vehículo  $m \in M$  debe terminar en el depósito  $v_0$ .

$$\sum_{v_i \in \Delta^+(v_0)} X_{i0m} = 1 \quad \forall m \in M \quad (3)$$

Después de visitar solo una vez a cada cliente  $v_i \in V \setminus \{v_0\}$  el vehículo debe dirigirse a un solo vértice  $v_j \in V$ . Esto lo podemos observar en la ecuación 4.

$$\sum_{v_j \in \Delta^+(v_i)} X_{ijm} - \sum_{v_j \in \Delta^-(v_i)} X_{jim} = 0 \quad \forall m \in M, \forall v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (4)$$

Sea  $d_i$  la demanda asociada al cliente  $v_i$ , la inecuación 5 nos expresa que la suma de las demandas asociadas a cada clientes las cuales están asignadas a la ruta del vehículo  $m \in M$ , no puede superar la capacidad  $Q$  del mismo.

$$\sum_{v_i \in V \setminus \{v_0\}} d_i \sum_{v_j \in \Delta^+(v_i)} X_{ijm} \leq Q \quad \forall m \in M \quad (5)$$

Sean  $[e_{v_i}, l_{v_i}]$  el intervalo de tiempo en el cual se debe visitar a cada cliente para satisfacer su demanda y  $t_{v_i}$  el tiempo de llegada del vehículo a un cliente  $v_i$ , entonces como podemos observar en la inecuación 6 se debe cumplir que el tiempo de llegada a cada cliente debe estar en el intervalo establecido.

$$e_{v_i} \leq t_{v_i} \leq l_{v_i} \quad \forall v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (6)$$

Para que un par ordenado de clientes  $(v_i, v_j)$  se defina como factible algún vehículo  $m \in M$  puede visitar  $v_j$  luego de visitar  $v_i$ , esta condición la observamos en la inecuación 7.

$$x_{ijm} (t_{v_i} + \tilde{t}_{v_i, v_j} - t_{v_j}) \leq 0 \quad \forall (v_i, v_j) \in E, v_i, v_j \neq v_0 \quad (7)$$

Las ecuaciones 8 y 9 consideran las restricciones de variables binarias y los tiempos de llegada a los clientes son positivos.

$$X_{ijm} \in \{0, 1\} \quad \forall (v_i, v_j) \in AE, m \in M \quad (8)$$

$$t_{v_i} \geq 0 \quad \forall v_i \in V \setminus \{v_0\} \quad (9)$$

Se han diseñado algunas heurísticas para resolver los VRPTW que nos dan buenas soluciones a un costo razonable [3].

## 2.7 Heurísticas para resolver el VRPTW

Se conoce que el VRPTW como todas las variantes del VRP es un problema de optimización combinatoria duro por lo que puede ser resuelto con métodos exactos pero solamente casos relativamente pequeños.

Por lo que en la práctica se utilizan heurísticas, entre las clásicas tenemos:

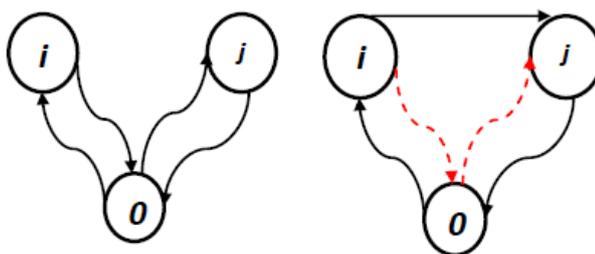
- Clarke & Wright,
- Fisher & Jaikumar,
- De barrido

Para el presente proyecto se utilizara la heurística de Clarke & Wright o también conocido como el algoritmo de ahorros, esta es la heurística clásica más significativa para resolver los problemas de ruteo vehicular, ya que es una técnica que se basa en una matriz que es la combinación de rutas eficientes que minimizan los costos.

### 2.7.1 Heurística de Clarke & Wright

Esta heurística es un procedimiento sencillo que se encarga de realizar una exploración limitada del espacio de búsqueda para dar una solución de calidad que sea aceptable y en un tiempo de cálculo moderado.

El concepto básico de esta heurística es que expresa el ahorro en costos obtenidos uniendo dos rutas en una sola ruta, tal como lo muestra la figura 2.1, donde el punto 0 representa el depósito.



*Figura 2. 2 Heurística de Clarke & Wright*

**Fuente: Modelo de planeación de las rutas de distribución de un operador logístico**

Los pasos para realizar la heurística son:

Paso 1 Inicialización: Para cada cliente  $i$  construir la ruta  $(1, i, 1)$ .

Paso 2 cálculos de los ahorros: Se calcula  $S_{ij} = C_{i1} + C_{1j} - C_{ij}$  para cada par de clientes  $i$  y  $j$ .

Paso 3 mejorar la unión: Sea  $S_{i^*j^*} = \max S_{ij}$ , donde el máximo se toma entre los ahorros que no han sido considerados todavía. Sean  $r_{i^*}$  y  $r_{j^*}$  las rutas que contienen a los clientes  $i^*j^*$ . Si  $i^*$  es el último cliente de  $r_{i^*}$  y  $j^*$  es el primer cliente de  $r_{j^*}$  y la combinación de  $r_{i^*}$  y  $r_{j^*}$  es factible, entonces se combinan.

Paso 4 eliminar  $S_{i^*j^*}$  de futuras consideraciones: Si quedan ahorros por examinar ir al paso 3, sino terminar <sup>[11]</sup>.

*Algoritmo 1 Clarke & Wright*

**Fuente: Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP)**

Se buscará una mejora a la solución de la heurística, ya que estos métodos exploran un número limitado de soluciones factibles, utilizando una metaheurística para ampliar el conjunto de exploración.

## 2.8 Metaheurística

Los métodos metaheurísticos están ligados a los procedimientos heurísticos ya que intentan proporcionar mejoras sobre estos últimos. Se puede hacer una

clasificación según el tipo de heurística que se aborde, en este caso los métodos metaheurísticos se clasifican en:

- Métodos constructivos: Aquellos donde se introducen elementos a una solución inicial vacía (algoritmo GRASP).
- Métodos Evolutivos: Estos métodos construyen grupos de soluciones completas, realizan una selección basándose en el valor de ciertos atributos, posteriormente se combinan algunas de las soluciones seleccionadas y se reemplazan finalmente el grupo de soluciones (Algoritmo Genético, Búsqueda Dispersa).
- Métodos de búsqueda: Los métodos de búsqueda dan por hecho que debe existir una solución óptima y ejecutan un procedimiento que no llega a la solución del óptimo global del problema pero sí a una solución muy cercana a ésta. El riesgo más común de estos métodos es el de obtener la solución de un óptimo local y quedar atrapado en él.

Los métodos de búsqueda local más importantes se desarrollan según la manera que tienen de salir del óptimo local. Hay tres maneras de proceder:

- Retornar a una solución inicial diferente y volver a comenzar. (Multi start)
- Variación de la estructura de entornos. (Metaheurística de búsqueda de entornos variables)

- Realizar movimientos que empeoren la solución para salir del óptimo local. Simulated Annealing y Búsqueda Tabú<sup>[12]</sup>.

### 2.8.1 Recocido Simulado

Fue al inicio de la década de los 80 cuando quedó definido el recocido simulado (simulated annealing, SA, en inglés), como una nueva estrategia heurística utilizada para la resolución de complejos problemas combinatorios, sorprendente en cuanto surgía como consecuencia del establecimiento de una analogía entre este tipo de problemas y resultados teóricos obtenidos en un campo, en principio, tan diferente a la Investigación Operativa como es la Termodinámica. Su simplicidad y potencialidad para ser aplicada en una gran variedad de problemas, pronto la hizo ampliamente utilizada <sup>[5]</sup>.

Sea  $S$  el conjunto de soluciones posibles del sistema (a las que se identifican con los diferentes “estados del sistema”) y tienen una función de costo sobre los elementos de  $S$  (a la que identifican con la “energía del sistema”). Se quiere encontrar un elemento en  $S$  que minimice la función costo (análogamente, se trata de encontrar un estado en el cual la energía del sistema sea mínima). Se supone que los estados del sistema tienen la función de distribución de probabilidad de Boltzman, la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado  $j$  es:

$$P(j) = \frac{1}{Z_T} e^{-\frac{c(j)}{t}}$$

$$Z(t) = \sum e^{-\frac{c(j)}{t}}$$

Donde (suma sobre todos los elementos  $i$  de  $S$ )  $t$  es la temperatura del sistema y  $c(i)$  es el costo de la solución  $i$ .

Sea  $S^*$  el subconjunto de  $S$  de las soluciones que minimizan  $c$  (globalmente, es decir soluciones óptimas del problema). Para  $t$  suficientemente chico:

De donde:

$$e^{-\frac{c(j^*)}{t}} \gg e^{-\frac{c(j)}{t}} \quad \forall j \neq j^*$$

Entonces:

$$P(j) = \frac{e^{-\frac{c(j)}{t}}}{\sum_{S^*} e^{-\frac{c(j^*)}{t}}} = \begin{cases} 0 & ; si j \neq j^* \\ \frac{1}{S} & ; si j = j^* \end{cases}$$

Por lo tanto:  $\sum_j P(j^*) = 1$  (suma sobre todos los  $j^*$  en  $S^*$ ).

El algoritmo se divide en etapas. A cada etapa le corresponde una temperatura menor que tenía la etapa anterior (a esto hace referencia la monotonía: después de cada etapa la temperatura baja, se enfría el sistema). Por lo tanto hace falta un criterio de cambio de la temperatura (“cuánto tiempo” se espera en cada etapa para dar lugar a que el sistema alcance su “equilibrio térmico”).

Por lo tanto, la estrategia que se seguirá en el recocido simulado será partir de una “temperatura alta” (con la cual se permiten cambios a soluciones peores

en los primeros pasos, cuando aún están lejos del óptimo global), y posteriormente irán reduciendo la temperatura, disminuyendo la posibilidad de cambios a soluciones peores cuando ya se encuentre más cercanos al óptimo buscado. De este procedimiento proviene el algoritmo, ya que el “recocido” es un proceso metalúrgico (usado por ejemplo para eliminar en el acero laminado en frío las tensiones internas adquiridas), mediante el cual se somete al material a un calentamiento rápido para posteriormente dejarlo enfriar lenta y controladamente durante horas [5].

El algoritmo de recocido simulado podría representarse de la siguiente forma:

```

INGRESE ( $T_0, \alpha, L, T_f$ )
 $T \leftarrow T_0$ 
 $S_{act} \leftarrow$  Genera solución inicial
MIENTRAS  $T \geq T_f$  HACER
EMPEZAR
PARA  $cont \leftarrow 1$  HASTA  $L(T)$  HACER
    EMPEZAR
     $S_{cand} \leftarrow$  selecciona solución  $N(S_{act})$ 
     $\delta \leftarrow$  costo ( $S_{cand}$ ) - costo ( $S_{act}$ )
    SI  $(U(0,1) < e^{i-\delta/T})$  O
    ( $\delta < 0$ ) ENTONCES  $S_{act} \leftarrow S_{cand}$ 
    FIN
 $T \leftarrow \alpha T$ 
FIN
  
```

*Algoritmo 2 Recocido Simulado*  
**Fuente: Creado por las autoras**

Es decir, se selecciona la temperatura inicial  $T_0$ , la velocidad de enfriamiento (la forma de calculo  $\alpha$  del valor  $T_{i-1}$  a partir del  $T_i$  cuando se disminuye la

temperatura tras haber estado  $L(T)$  iteraciones en esa  $T$  y la temperatura final  $T_f$ . Se genera una solución inicial perteneciente al espacio de soluciones  $\Omega$  y, mientras no se llegue al fin del proceso para cada  $T$  se calcula un número de  $L(T)$  de veces (antes de disminuir la temperatura) una solución que este en el entorno  $N(S_{act})$  de la actual, la cual sustituirá a ésta, bien si tiene menor costo o bien con una probabilidad que se genera un número aleatorio uniforme  $[0,1)$ , que se representa como  $U(0,1)$ . Finalmente la solución ofrecida será la mejor de todas las  $S_{act}$  visitadas.

Se ha de advertir que aunque aquí, por razones de sencillez, se ha considerado que el algoritmo finaliza al haberse alcanzado una temperatura mínima  $T_f$ , en sentido general esta condición se debería llamar según el artículo de Kirkpatrick la condición de parada (“estado frío”) consistía en que tres temperaturas sucesivas no se produjeron un número mínimo aceptable de mejores soluciones.

#### 2.8.1.1 Datos iniciales y parámetros del algoritmo

**Temperatura inicial ( $T_0$ ).**- La temperatura inicial  $T_0$  debe ser una temperatura que permita elegir el movimiento, es decir que la probabilidad de pasar del estado  $i$  al  $j$  (en  $N(i)$ ) sea muy alta, sin importar la diferencia  $c(j) - c(i)$ . Esto es que el sistema tenga un alto grado de libertad. En problemas como TSP, donde el input son los nodos de un grafo y las soluciones posibles son distintas formas de recorrer estos nodos, puede tomarse  $T_0$  proporcional a la raíz

cuadrada de la cantidad de nodos. En general se toma un valor  $T_0$  que se cree suficientemente alto y se observa la primera etapa para verificar que el sistema tenga un grado de libertad y en función de esta observación se ajusta  $T_0$ .

**Solución inicial ( $i_0$ ).**- En todas las versiones, el sistema debe ser “derretido” antes de implementar el algoritmo. Esto es que la solución factible inicial que denominamos  $i_0$  debería ser una solución tomada al azar del conjunto de soluciones factibles. En algunos problemas esto puede hacerse utilizando números pseudo-aleatorios previstos por una máquina. Pero en muchos casos ya es problemático encontrar una solución, por lo que es imposible tomar una al azar.

Este algoritmo busca la producción de un ciclo hamiltoniano uniendo una cantidad de bordes de grado dos, luego anexa el borde más corto cada vez, siempre que no haya sido, previamente cumplido con las condiciones de validez mencionadas en la sección.

### **Factor de enfriamiento**

$T_{next} = \alpha T$  (Factor de enfriamiento geométrico,  $\alpha < 1$  muy cercano a 1).

$T_{next} = 1 / (1 + \beta T)$  (Donde  $\beta$  es un real positivo cercano a cero).

### **Criterio de cambio de la temperatura**

Se usan dos parámetros:  $K$  = es el número de iteraciones que está dispuesto a hacer en cada etapa (equivalente a la cantidad de tiempo que va a esperar

a que el sistema alcance su equilibrio térmico dada la temperatura  $T$ ); y  $A$  = la cantidad de aceptaciones que se permiten hacer en cada etapa.

A medida que  $T$  disminuye se supone que al sistema le resulta más difícil alcanzar un equilibrio porque es más dificultoso el movimiento, entonces hay que esperar más tiempo, esto se traduce en aumentar  $K$  donde  $\rho$ , se usan valores alrededor de 1,05.

### **Criterio de parada**

a) Lundy and Mees: si el algoritmo se detiene cuando  $T < \varepsilon / [\ln (\#S - 1) / \theta]$ .

Donde  $\#S$  es el cardinal del conjunto de soluciones (debe tenerse un método de estimar este valor). Entonces, si  $i$  es la solución que da el algoritmo e  $i^*$  es un óptimo global,  $P (|c(i) - c(i^*)| < \varepsilon) = \theta$

b) En general se utiliza un parámetro de congelamiento ( $FRZN$ ). Como a medida que disminuye la temperatura, aumenta el parámetro  $K$  y  $A$  permanece constante, la proporción  $A/K$  se hace pequeña. Suponemos que si  $A/K < FRZN$  el sistema está congelado (la cantidad de aceptaciones respecto de la cantidad de iteraciones es muy chica, esto da la idea que al cambiar de configuración es muy difícil)

## **2.9 Modelo tarifario**

El modelo tarifario consiste en determinar la tarifa de transporte de diferentes rutas de ciertos tipos de vehículos. El objetivo del modelo tarifario es encontrar un análisis matemático que se ajuste a las necesidades de la empresas y su

entorno con el fin de tener una idea clara de los valores que se debe cancelar por el servicio para no incurrir en gastos excesivos. Se puede clasificar en cuatro tipos a los elementos que conforman la estructura del modelo tarifario.

- Parámetros del modelo
- Parámetros de ruta
- Costos fijos
- Costos variables

#### 2.9.1 Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo son las variables que se introducen en el modelo tarifario para determinar la tarifa de transporte.

- Inversión: Es el costo inicial del vehículo.
- Tiempo de vida útil del vehículo: Es el número de años en los cuales el vehículo es apto para el trabajo.
- Roa: Es la rentabilidad sobre los activos y se la calcula dividiendo las ganancias anuales para el valor total de la inversión anual.

#### 2.9.2 Parámetros de la ruta

Los parámetros de ruta son aquellas características que diferencian a las rutas de transporte y que modifican los valores de las variables de acuerdo a esas características.

- Origen: es el lugar de donde empieza la ruta de transporte
- Destino: es el lugar donde finaliza la ruta, pero no el recorrido.
- Distancia: es el kilometraje entre el origen y el destino.
- Recorrido: el recorrido empieza y termina en el origen, es la distancia multiplicada por 2.

### 2.9.3 Costos fijos

Los costos fijos son aquellos que se mantienen inalterables independientemente de la distancia de la ruta o recorrido que el vehículo efectuará.

### 2.9.4 Costos variables

Los costos variables son aquellos que varían de acuerdo a la distancia de la ruta o recorrido.

La ecuación 2.1 nos indica cómo se hallará el costo total de distribución.

$$\textit{Costo de distribución} = \textit{Costo Fijo} + \textit{Costo Variable} * \textit{Distancia} \quad (2.1)$$

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología por definición es el camino a seguir para alcanzar los objetivos propuestos. En este capítulo se especifica la metodología a utilizar en el proyecto de titulación, es decir los métodos, técnicas y procedimientos que permiten obtener los objetivos especificados en el capítulo 1.

Toda la información presentada en este proyecto se la obtuvo a través de un trabajo de campo realizado en la empresa en la cual se pudo obtener las coordenadas de cada cliente, además de las entrevistas realizadas al personal de la empresa.

Con esto se pretende que el tiempo de distribución se reduzca al respetar las ventanas de tiempo establecidas por el cliente, con el fin de reducir el porcentaje de devoluciones y se minimicen los costos de la empresa manteniendo un buen nivel de servicio.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo indicando la secuencia de pasos para la metodología a seguir.

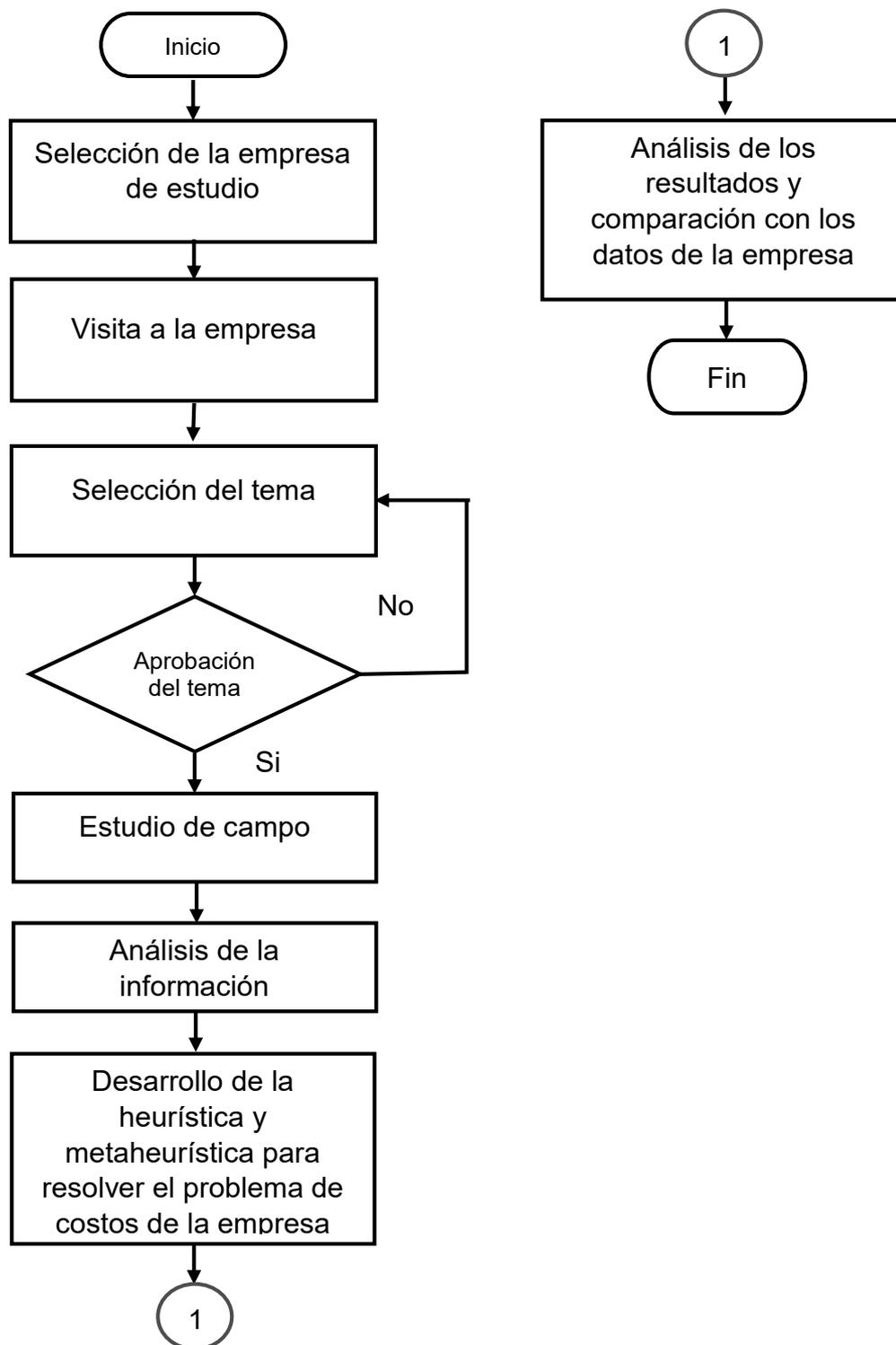
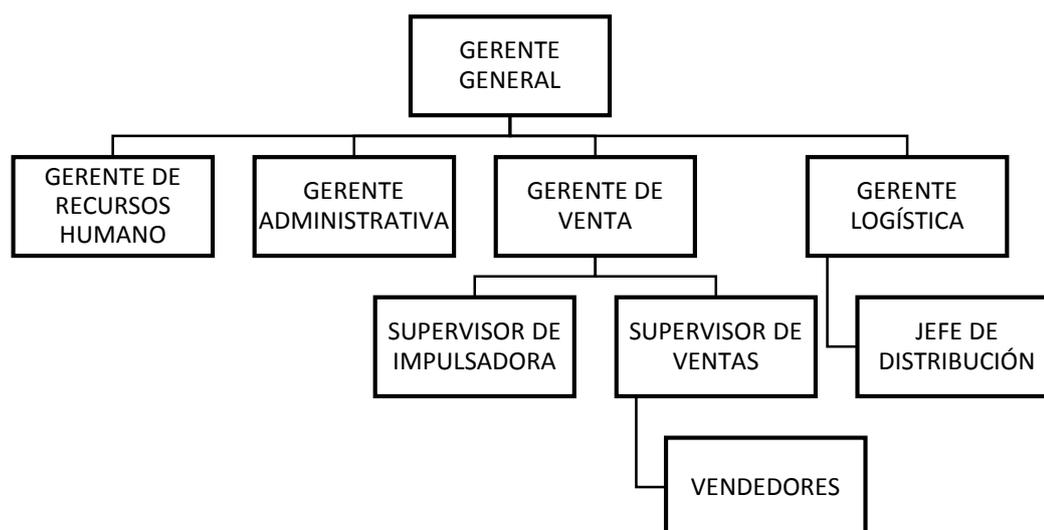


Figura 3. 1 Metodología a seguir

Fuente: Creado por las autoras

### 3.1 Organigrama estructural de la empresa

A continuación se presenta la estructura jerárquica de la empresa, la cual se logró realizar tomando en cuenta las actividades que realiza cada empleado y el puesto que ocupa en la empresa.



*Figura 3. 2 Organigrama estructural de la empresa*

**Fuente: Creado por las autoras**

#### 3.1.1 Gerente General

Es el encargado de administrar y dirigir la totalidad de empresa. Tiene las siguientes funciones:

- Dirigir y formular la política de la empresa.
- Dirigir, planificar y coordinar las actividades generales a desarrollarse en la empresa.
- Representar a la compañía ante otras empresas o instituciones.

- Evaluar y controlar las operaciones con los resultados obtenidos por la empresa.

### 3.1.2 Gerente de Recursos Humanos

Es el encargado de coordinar al personal que labora en la empresa, tiene las siguientes funciones:

- Elaborar, controlar e implementar las políticas del personal, para conseguir un equipo humano adecuado, motivado y comprometido con los objetivos establecidos con la empresa.
- Elaborar y controlar el proceso de reclutamiento, selección, ingreso, formación e inducción del personal, con el fin de seleccionar los posibles candidatos más idóneos para los puestos de la organización.
- Proyectar y coordinar los programas de capacitación del personal.
- Colaborar y garantizar una buena comunicación entre todos los niveles de comunicación con el fin de mantener un ambiente adecuado.

### 3.1.3 Gerente Administrativa

Es el encargado de controlar y dirigir los procesos financieros y administrativos de la empresa. Tiene las siguientes funciones:

- Establecer y controlar el manejo del plan operativo de ingresos y egresos de la empresa.
- Preparar y controlar el flujo de caja para la administración financiera.
- Planificar, organizar y controlar el buen funcionamiento del sistema de contabilidad.

- Liquidar y registrar los sueldos, salarios, descuentos, retenciones y ajustes; de acuerdo con las disposiciones legales vigentes.
- Elaborar los presupuestos que muestren la situación económica y financiera de la empresa
- Coordinar y controlar la toma de inventario.

#### 3.1.4 Gerente de Venta

Es el encargado de planificar, organizar, dirigir y controlar todas las operaciones de ventas. Tiene las siguientes funciones:

- Preparar planes estratégicos y presupuestos de ventas.
- Establecer metas y objetivos con su equipo de trabajo.
- Calcular la demanda y pronosticar las ventas.
- Reclutamiento, selección y capacitación de los vendedores.

#### 3.1.5 Supervisor de Ventas

Es el encargado de mantener informado al Gerente de Ventas sobre el desempeño de los vendedores de la empresa. La función primordial de los supervisores de ventas es manejar a los vendedores de una organización.

Tiene las siguientes funciones:

- Proporcionar una guía general y consejos al grupo de vendedores en una sucursal o territorio de campo.
- Ejecutar plan de ventas y realizar visitas de ventas o seguimiento de los clientes.

- Utilizar métodos y canales adecuados de comercialización.
- Mantener motivado al personal de trabajo
- Capacitar a los vendedores.

### 3.1.6 Supervisor de Impulsadoras

Es el encargado de controlar y planificar las actividades cotidianas de los impulsadoras o mercaderistas. Tiene las siguientes funciones:

- Establecer estrategias de marketing.
- Analizar y determinar la rentabilidad de los diferentes productos y servicios que brinda la empresa.
- Analizar el comportamiento de la demanda de los diferentes productos y servicios.
- Capacitar a las impulsadoras para promocionar los productos

### 3.1.7 Vendedores

Es aquella persona que se dedica a la venta de producto. Tiene las siguientes funciones:

- Establecer una relación entre el cliente y la empresa.
- Retroalimentación a la empresa: reclamos, sugerencias y agradecimientos de parte de los clientes para la mejora continua.
- Digitalizar los pedidos de los clientes.

### 3.1.8 Gerente Logística

Es el encargado de coordinar y organizar el área logística de la empresa. Tiene las siguientes funciones:

- Controlar y coordinar las funciones de la cadena de suministro.
- Controlar y mantener los niveles de inventario.
- Identificar, clasificar y codificar los productos dentro del almacén.
- Dirigir, coordinar y controlar los despachos como a su vez la recepción de productos.

### 3.1.9 Jefe de Distribución

Es el encargado de la recepción, almacenamiento y entrega de productos a los clientes. Tiene las siguientes funciones:

- Controlar la salida de mercadería.
- Realizar el seguimiento a los transportistas de despachos.
- Coordinar permanente con el cliente.
- Inspeccionar los vehículos de reparto para asegurar que están equipados apropiadamente

## 3.2 Flujo de la cadena de suministro de la empresa

La gestión de la cadena de suministro consiste en planificar, implementar y controlar el flujo eficiente, el almacenamiento de las materias primas o productos terminados y la información relativa, partiendo de un origen de consumo con el fin de satisfacer las necesidades de los clientes, proporcionando de esta manera una ventaja competitiva para la empresa.

En la figura 3.3 se van a presentar las actividades y los procesos de la cadena de suministro que tiene la empresa, desde la recepción de los proveedores hasta la entrega al consumidor final.

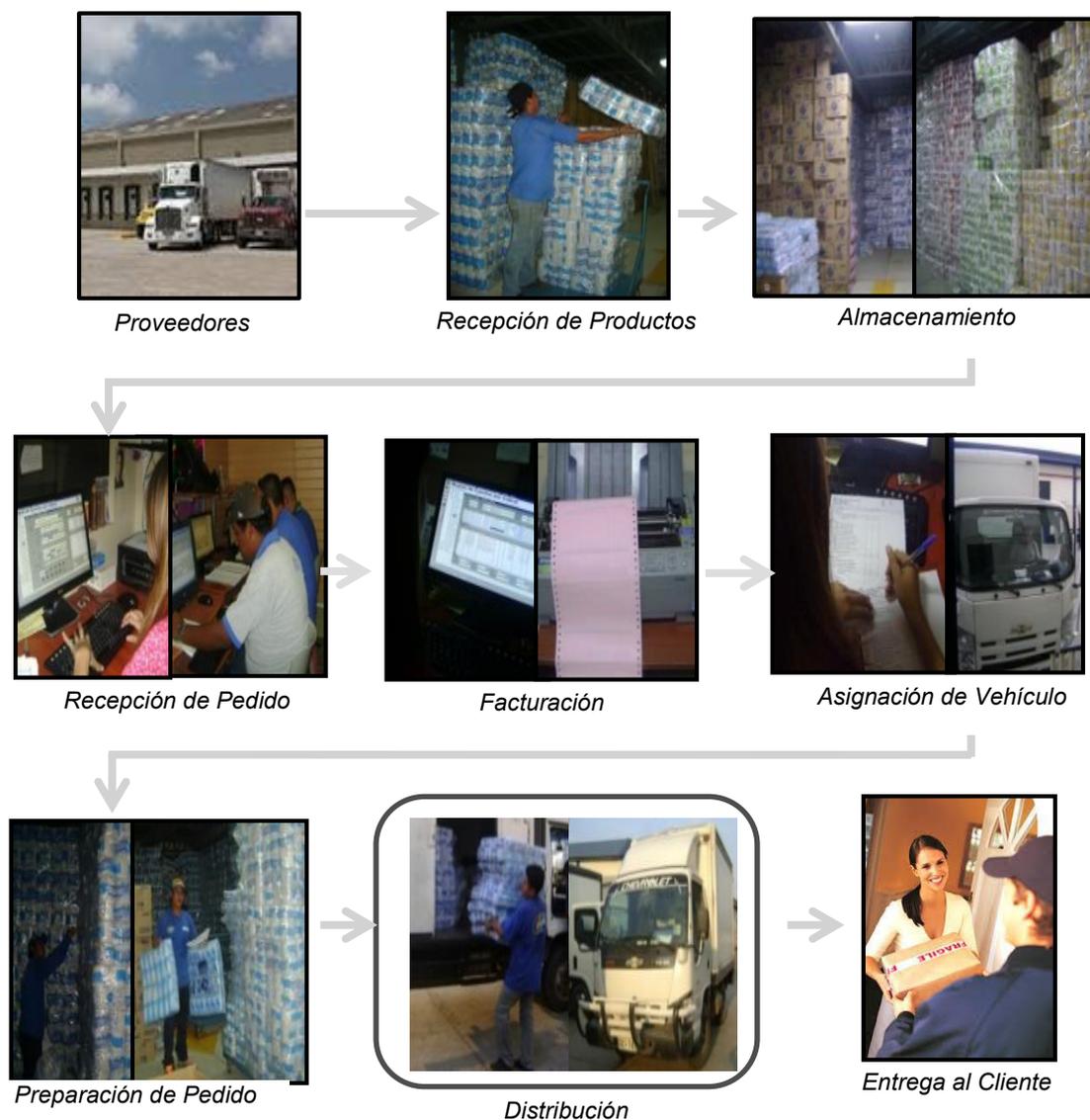


Figura 3. 3 Flujo de la cadena de suministro de la empresa

Fuente: Creado por las autoras

### 3.2.1 Componentes

La empresa realiza las siguientes actividades las cuales forman parte de la cadena de suministro, en el cual tenemos los siguientes componentes:

#### 3.2.1.1 *Los proveedores*

En la primera etapa de la SCM los proveedores abastecen a la empresa de materias primas o productos terminados, los cuales se distribuyen a los clientes mayoristas y minoristas.

#### 3.2.1.2 *Recepción de productos*

La segunda etapa de la SCM consiste en recibir la mercadería para ser almacenada verificando su código, la cantidad y el estado de la mercadería que se está ingresando en la bodega.

#### 3.2.1.3 *Almacenamiento*

La tercera etapa de la SCM consiste en almacenar adecuadamente el producto según su código y la respectiva ubicación, para evitar que no se deteriore y tenga mayor flexibilidad al momento de manipular o estibar la mercadería.

#### 3.2.1.4 *Recepción de pedido*

Consiste en que cada vendedor digite las ventas que ha realizado durante el día, especificando las cantidades de cada producto vendido con toda la información del cliente y a la vez se verifica cada pedido con la existencia de la mercadería que se encuentra en la bodega.

#### *3.2.1.5 Facturación*

Esta etapa de la SCM consiste en la facturación de los pedidos de cada cliente, verificando las cantidades de producto y controlando el inventario que se encuentra en el sistema. A sus vez se encarga de estar pendiente de los cobros y pagos de las factura.

#### *3.2.1.6 Asignación de vehículo*

Consiste en asignar el vehículo con su respectiva guía de embarque, donde se especifica las cantidades que se va a embarcar de mercadería, la cantidad de facturas que sale para cada camión con sus respectivo ruteo de mapa con los datos de los clientes que se especifica en las facturas.

#### *3.2.1.7 Preparación de pedido*

Esta etapa de la SCM consiste en seleccionar y recoger las mercancías de sus lugares de almacenamiento, esto se realiza con la guía de embarque donde se especifican las cantidades de cajas o unidades de cada producto que se han facturado. El picking se lo realiza de forma manual.

#### *3.2.1.8 Distribución*

Esta etapa consiste en que cada camión realiza su ruteo según los mapas que se han entregado con las facturas de cada cliente que se procesó. En esta etapa estará enfocado el presente proyecto de Graduación.

### 3.2.1.9 Entrega del cliente

En esta etapa de la SCM, consiste en entregar el producto final al cliente con su respectiva factura.

## 3.3 Cronograma de actividades

A continuación se detallan las actividades que se planificarán para la elaboración del proyecto, donde se describen específicamente las actividades en un período de tiempo semanal en el cual se va a desarrollar cada avance del proyecto.

Fases	ACTIVIDADES	OCTUBRE				NOVIEMBRE				DICIEMBRE				ENERO				
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Definición del problema	Definir grupo de trabajo.																	
	Elaboración de preguntas para entrevista.																	
	Visita a la empresa																	
	Definición de tema de proyecto.																	
	Definición de Objetivos																	
Planeación y recolección de información	Entrevista con el gerente de la empresa																	
	Análisis de la información obtenida																	
	Elaboración de flujo de información.																	
	Elaboración de actividad de la empresa																	
	Elaboración de Diagrama de Gantt.																	
Analizar la información y presentación de los resultados	Definir los parámetros de trabajo																	
	Desarrollo del modelo tarifario de transporte																	
	Desarrollo de la heurística y Metaheurística																	

Figura 3. 4 Cronograma de actividades

Fuente: Creado por las autoras

# CAPÍTULO 4

## PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

En este capítulo se muestra la aplicación de la heurística de Clarke & Wright y la metaheurística de Recocido Simulado para obtener las rutas que optimizan los costos de distribución de la empresa. Así como también mediante el modelo tarifario de transporte se obtuvo el costo por kilómetro recorrido.

Como se vio en el capítulo 1 los clientes de la empresa se encuentran distribuidos en dos grandes zonas que son: el norte de Guayaquil y dos cantones fuera de la ciudad.

El presente proyecto se enfocará en la zona norte de Guayaquil, específicamente en los sectores que presentan mayor porcentaje de devoluciones. Con el cual se eligió 60 clientes que se encuentran dentro de estos sectores.

La empresa utiliza los camiones de 2.8 toneladas para la zona norte de Guayaquil los cuales pueden transportar hasta 400 cajas.

### 4.1 Obtención de los datos

La empresa tiene un registro de la ubicación de los clientes, la demanda de cada uno de ellos y las ventanas de tiempo en la cual ellos deben ser atendidos.

Como la empresa no posee un sistema de GPS para obtener las coordenadas se utilizó el programa Google Maps. Con esta información se pudo calcular las distancias entre cada cliente.

#### 4.1.1 Coordenada de los clientes

Para determinar las rutas es necesario obtener las coordenadas geográficas de los clientes para así poder determinar la distancia entre ellos, estas coordenadas se pueden observar en la tabla 4.1.

	<b>Coordenada x</b>	<b>Coordenada Y</b>
<b>1</b>	-2.099	-79.938
<b>2</b>	-2.124	-79.912
<b>3</b>	-2.123	-79.911
<b>4</b>	-2.124	-79.910
<b>5</b>	-2.130	-79.912
<b>6</b>	-2.120	-79.910
<b>7</b>	-2.131	-79.909
<b>8</b>	-2.148	-79.884
<b>9</b>	-2.070	-79.926
<b>10</b>	-2.069	-79.935
<b>11</b>	-2.072	-79.936
<b>12</b>	-2.068	-79.931
<b>13</b>	-2.071	-79.931
<b>14</b>	-2.074	-79.925
<b>15</b>	-2.128	-79.902
<b>16</b>	-2.127	-79.904
<b>17</b>	-2.126	-79.900
<b>18</b>	-2.130	-79.902
<b>19</b>	-2.132	-79.905
<b>20</b>	-2.150	-79.892
<b>21</b>	-2.149	-79.896
<b>22</b>	-2.144	-79.906
<b>23</b>	-2.175	-79.886

24	-2.176	-79.886
25	-2.174	-79.885
26	-2.171	-79.886
27	-2.099	-79.908
28	-2.100	-79.906
29	-2.097	-79.906
30	-2.096	-79.909
31	-2.093	-79.907
32	-2.091	-79.905
33	-2.091	-79.901
34	-2.128	-79.929
35	-2.132	-79.928
36	-2.137	-79.924
37	-2.127	-79.934
38	-2.125	-79.936
39	-2.123	-79.920
40	-2.167	-79.898
41	-2.160	-79.899
42	-2.167	-79.905
43	-2.165	-79.909
44	-2.150	-79.907
45	-2.152	-79.900
46	-2.154	-79.910
47	-2.116	-79.918
48	-2.113	-79.908
49	-2.116	-79.902
50	-2.118	-79.891
51	-2.118	-79.897
52	-2.048	-79.953
53	-2.053	-79.958
54	-2.048	-79.891
55	-2.050	-79.877
56	-2.058	-79.876
57	-2.066	-79.893
58	-2.069	-79.907
59	-2.091	-79.965
60	-2.108	-79.967
61	-2.113	-79.970

*Tabla 4. 1 Coordenadas de los clientes.*

**Fuente: Creado por las autoras**

#### 4.1.2 Cálculo de las distancias

Para calcular las distancias entre clientes y depósito no es conveniente utilizar la métrica euclidiana debido a que la distancia más corta entre dos puntos no necesariamente es la recta que une estos puntos. Como sabemos las calles de Guayaquil describen manzanas y partiendo del supuesto de que éstas son rectangulares, se aplicará la métrica de Manhattan que permite obtener la menor distancia entre dos puntos  $P_1(x_1, y_1)$  y  $P_2(x_2, y_2)$  y está dada por la ecuación 4.1.

$$d(P_1, P_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (4.1)$$

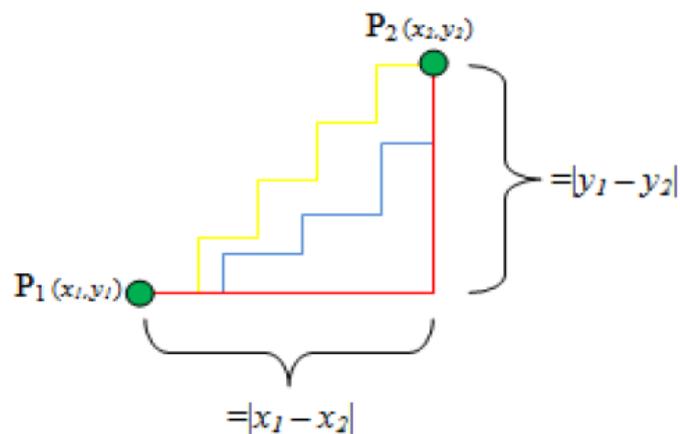


Figura 4. 1 Distancia entre  $P_1$  y  $P_2$  por la métrica de Manhattan

**Fuente: Creado por las autoras**

### 4.1.3 Demanda y ventana de tiempo

En la tabla 4.2 se observa la demanda para cada cliente así como también las ventanas de tiempo en las que debe ser atendido.

	<b>Demanda</b>	<b>Ventana Inferior (horas)</b>	<b>Ventana Superior (horas)</b>
<b>1</b>	0	7	18
<b>2</b>	150	10	17
<b>3</b>	90	12	17
<b>4</b>	70	10	16
<b>5</b>	200	8	12
<b>6</b>	100	9	12
<b>7</b>	150	10	15
<b>8</b>	90	13	17
<b>9</b>	70	7	12
<b>10</b>	200	10	17
<b>11</b>	120	12	17
<b>12</b>	40	13	17
<b>13</b>	50	7	11
<b>14</b>	32	7	12
<b>15</b>	50	9	15
<b>16</b>	100	9	15
<b>17</b>	200	12	17
<b>18</b>	99	14	17
<b>19</b>	80	15	17
<b>20</b>	90	9	12
<b>21</b>	91	13	17
<b>22</b>	93	7	12
<b>23</b>	117	12	17
<b>24</b>	135	10	17
<b>25</b>	92	9	12
<b>26</b>	183	12	17
<b>27</b>	107	7	12
<b>28</b>	136	13	17

29	110	12	17
30	169	7	12
31	199	12	17
32	94	7	12
33	162	13	17
34	84	10	17
35	122	15	17
36	54	13	17
37	145	10	17
38	85	12	17
39	129	7	12
40	63	12	17
41	132	10	17
42	175	13	17
43	192	10	17
44	128	12	17
45	73	9	15
46	79	10	17
47	148	9	15
48	97	10	17
49	157	12	17
50	147	9	15
51	195	12	17
52	118	9	12
53	51	9	12
54	100	10	17
55	78	9	15
56	175	10	17
57	198	12	17
58	193	9	15
59	183	9	12
60	175	10	17
61	133	12	17

*Tabla 4. 2 Demanda y ventana de tiempo de los clientes*  
**Fuente: Creado por las autoras**

## 4.2 Modelo tarifario de transporte

En la ecuación 4.2 se puede observar que el costo de distribución es igual al costo fijo más el costo variable por la distancia del punto  $P_1 (x_1, y_1)$  al punto  $P_2 (x_2, y_2)$ .

$$\text{Costo de distribución} = \text{Costo Fijo} + \text{Costo Variable} * \text{Distancia} \quad (4.2)$$

La cual se obtiene del siguiente modelo tarifario donde podremos observar los costos fijos y variables.

<b>Modelo Tarifario de Transporte</b>	
<b>Fijo</b>	
<b>Chasis + Furgón</b>	Compra
<b>(a) Chasis + Furgón</b>	al año
<b>(b) Matrícula</b>	al año
<b>(c) Seguro</b>	al año
<b>Baterías</b>	Compra
<b>(d) Batería</b>	al año
<b>Sueldo Chofer + ayudantes</b>	Mensual
<b>(e) Sueldo Chofer</b>	al año
<b>(f) Lavado</b>	lavados al año
<b>(g) Mantenimiento anual</b>	chasis + furgón
<b>Costo anual (a+b+c+d+e+f+g)</b>	
<b>Variable</b>	
<b>Diesel/Gasolina</b>	U\$ /gln
<b>Combustible</b>	km/gln
<b>(h) Costo combustible</b>	por km
<b>Llantas [4 llantas]</b>	Compra
<b>Rendimiento promedio llantas</b>	Km
<b>(i) Costo llantas</b>	por km
<b>Aceite y Filtro</b>	Usd
<b>Tiempo de cambio</b>	Km
<b>(j) Costo aceite y filtro</b>	Km
<b>Costo por km (h+i+j)</b>	

Tabla 4. 3 Modelo Tarifario de Transporte  
Fuente: Creado por las autoras

Entre los costos fijos se tiene:

- Costo de adquisición del vehículo: Valor que da la concesionaria, también se consideró la depreciación anual del vehículo a adquirir teniendo en cuenta la vida útil del vehículo que es de cinco años.
- Costo de matriculación: Según lo dispuesto por la Comisión de Tránsito del Ecuador este valor se paga un porcentaje del 2.5% anual del valor del chasis.
- Costo del seguro: Se considera con respecto con la compañía aseguradora y se paga el 4.5% sobre el valor del vehículo.
- Costo de batería: se determinó el costo por medio del personal que trabaja en las distintas concesionarias automotriz, y en cada camión se requiere dos bacterias. El costo de la bacteria es de \$136.66 cada una.
- Costos de sueldos: Estos costos se obtuvo según los datos de la empresa y el pago anual de \$16,474 por la nómina.
- Costo de lavado: según el personal de trabajo el costo de tener una adecuada limpieza del camión es de \$40 dólares mensuales.
- Costo de mantenimiento: para la conservación del vehículo se deben realizar un mantenimiento anual. Este incurre un costo según las necesidades del camión.

Entre los costos variables se tiene:

- Costo de combustible: Para determinar el precio por galón de combustible que corresponda para cada vehículo. El precio de diésel es de \$1.04 por galón.

$$\text{Precio Combustibles} = \frac{\$}{\text{galón}}$$

- Costos de llantas: Para determinar el costo de las llantas debemos tener en cuenta el rendimiento que necesita cada vehículo y eso depende de los kilómetros que recorre diariamente.

$$(\text{Costo llantas}) \left( \frac{\$}{\text{km}} \right) = \frac{\text{Precio de llantas} * \text{cantidad de llantas}}{\text{Rendimiento de llantas}}$$

- Costo de aceites y filtro: El cambio de aceite es necesario para mantener un correcto mantenimiento del vehículo y esto acarrea un costo. Los costos de los filtros que se consumen están establecido por tres tipo de cambio que son:

- Filtro de aceite.
- Filtro de combustible.
- Filtro de aire.

$$(\text{Costo aceite}) \left( \frac{\$}{\text{km}} \right) = \text{Precio} * \text{Consumo} = \frac{\$}{\text{galón}} * \frac{\text{galón}}{\text{km}}$$

### 4.3 Heurística de Clarke & Wright

Se programó la heurística en el software Wolfram Mathematica siguiendo los siguientes pasos:

1. Inicialización: Para cada cliente  $i$  construir la ruta  $(1, i, 1)$ .
2. Cálculos de los ahorros: Se calcula  $S_{ij} = C_{i1} + C_{1j} - C_{ij}$  para cada par de clientes  $i$  y  $j$ .
3. Mejorar la unión: Sea  $S_{i^*j^*} = \max S_{ij}$ , donde el máximo se toma entre los ahorros que no han sido considerados todavía. Sean  $r_{i^*}$  y  $r_{j^*}$  las rutas que contienen a los clientes  $i^*j^*$ . Si  $i^*$  es el último cliente de  $r_{i^*}$  y  $j^*$  es el primer cliente de  $r_{j^*}$  y la combinación de  $r_{i^*}$  y  $r_{j^*}$  es factible, entonces se combinan.
4. Eliminar  $S_{i^*j^*}$  de futuras consideraciones: Si quedan ahorros por examinar ir al paso 3, sino terminar.

*Algoritmo 3 Clarke & Wright*

**Fuente: Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP)**

### 4.4 Recocido Simulado

Para la construcción del recocido el cual nos permitirá resolver el problema de distribución de la empresa se necesita determinar una solución inicial la cual la obtenemos con la heurística Clarke & Wright la cual nos proporciona un

resultado que respeta la capacidad de los vehículos pero no toma en cuenta las ventanas de tiempo.

Se necesita también generar un vecindario del cual se escogerá aleatoriamente un vecino y una función de costos en la cual se verifica que las rutas cumplan con la restricción de las ventanas de tiempo.

El resultado final es un conjunto de rutas que cumplen no solo con la restricción de capacidad de los vehículos sino también con las ventanas de tiempo establecidas para los clientes, así como también la distancia total recorrida.

Se va a seguir el siguiente algoritmo general del Recocido Simulado para solucionar el problema del VRPTW.

```

To = Temperatura inicial
Tf = Temperatura final
L = Intercambios por cada temperatura
 $\alpha$  = factor de enfriamiento
Solucion Actual = clarkeandwrigth[matrizahorro, coordenada]
Mientras  $To \geq Tf$ 
  Para  $i = 1$  hasta  $L$ 
    Solucion Candidata = VECUNO[CantVeci[n]]
    delta = Costomatriz[Solucion Candidata]
           - Costomatriz[SolucionActual];
    Random = Aleatorio uniforme (0,1);
    Si  $\left( \text{Random} < e^{-\frac{\text{delta}}{To}} \right)$  o  $(\text{delta} < 0)$ 
      Solucion = Agregar[Solucion, Solucion Actual]
    Fin Si
  Fin Mientras

```

```
Solucion = Agregar[Solucion, Solucion Actual];  
Fin Para  
To =  $\alpha$  * To;  
Fin Mientras  
Para k = 1 hasta Longitud[Solucion]  
FSolucion = Agregar[FSolucion, Costomatriz[Solucion[k]]];  
Fin Para
```

*Algoritmo 4 Recocido Simulado (Algoritmo General)*  
**Fuente: Creado por las autoras**

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos con la implementación de la heurística y la metaheurística. Se podrá comparar los resultados con la situación actual de la empresa.

Los resultados del Recocido Simulado permitirán a la empresa realizar una correcta distribución de los productos mediante las rutas obtenidas. Así como también obtener el costo de transportación mediante el modelo tarifario de transporte.

### 5.1 Resultados del modelo tarifario de transporte

Mediante el modelo se obtuvo la ecuación lineal que nos permite conocer cuál será el costo de cada ruta y el costo total de distribución.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

<b>Modelo Tarifario de Transporte</b>		
<b>Camión</b>		<b>CHEVROLET 2.8TM</b>
<b>Fijo</b>		
<b>Chasis + Furgón</b>	Compra	27.490,00
<b>(a) Chasis + Furgón</b>	Al año [ V.U. 5 años]	5.498
<b>(b) Matrícula</b>	Al año	687
<b>(c) Seguro</b>	Al año (4%)	1.100
<b>Baterías</b>	Compra	136,66
<b>(d) Batería</b>	Al año [ V.U. 1 año]	306

<b>Sueldo Chofer + ayudantes</b>	Mensual	1.373
<b>(e) Sueldo Chofer</b>	Al año	16.474
<b>(f) Lavado</b>	12 lavados al año	480
<b>(g) Mantenimiento anual</b>	4% chasis + furgón	1.100
<b>Costo anual (a+b+c+d+e+f+g)</b>		<b>25.644</b>
<b>Variable</b>		
<b>Diésel/Gasolina</b>	U\$ /gln	1,04
<b>Combustible</b>	km/gln	19
<b>(h) Costo combustible</b>	por km	0,055
<b>Llantas [4 llantas]</b>	Compra	1000
<b>Rendimiento promedio llantas</b>	Km	80.000
<b>(i) Costo llantas</b>	por km	0,010
<b>Aceite y Filtro</b>	Usd	76,32
<b>Tiempo de cambio</b>	Km	5.000
<b>(j) Costo aceite y filtro</b>	Km	0,015
<b>Costo por km (h+i+j)</b>		<b>0,08250</b>

Tabla 5. 1 Resultado Modelo Tarifario de Transporte

Fuente: Creado por las autoras

<b>Resultados</b>	
<b>Días x año</b>	300
<b>Camión x día (fijo)</b>	99
<b>Por km (Variable)</b>	0,0825

Tabla 5. 2 Costo fijo y variable del Modelo Tarifario de Transporte

Fuente: Creado por las autoras

Entonces la ecuación lineal del costo de distribución quedaría de la siguiente manera:  $Costo\ de\ distribución = 99 + 0,0825 * Distancia$

Se puede observar la gráfica de la ecuación lineal del costo de distribución en la figura 5.1.

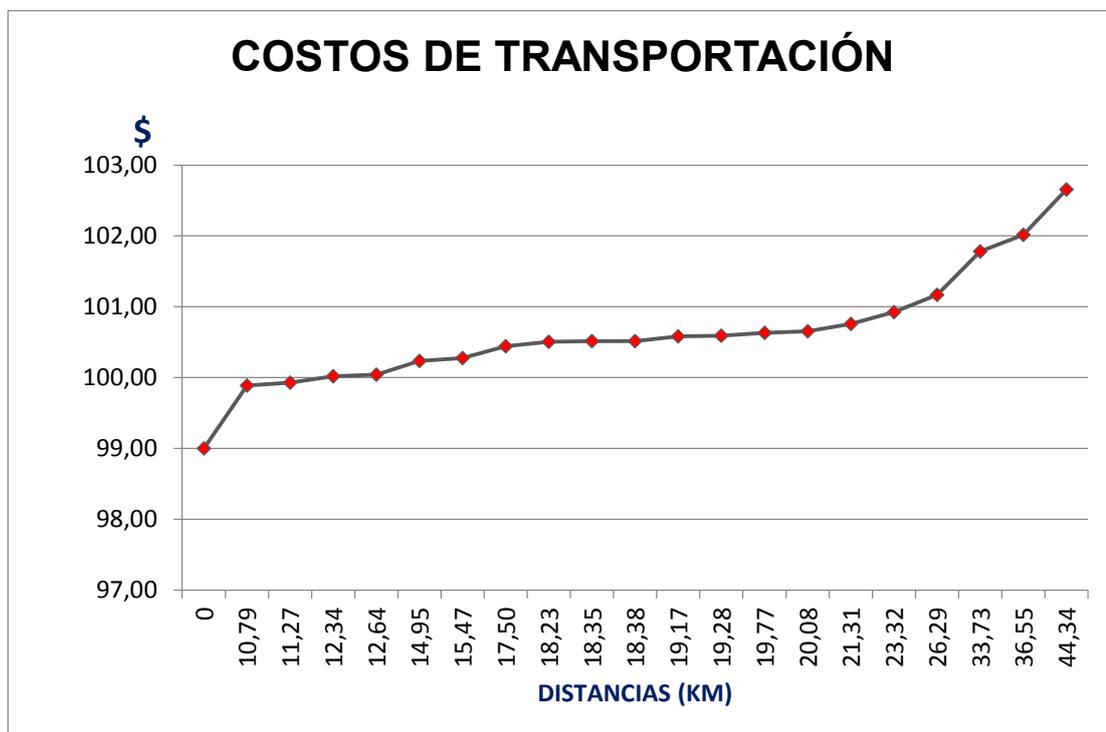


Figura 5. 1 Grafica ecuación de distribución

Fuente: Creado por las autoras

## 5.2 Resultados de la heurística y metaheurística

La heurística de Clarke & Wright nos da como resultado un conjunto de 20 rutas con una distancia total recorrida de 506.39 kilómetros. El costo de distribución es igual a \$ 2021.78.

<b>Ruta 1</b>	{1, 24, 25, 23, 15,
<b>Ruta 2</b>	{1,26,55,14,1}
<b>Ruta 3</b>	{1,40,8,56,20,1}
<b>Ruta 4</b>	{1,42,41,18,1}
<b>Ruta 5</b>	{1,54,43,19,1}
<b>Ruta 6</b>	{1,21,45,53,1}
<b>Ruta 7</b>	{1,46,44,22,1}
<b>Ruta 8</b>	{1,57,50,1}
<b>Ruta 9</b>	{1,17,52,12,1}
<b>Ruta 10</b>	{1,16,7,58,1}

<b>Ruta 11</b>	{1,51,5,4,1}
<b>Ruta 12</b>	{1,6,49,36,3,1}
<b>Ruta 13</b>	{1,2,33,61,1}
<b>Ruta 14</b>	{1,48,35,60,1}
<b>Ruta 15</b>	{1,9,32,39,34,1}
<b>Ruta 16</b>	{1,47,31,1}
<b>Ruta 17</b>	{1,13,29,59,1}
<b>Ruta 18</b>	{1,10,28,1}
<b>Ruta 19</b>	{1,37,30,27,1}
<b>Ruta 20</b>	{1,11,38,1}

*Tabla 5. 3 Rutas generadas por la heurística de Clarke & Wright*  
**Fuente: Creado por las autoras**

Este conjunto de rutas es la solución inicial para la implementación del Recocido Simulado.

Se realizaron cinco iteraciones con el Recocido Simulado con diferentes parámetros de temperatura y factor de enfriamiento, en el cual se obtuvo los siguientes resultados.

<b>ITERACIÓN</b>	<b>COSTO CLARKE &amp; WRIGHT</b>	<b>COSTO RECOCIDO SIMULADO</b>	<b>COSTO ACTUAL</b>
<b>1</b>	\$ 2021.78	\$ 2014.30	\$ 2300.00
<b>2</b>	\$ 2021.78	\$ 2015.45	\$ 2300.00
<b>3</b>	\$ 2021.78	\$ 2015.87	\$ 2300.00
<b>4</b>	\$ 2021.78	\$ 2014.91	\$ 2300.00
<b>5</b>	\$ 2021.78	\$ 2014.13	\$ 2300.00

*Tabla 5. 4 Análisis de costos*  
**Fuente: Creado por las autoras**

La mejor solución del recocido simulado es la siguiente:

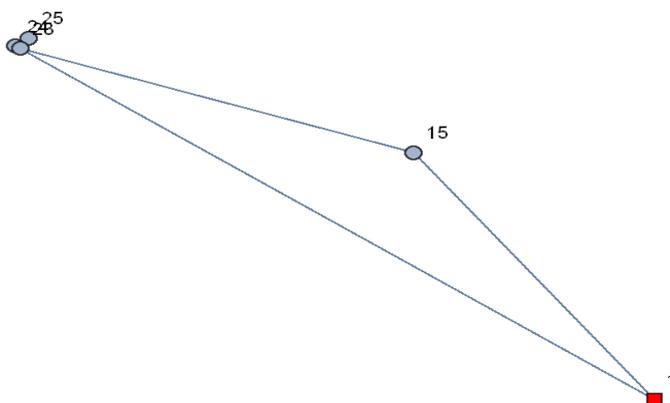
		<b>Costo de la ruta</b>	<b>Distancia recorrida (km)</b>
<b>Ruta 1</b>	{1,24,25,23,15,1}	\$ 101.17	26.292
<b>Ruta 2</b>	{1,26,55,14,1}	\$ 102.02	36.552
<b>Ruta 3</b>	{1,40,8,56,20,1}	\$ 102.66	44.337
<b>Ruta 4</b>	{1,42,41,18,1}	\$ 100.76	21.307
<b>Ruta 5</b>	{1,54,43,19,1}	\$ 101.78	33.727
<b>Ruta 6</b>	{1,21,45,17,1}	\$ 100.58	19.174
<b>Ruta 7</b>	{1,46,44,22,1}	\$ 100.44	17.502
<b>Ruta 8</b>	{1,57,50,1}	\$ 100.66	20.076
<b>Ruta 9</b>	{1,53,52,12,1}	\$ 100.28	15.469
<b>Ruta 10</b>	{1,16,7,58,1}	\$ 100.63	19.769
<b>Ruta 11</b>	{1,51,5,4,1}	\$ 100.23	14.948
<b>Ruta 12</b>	{1,6,49,36,3,1}	\$ 100.59	19.277
<b>Ruta 13</b>	{1,2,33,61,1}	\$ 100.92	23.322
<b>Ruta 14</b>	{1,48,35,60,1}	\$ 100.52	18.376
<b>Ruta 15</b>	{1,9,32,39,34,1}	\$ 100.50	18.225
<b>Ruta 16</b>	{1,47,31,1}	\$ 99.89	10.787
<b>Ruta 17</b>	{1,13,29,59,1}	\$ 100.51	18.345
<b>Ruta 18</b>	{1,10,28,1}	\$ 100.04	12.641
<b>Ruta 19</b>	{1,37,30,27,1}	\$ 100.02	12.339
<b>Ruta 20</b>	{1,11,38,1}	\$ 99.93	11.268
<b>Total</b>		<b>\$ 2014.13</b>	<b>413.740</b>

*Tabla 5. 5 Resultados del Recocido Simulado*

**Fuente: Creado por las autoras**

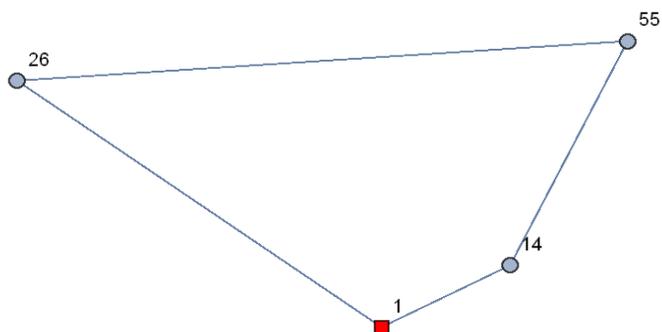
## RUTA 1

Los clientes son  $\{1,24,25,23,15,1\}$ , la distancia total es 26.2926 km con un costo total de transportación \$101.17



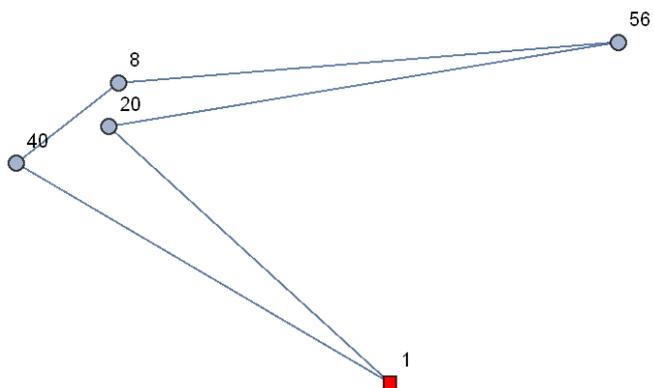
## RUTA 2

Los clientes son  $\{1,26,55,14,1\}$ , la distancia total es 36.5524 km con un costo total de transportación \$102.02



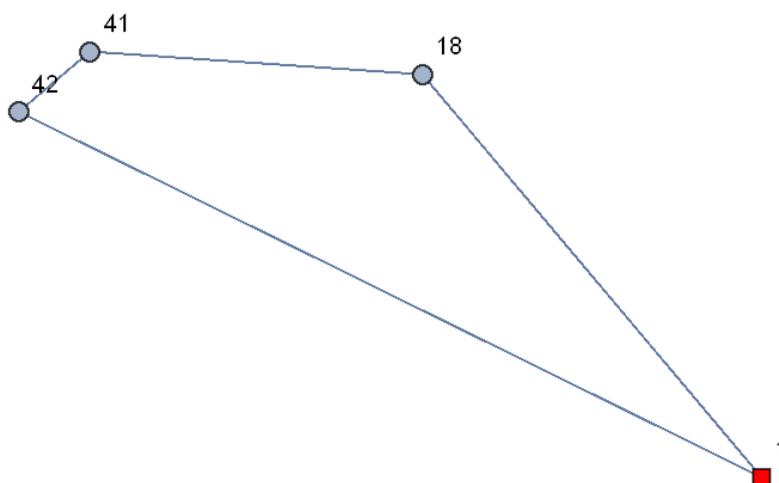
## RUTA 3

Los clientes son  $\{1,40,8,56,20,1\}$ , la distancia total es 44.3374 km con un costo total de transportación \$102.66.



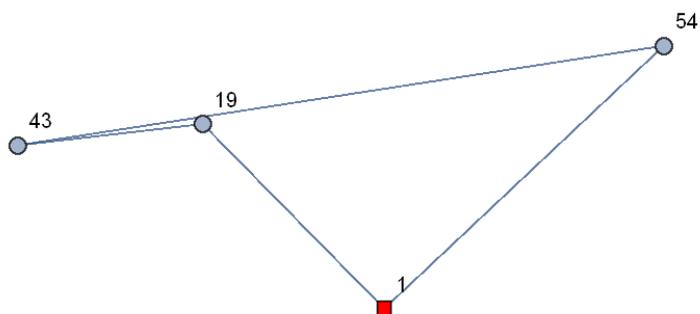
## RUTA 4

Los clientes son  $\{1,42,41,18,1\}$ , la distancia total es 21.3076 km con un costo total de transportación \$100.76



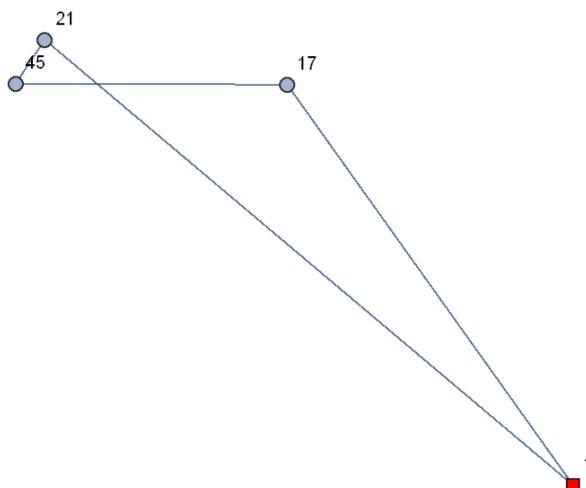
## RUTA 5

Los clientes son  $\{1,54,43,19,1\}$ , la distancia total es 33.7274 km con un costo total de transportación \$101.78



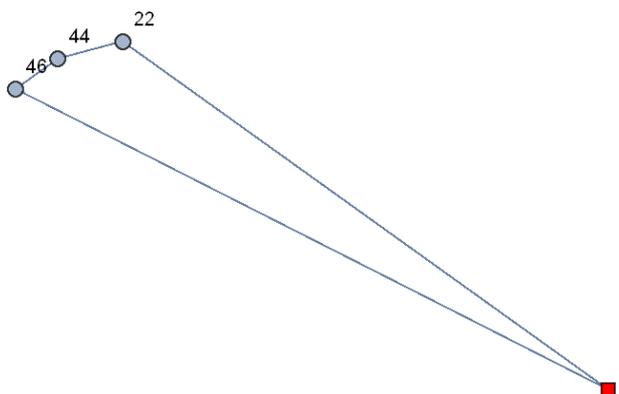
## RUTA 6

Los clientes son  $\{1,21,45,17,1\}$ , la distancia total es 19.1742 km con un costo total de transportación \$100.58



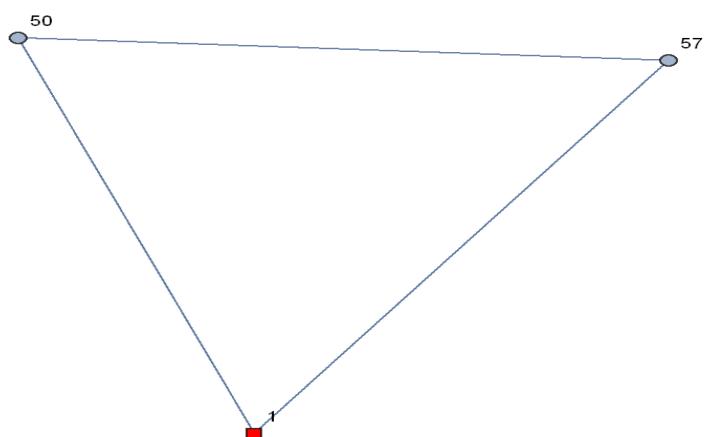
## RUTA 7

Los clientes son  $\{1,46,44,22,1\}$ , la distancia total es 17.5022 km con un costo total de transportación \$100.44



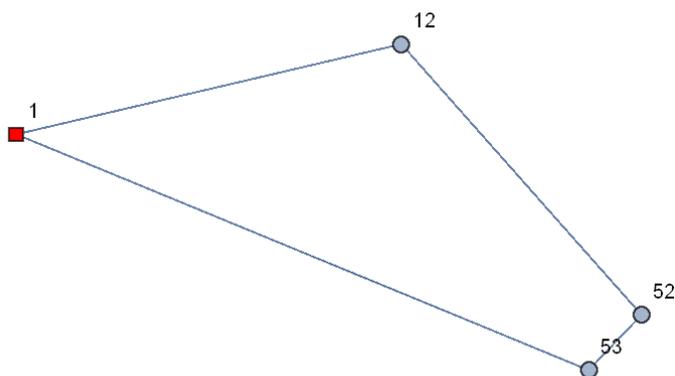
## RUTA 8

Los clientes son  $\{1,57,50,1\}$ , la distancia total es 20.0768 km con un costo total de transportación \$100.66



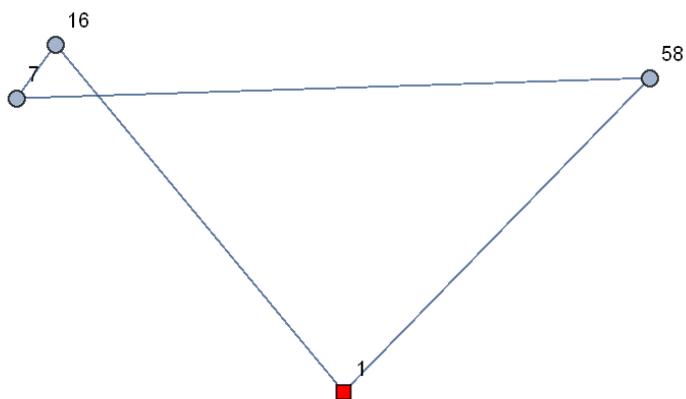
## RUTA 9

Los clientes son  $\{1,53,52,12,1\}$ , la distancia total es 15.4692 km con un costo total de transportación \$100.28



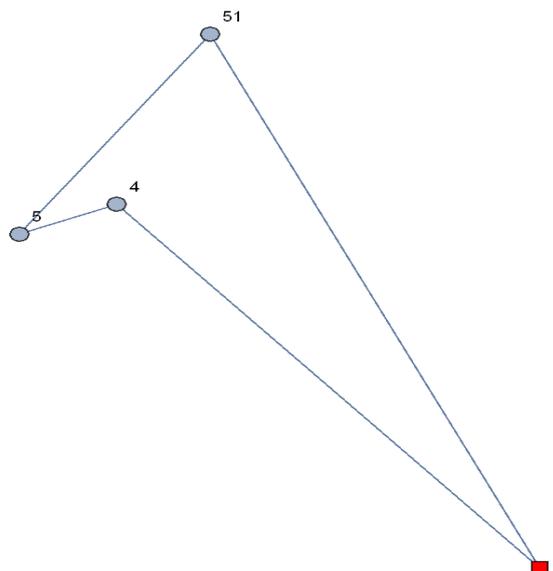
## RUTA 10

Los clientes son  $\{1,16,7,58,1\}$ , la distancia total es 19.7694 km con un costo total de transportación \$100.63



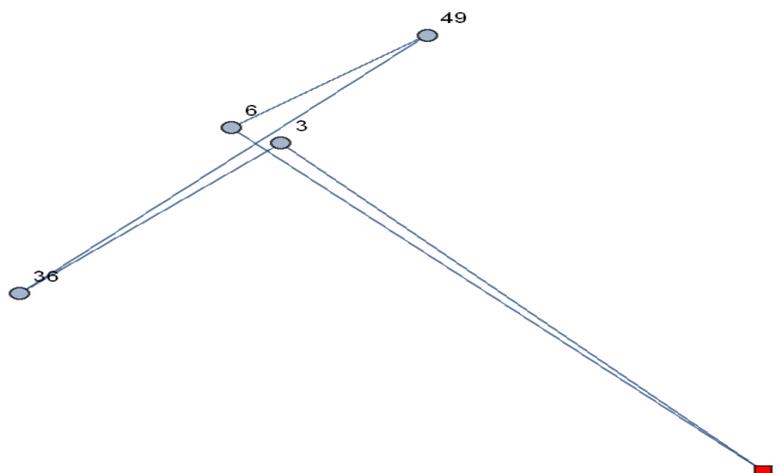
## RUTA 11

Los clientes son {1,51,5,4,1}, la distancia total es 14.948 km con un costo total de transportación \$100.23



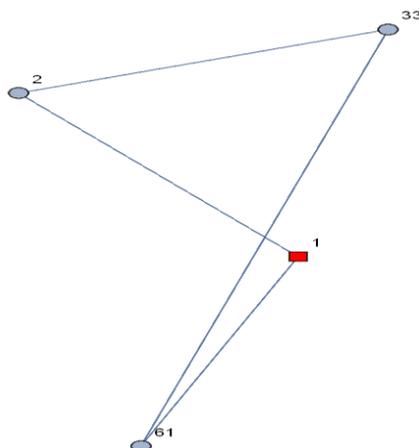
## RUTA 12

Los clientes son {1,6,49,36,3,1}, la distancia total es 19.2778 km con un costo total de transportación \$100.59



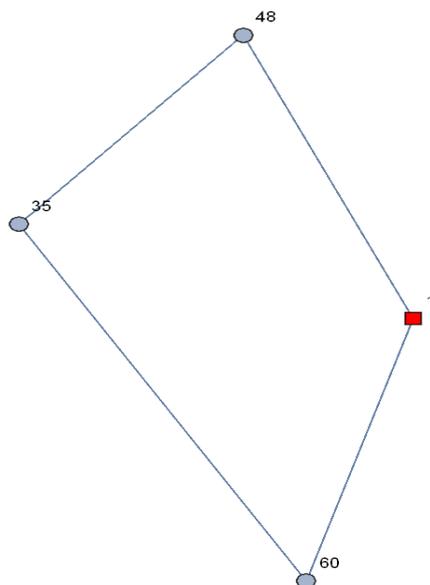
## RUTA 13

Los clientes son  $\{1,2,33,61,1\}$ , la distancia total es 23.322 km con un costo total de transportación \$100.92



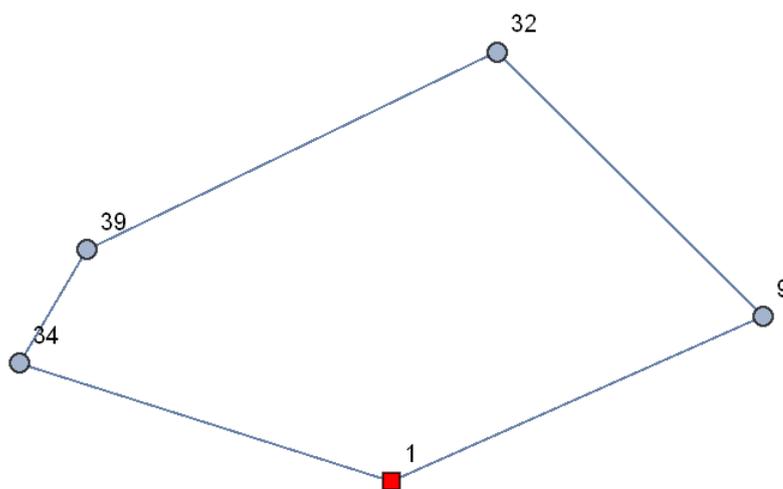
## RUTA 14

Los clientes son  $\{1,48,35,60,1\}$ , la distancia total es 18.3762 km con un costo total de transportación \$100.52



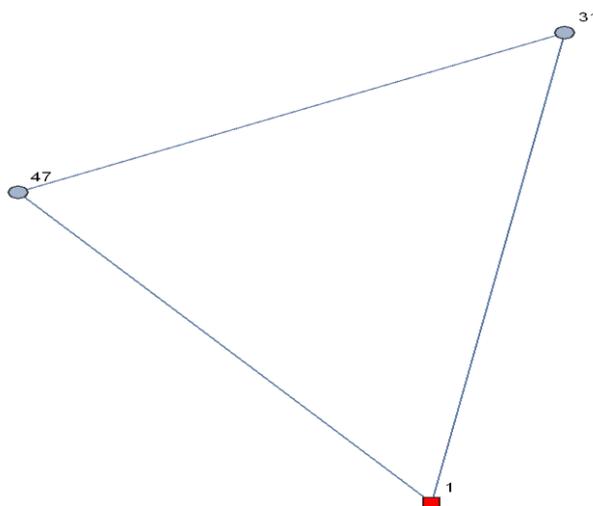
## RUTA 15

Los clientes son  $\{1,9,32,39,34,1\}$ , la distancia total es 18.225 km con un costo total de transportación \$100.50



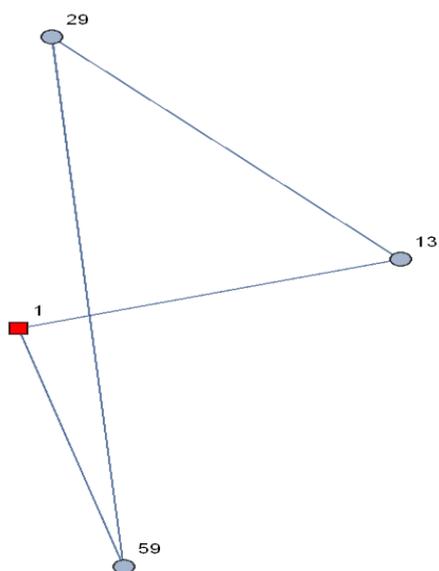
## RUTA 16

Los clientes son  $\{1,47,31,1\}$ , la distancia total es 10.7874 km con un costo total de transportación \$99.89



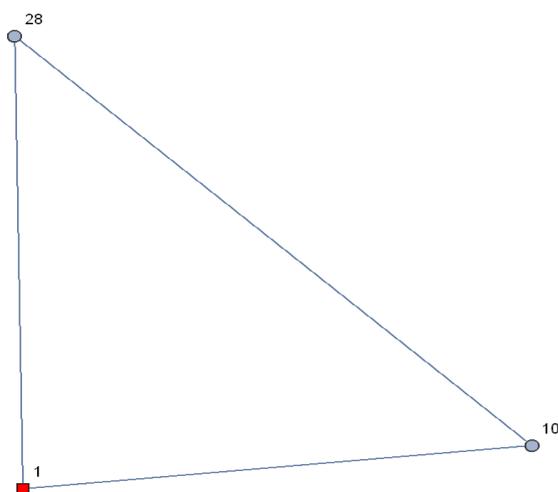
## RUTA 17

Los clientes son  $\{1,13,29,59,1\}$ , la distancia total es 18.3458 km con un costo total de transportación \$100.51



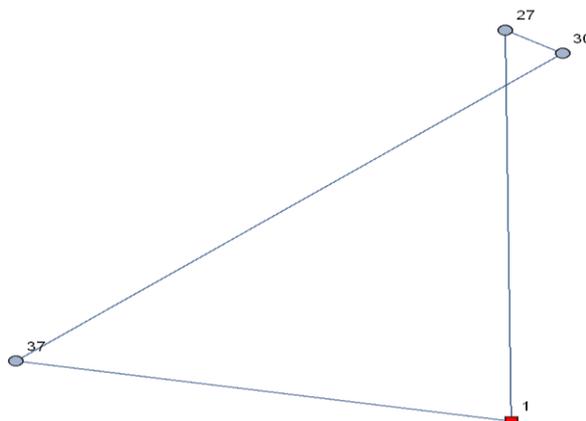
## RUTA 18

Los clientes son  $\{1,10,28,1\}$ , la distancia total es 12.6412 km con un costo total de transportación \$100.04



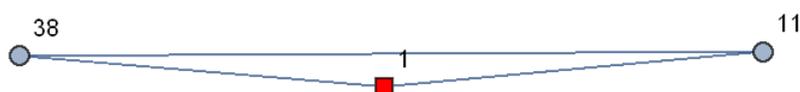
## RUTA 19

Los clientes son  $\{1,37,30,27,1\}$ , la distancia total es 12.3392 km con un costo total de transportación \$100.02



## RUTA 20

Los clientes son  $\{1,11,38,1\}$ , la distancia total es 11.2686 km con un costo total de transportación \$99.9297



La empresa facilitó y apoyo con la propuesta que permitió realizar un control de las devoluciones, donde se logró reducir el volumen de productos retornados que corresponde a los errores de entrega, haciendo una comparación con los meses de Noviembre y Diciembre, que se espera una diferencia de 10% con respectos a los porcentajes de devoluciones, mejorando

el tiempo de despacho en todas las zonas y aumentando el nivel de servicio en un 19%. (Ver la figura 5.7)

Para el cálculo del nivel de servicio se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Nivel de servicio} = \frac{\left( \frac{\text{total Entregado} - \text{total no entregado}}{\text{total ventas}} \right)}{100}$$

Devolución por Ruta						
	Noviembre			Diciembre		
	TOTFACT	TOTENTREGA	TOTDEVOLU	TOTFACT	TOTENTREGA	TOTDEVOLU
1	2,708.19	2,544.61	163.58	2,708.19	2,544.61	163.58
2	2,971.14	1,682.35	1,288.79	2,971.14	2,682.35	288.79
3	505.05	505.05	-	505.05	505.05	-
4	2,379.15	1,010.05	1,369.10	2,379.15	2,310.05	69.10
5	2,041.96	1,875.96	166.00	2,041.96	2,005.96	36.00
6	4,870.03	4,727.06	142.97	5,870.03	5,727.06	142.97
7	3,706.79	3,534.59	172.20	3,706.79	3,534.59	172.20
8	5,841.00	5,204.37	636.63	5,841.00	5,204.37	636.63
9	3,200.21	1,684.46	1,515.75	3,200.21	2,684.46	515.75
10	2,835.98	2,620.51	215.47	2,835.98	2,620.51	215.47
11	5,137.78	4,773.99	363.79	5,137.78	5,135.99	1.79
12	5,137.78	4,773.99	363.79	5,137.78	5,137.78	-
13	2,730.36	2,587.10	143.26	2,730.36	2,587.10	143.26
14	3,485.98	2,935.54	550.44	3,485.98	2,935.54	550.44
15	3,746.39	3,640.41	105.98	3,746.39	3,640.41	105.98
16	2,685.40	2,503.74	181.66	2,685.40	2,603.74	81.66
17	3,921.94	3,776.17	145.77	4,921.94	4,920.17	1.77
18	2,759.65	2,010.68	748.97	2,759.65	2,610.68	148.97
19	3,487.27	3,036.49	450.78	3,487.27	3,476.49	10.78
20	2,991.38	2,021.34	970.04	2,991.38	2,821.34	170.04
	67,143.43	57,448.46	9,694.97	69,143.43	65,688.25	3,455.18

Tabla 5. 6 Devoluciones del mes de Noviembre y Diciembre

Fuente: Creado por las autoras

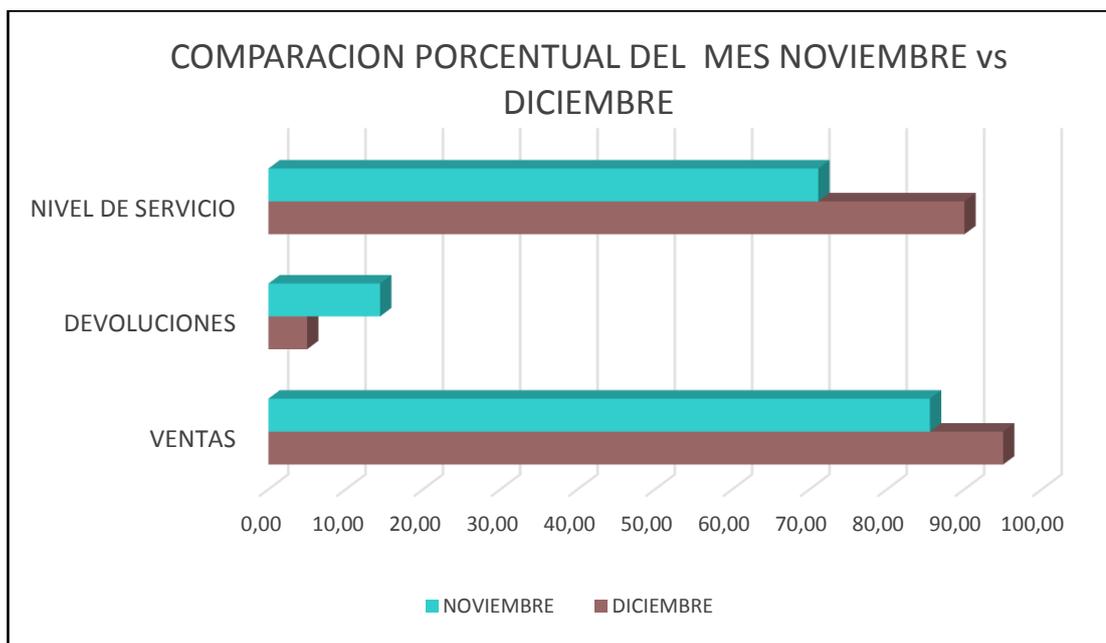


Figura 5. 2 Comparación porcentual de costos del mes de noviembre y diciembre.

**Fuente: Creado por las autoras**

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

En el presente trabajo se tuvo como propósito plantear una mejora en la cadena de distribución, aumentando el nivel de servicio y al mismo tiempo reducir los costos de transportación, a partir de un análisis de la situación actual de la empresa, elaborando un modelo tarifario para conocer la estructura de los costos fijos y variables. Identificando las variables que el personal de la empresa trata de optimizar.

Por lo tanto se puede concluir lo siguiente:

- Se pudo establecer el costo real de distribución de las ruta mediante los resultados del modelo tarifario de transporte expresado en la ecuación 5.1.
- Con la heurística de Clarke & Wright se obtuvo un conjunto de 20 rutas factibles con un costo de distribución de \$2021.78 y una distancia total recorrida de 506.39 kilómetros.
- Se obtuvo una mejor solución con la metaheurística de Recocido Simulado que respeta las ventanas de tiempo en las cuales debe ser atendido cada cliente, dando como resultado un conjunto de 20 rutas

factibles, con un costo de \$2014.13 y una distancia total recorrida de 413.74 kilómetros. Obteniendo una diferencia de \$7.65 y una reducción de distancia de 92.65 kilómetros, esto entre la heurística y la metaheurística.

- Aplicando la heurística y luego la metaheurística se lograra reducir el costo total de distribución de \$2300 a \$2014.13 y a su vez se reducen las distancias totales recorridas.
- Se espera reducir a un 10% las devoluciones de productos como consecuencia de una buena planificación y diseño de rutas lo que permite que los clientes sean atendidos en sus ventanas de tiempo establecidas logrando elevar el nivel de servicio a un 90%.

## 6.2 Recomendaciones

Las recomendaciones son proyectadas en base a las conclusiones y otros aspectos que se pudieron identificar durante la investigación que son:

- Se recomienda que la empresa obtenga un software como el GPS para poder controlar las rutas y así tener con exactitud las coordenadas de cada cliente, es decir la latitud y la longitud.
- Es recomendable que la empresa cuente con una base de datos con la finalidad de disponer con mayor facilidad la información para futuros proyectos en los que se tengan que utilizar modelos matemáticos o algoritmos de optimización.
- Se recomienda que la empresa aplique este modelo de planificación y diseño de rutas para todos sus clientes. Contratando personal especializado y capacitando a los empleados encargados del área de distribución.
- Para evitar los errores de despachos que ocasionaban un pequeño porcentaje de devoluciones, se recomienda capacitar el personal operativo para así aumentar su eficiencia en esta área.
- Se recomienda que el personal de ventas tenga una buena comunicación con el área de logística para evitar que se hagan pedidos de productos que no están en stock y con este mantener un buen nivel de servicio.

### 6.3 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto de graduación han sido satisfactorios, aunque pueden ser mejorados en muchos aspectos, entre los cuales tenemos:

- Implementar un nuevo CEDI aplicando un algoritmo de recubrimiento con la finalidad de obtener una mayor cobertura en las zonas.
- Se debería considerar utilizar datos consistentes con la realidad, ya que en la ejecución de la heurística se estableció la Métrica de Manhattan para calcular las distancias entre los clientes debido a las condiciones geográficas de la ciudad.
- La heurística debería tener una interfaz con sistemas de información geográfica para así poder georreferenciar las calles de la ciudad y poder obtener los puntos de entrega dependiendo de qué tan traficada sea esta, esto permitirá tener como resultado rutas con menos costo y resultados más precisos.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. S. Lapesqueur, *Estudio del problema de ruteo de vehículos con balance de carga: Aplicación de la meta-heurística Búsqueda Tabú*, Chia, Colombia, 2014.
- [2] C. L. R. R. Alcocer Marquino Johm Enrique, «Optimización de costos de distribución mediante el diseño de rutas de entrega aplicando el algoritmo VRPTW en una empresa distribuidora de productos de consumo masivo ubicada en la ciudad de Quevedo.,» Guayaquil, 2012.
- [3] D. B. Erwin, «El problema de la recolección de desechos hospitalarios en la ciudad de Guayaquil, modelación y resolución por medio de una heurística basada en la búsqueda Tabú,» Guayaquil, 2007.
- [4] D. y. Ramser, The Truck Dispatching Problem, vol. 6, 1959, pp. 80-91.
- [5] F. G. H. M. J. G. M. L. & P. M. F. T. Adenso Díaz ( Coordinador), «Libro Optimización Heurística y Redes Neuronales,» paraninfo, españa, 1996.
- [6] J. B. Magdalena Benavente, «Estado del Arte en el Problema de Ruteo Vehicular (VRP)».
- [7] J. C. F. Durán, «Uso de ACS hibridado para la resolución de un problema VRP multi-objetivo,» Concepción-Chile, 2011.
- [8] M. Estrada, «Redes de distribución,» de *Análisis de estrategias eficientes en lalogística de distribución de paquetería.* , 2007.
- [9] P. V. J. Tomalá Robles James, «Diseño de un sistema de soporte de decisiones para resolver el problema de ruteo en un servicio de Courier,» Guayaquil, 2010.
- [10] R. J. M. Johan Aquino Moreno, «Modelo de planeación de las rutas de distribución de un operador logístico,» 2010.
- [11] S. S. Fernando, *Métodos Exactos y Heurísticos para resolver el Problema del Agente Viajero (TSP) y el Problema de Ruteo de Vehículos (VRP).*, Guayauil, 2007.

- [12] V. D. Francisco, *Proyecto final de carrers*, Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, 2012.

# ANEXOS

# ANEXO 1 UBICACIÓN CLIENTES EN GOOGLE MAPS

