



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL
LITORAL**

Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas

Ingeniería en Logística y Transporte

“Programación de una metaheurística aplicada al problema de ruteo para una empresa de recolección de desechos hospitalarios ubicada en Guayaquil.”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE

PRESENTADO POR:

MISHELL LEONELA MERA LUZCANDO

CARLOS JOSUÉ FIGUEROA PEÑAFIEL

Guayaquil - Ecuador

2019

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre María del Carmen Luzcando Mora por ser mi luz, mi guía en las adversidades y a toda mi familia por creer en mí de que lograría esta meta en mi vida.

Mishell Leonela Mera Luzcando

Esta dedicatoria es gracias a su esfuerzo, su perseverancia y a su amor.
Amado Papá, Carlos Figueroa y Mamá, Yaneth Peñafiel.

Carlos Josué Figueroa Peñafiel

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme culminar mis estudios y darme la sabiduría necesaria en las adversidades. A mi madre en especial por ser el pilar fundamental en mi vida por ser tan incondicional y siempre creer en mí, por haberme ayudado a hacer posible esta meta. A mi padre y a mis hermanas por apoyarme en los momentos de adversidad durante mi etapa académica y por siempre haber estado para mí. También a cada una de esas personas especiales que Dios puso en mi camino durante estos cinco años que me ayudaron a lograr este objetivo. Gracias a nuestro tutor David De Santis por su apoyo y conocimientos impartidos que nos sirvieron para la culminación de este proyecto.

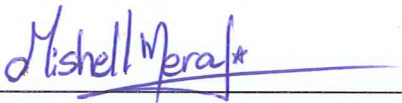
Mishell Leonela Mera Luzcando

Agradecido ante todo con Dios, por todo lo que tengo en estos momentos, debido a las adversidades ocurridas siempre ayudó a mi familia a siempre estar unida. Gracias a mis dos importantes pilares que son papá y mamá, gracias por ser tan únicos, ejemplares e indispensables en mi vida, por ser aquellos que siempre me apoyan hasta el final de sus tiempos. Gracias a mis amigos y a las personas que en mi camino me enseñaron muchas cosas y que siempre viven en mis pensamientos.

Carlos Josué Figueroa Peñafiel

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Mishell Leonela Mera Luzcando* y *Carlos Josué Figueroa Peñafiel* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

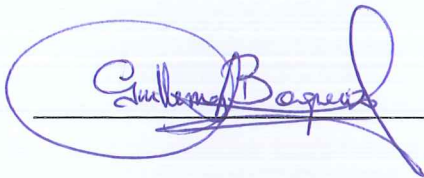


Mishell Leonela Mera Luzcando

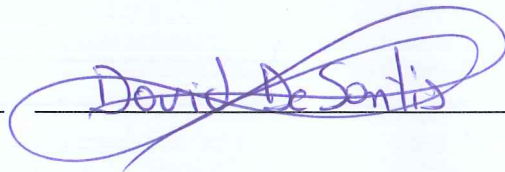


Carlos Josué Figueroa Peñafiel

EVALUADORES

A handwritten signature in blue ink, reading "Guillermo Baquerizo", written over a horizontal line. The signature is enclosed in a large, loopy oval shape.

Guillermo Baquerizo, M.Sc.
PROFESOR DE LA MATERIA
INTEGRADORA

A handwritten signature in blue ink, reading "David de Santis", written over a horizontal line. The signature is enclosed in a large, loopy oval shape.

David de Santis Bermeo, M.Sc.
PROFESOR TUTOR

ABREVIATURAS

CRM	Customer Relationship Management Gestión sobre la Relación con los Consumidores
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ERP	Enterprise Resource Planning Planificación de recursos empresariales.
HFVRP	Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem Problema de ruteo vehicular con flotas heterogéneas
HFVRPTW	Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem and Time Windows. Problema de ruteo vehicular con flotas heterogéneas y ventanas de tiempo.
HFCVRPTW	Heterogeneous Fleet Capacited Vehicle Routing Problem and Time Windows. Problema de ruteo vehicular capacitado con flotas heterogéneas y ventanas de tiempo.
NP-HARD	No polinomiales – duro.
SAP	Systems Applications and Products Sistemas, aplicaciones y productos
RS	Recocido Simulado
VRP	Vehicle Routing Problem Problema de ruteo de vehículo

GLOSARIO DE TÉRMINOS

F

Flota Homogénea: Vehículos con características y capacidades iguales.

Flota Heterogénea: Vehículos con características y capacidades diferentes.

H

Heurística: Procedimientos que realiza métodos de exploración limitada en un espacio de búsqueda y da soluciones de calidad aceptables en tiempos de cálculo generalmente moderados.

L

Logística Inversa o Reversa: La logística inversa abarca un conjunto de actividades logísticas de recogida, desmontaje y desmembramiento de productos ya usados o sus componentes, así como de materiales de distinto tipo y naturaleza, envases, embalajes o desechos peligrosos con el objeto de maximizar el aprovechamiento de su valor.

M

Metaheurística: Son procedimientos reconocidos por tener enfoques eficientes a muchos problemas de optimización ya que explora un amplio espacio de soluciones.

V

Ventanas de Tiempo: Período entre una hora de inicio y una de finalización de horario de servicio de los clientes.

V

ÍNDICE

DECLARACIÓN EXPRESA	I
ABREVIATURAS	III
GLOSARIO DE TÉRMINOS	IV
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Situación actual de la empresa	3
1.1.2. Descripción del problema	4
1.1.3. Diagrama de la problemática	5
1.1.4. Justificación del problema	6
1.2. Objetivos del proyecto	7
1.2.1. Objetivo general	7
1.2.2. Objetivos específicos	7
1.3. Revisión de la literatura	8
1.4. Marco Teórico	10
1.4.1. Preliminares	10

1.4.2.	Problema de ruteo vehicular	10
1.4.3.	CVRP	11
1.4.4.	VRPTW	13
1.4.5.	HFVRP	16
1.4.6.	HFVRPTW	17
1.4.7.	Metaheurística	18
1.4.8.	Tabu Search	18
1.4.9.	Algoritmo genético	19
1.4.10.	Recocido Simulado	20
1.4.11.	Logística inversa	22
2.	METODOLOGÍA DEL TRABAJO	23
2.1.	Técnicas de investigación	23
2.2.	Software	24
2.3.	Data	26
2.4.	Flujograma de actividades	29
2.5.	Cronograma de actividades	30
3.	IMPLEMENTACIÓN	31
3.1.	Análisis de la situación actual	32
3.2.	Implementación de la heurística	33
3.3.	Implementación de la metaheurística	35
3.4.	Presentación de resultados	37
3.5.	Análisis de resultados	38
3.5.1.	Costos de transporte	40

3.5.2. Costos de tiempos transcurridos	42
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
4.1. Conclusiones	44
4.2. Recomendaciones	45
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	49

Índice de tablas

1.1. Pseudocódigo del Recocido Simulado.	21
1.2. Diferencia de la logística directa vs inversa.	22
2.1. Matriz de distancias.	25
2.2. Matriz de tiempos.	26
2.3. Levantamiento de información.	28
3.1. Situación actual.	32
3.2. Rutas propuestas generadas por la heurística con el 100 % de nivel de servicio.	34
3.3. Rutas propuestas generadas por la metaheurística con el 95 %	37
3.4. Resultados con diferentes niveles de servicio.	38
3.5. Costos obtenidos de la situación actual.	41
3.6. Costos obtenidos de la situación propuesta.	41
3.7. Costos de los tiempos obtenidos de la situación actual.	42
3.8. Costos de los tiempos obtenidos de la situación propuesta.	42
3.9. Porcentajes de mejora	43

Índice de figuras

1.1. Diagrama de la problemática.	5
1.2. Una instancia de un VRP (izquierda) y su solución (derecha).	11
1.3. Problema de enrutamiento con capacidad.	12
1.4. Problema de enrutamiento con ventanas de tiempo.	13
1.5. Problema de ruteo con flota heterogénea.	16
2.1. Solver VRP.	24
2.2. Clientes.	27
2.3. Flujograma de actividades.	29
2.4. Cronograma de actividades.	30
3.1. Ruta 6 generada por el HFCVRPTW.	34
3.2. Programación de la Metaheurística en Matlab.	36
3.3. Distancia recorrida con los diferentes niveles de servicio.	39
3.4. Tiempos utilizados con los diferentes niveles de servicio.	39
3.5. Costos por KM recorrido.	40

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló con el objeto de optimizar los tiempos de recolección de desechos hospitalarios en la ciudad de Guayaquil, en donde una empresa debe gestionar este tipo de residuos para 177 clientes, los cuales tienen asignados tiempos predefinidos para las visitas y volúmenes de desechos estimados. La empresa requiere mejorar la gestión y eficiencia de sus procesos logísticos, por lo que se implementó técnicas de optimización para obtener rutas entre una serie de clientes y/o destinos, de las cuales deberá ser elegida la mejor; es decir, la que permita realizar la recolección de los residuos en el menor tiempo posible.

El modelo se desarrolló en 4 fases: Análisis del proceso actual, aplicación del modelo matemático, implementación del modelo utilizando la heurística (Problema de ruteo vehicular con flotas heterogéneas y ventanas de tiempo) “HFCVRPTW” y luego la aplicación de la metaheurística *recocido simulado*.

Uno de los factores que se minimizó, con un nivel de servicio del 95%, es el tiempo de recorrido que comparado con la situación actual de la empresa disminuye de 93 a 65 horas, y como consecuencia reduce los costos relacionados a la recolección de residuos.

El informe de materia integradora, el primer capítulo consiste en la problemática y antecedentes de la empresa, situación actual, y los objetivos planteados para el proyecto. El segundo capítulo presenta la metodología del proyecto usada para la recopilación de los datos, el flujograma y cronograma de actividades. El tercer capítulo describe la aplicación de la heurística y metaheurística en la instancia propuesta, se analiza la información y los resultados de la implementación propuesta en la metodología del proyecto. El capítulo 4 presenta las conclusiones y recomendaciones del proyecto contrastando la situación actual con la situación propuesta.

ABSTRACT

The actual work developed with the aim of optimizing the collection time for a hospital waste management company in the city of Guayaquil. The company must manage this type of wasting to one hundred—seventy—seven customers who are assigned the predefined time of visiting everyone and estimated waste volumes. This company requires to improve the management and efficiency of its logistics processes. This analytical working document implemented optimization techniques to get routes set between a number of customers and destinations. This work must choose the best route. In other words, this will focus on performing waste collection in the less possible time.

The model was developed in four phases. First, Analysis of the current process. Second, mathematical model implementation. Third, the model implementation using the heuristics of the HFCVRPTW (Vehicles routing problem with heterogeneous fleets and time windows). Finally, The application of the metaheuristics *simulated annealing*.

One of the factors, which was minimized with a service of 95%, is the travel time that compared with the current situation of the company decreases from 93 to 65 hours. Consequently, it reduces the costs related to waste collection.

The integrative subject report, the first chapter consists of the problem and company background, the actual situation, and the objectives set for the project. The second chapter presents the project methodology used for data collection, the flowchart, and the schedule of activities. The third chapter describes the application of heuristics and metaheuristics in the proposed instance, the information and the results of the proposed implementation in the project methodology are analyzed. The fourth chapter shows the conclusions and recommendations of the project contrasting the current situation with the proposed situation.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto resuelve la problemática del proceso de planificación de rutas de una empresa ubicada en Guayaquil. Para este proyecto, y por temas de confidencialidad se denominará a la empresa Residuos S.A., se conoce que se tiene un problema de ruteo vehicular (VRP) por sus siglas en inglés ‘Vehicle Routing Problem’, que es de naturaleza combinatoria y que posee un grado de complejidad ‘NP Hard’ dado que las soluciones no se encuentran en tiempos polinomiales. Para el problema clásico de enrutamiento vehicular se propone a encontrar un conjunto de rutas con el objetivo de minimizar la distancia, el tiempo o costos necesarios para una nueva planificación, dado que se puede lograr con métodos exactos como las heurísticas y metaheurísticas que proporcionan resultados más específicos para su utilización. Para obtener estos resultados se debe considerar variables como: ventanas de tiempo, diferentes capacidades de los camiones y tamaño de la flota, proporcionando una variante del VRP conocida como (HFCVRPTW) ‘Heterogeneous Fleet Capacited Vehicle Routing Problem with Time Windows’, ya que cuenta con un rango de visita para cada cliente y con diferentes capacidades limitada en la flota de

transporte.

1.1. Antecedentes

La empresa con la que se trabajará para el presente proyecto tiene presencia en el mercado ecuatoriano desde el 2003, pero no fue hasta el 2006 que empezó a operar. Para el 2008 Residuos S.A realizaba las recolecciones en un 80 % a empresas industriales y el 20 % a hospitales. Pero esto cambió para el 2009 dado que los desechos hospitalarios aumentaron al 70 % en comparación con el 2008; después de que la empresa que se encargaba de gestionar los desechos generales de Guayaquil se negó a recoger basura común mezclada con desechos peligrosos. Fue así que se convirtió en una empresa líder a nivel nacional de recolección, almacenamiento, tratamiento y disposición final de desechos hospitalarios e industriales.

Posee reconocimientos por ser una empresa ambientalmente viable dado que fue una de las primeras empresas en tener licencia ambiental para el manejo de desechos peligrosos, cuenta con una flota propia de transporte heterogénea de 26 camiones a nivel nacional de los cuales 16 son usados en la base Guayaquil. También, dispone de dos tipos de clientes hospitalarios e industriales: hospitalarios que hacen recolecciones de desechos tales como desechos infecciosos biológicos, cortos punzantes, fluidos corporales entre otros, e industriales que se encarga de recolecciones tales como agroquímicos, tubos fluorescentes, baterías, llantas, residuos electrónicos. Cuenta con aproximadamente 7000 clientes gran parte de ellos son hospitales públicos.

1.1.1. Situación actual de la empresa

Actualmente, la empresa realiza la recolección de desechos de materiales sanitarios, industriales entre otros. La recolección de los desechos está dirigida a diferentes clientes del país tales como hospitales, clínicas, empresas de sector industrial entre otras similares. Para la realización de la planificación diaria de rutas, no se cuenta con un software especializado para la gestión de las mismas, ésta se lo efectúa de forma empírica usando Excel y basados en su experiencia. Además, cuentan con un “ERP” (Sistema de planificación de recursos empresariales) denominado “SAP” (Sistema, Aplicación y Productos) . Con el uso del ERP se obtiene un listado de pedidos de ciertos clientes, esto ayuda a identificar clientes para una ruta de recolección. Sin embargo, se debe mencionar que con los formatos de planes de transporte no se obtiene un orden de visita a los clientes. Se conoce que al momento de realizar la recolección de desechos, existen tiempos muertos prolongados, dado que los clientes no pueden atender en los horarios establecidos. Por lo citado anteriormente, se genera carga laboral adicional a los transportistas.

1.1.2. Descripción del problema

En la actualidad Residuos S.A. realiza la planificación de las rutas de transporte de forma empírica. La realización de las rutas se las hace un día antes de visitar a los clientes y se las lleva a cabo alrededor de 5 o más horas diarias. Una vez realizadas las rutas estas son distribuidas. El transportista se encarga de realizar la visita basado en el conjunto de clientes con ventanas de tiempo aleatoriamente considerando los factores de tiempo y distancia, Por lo que al finalizar las rutas establecidas, hay camiones que regresan con clientes que cancelan las recolecciones y con clientes no atendidos, Dado que no se llegó en la ventana de tiempo establecida generando ineficiencia en la planificación de las rutas definidas.

1.1.3. Diagrama de la problemática

La figura 1.1 representa los problemas presentados en la empresa en sus procesos de ruteos diarios. Empiezan con la planificación de las rutas en donde se baja por medio de SAP una base de datos de los clientes que se visitará el día siguiente en donde se desconoce que clientes serán visitados primero, cuantos camiones se necesitarán para hacer los ruteos o qué tipo de camión escoger. Una vez hecha la planificación de rutas se le da a cada uno de los transportistas designado el correspondiente plan de transporte en donde los transportistas desconocen en qué orden visitaran a los clientes y lo hacen basados en su experticia. Una vez terminado de visitar todos los clientes se procede a transportar los desechos a la planta, y se le hace un almacenamiento temporal de residuos para saber qué tipo de tratamiento se le da dependiendo el tipo de desecho una vez que estén correctamente clasificados, se procede a la disposición final de los residuos.

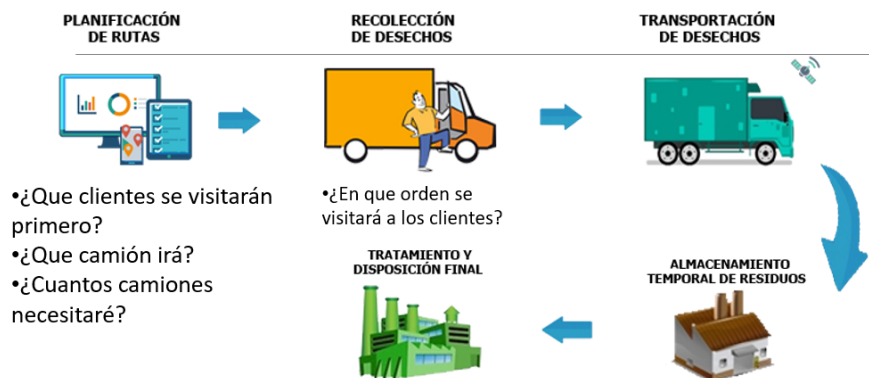


Figura 1.1: Diagrama de la problemática.

Fuente: Elaborado por los autores

1.1.4. Justificación del problema

Con la ayuda de técnicas de optimización, como son las heurísticas y metaheurísticas se realizó un programa que permita gestionar las rutas diarias para una empresa de recolección de desechos hospitalarios. Con el propósito de que haya clientes más satisfechos, jornadas laborales equitativas, generar menos horas extras y disminuir tiempos de recorridos.

Dado que, la empresa Residuos S.A. diariamente tiene clientes nuevos lo que justifica al jefe de operaciones a buscar planeaciones estratégicas y automatizar sus procesos de gestionar las rutas ya que, la forma en la que se lleva la planificación actual no se hace uso de herramientas eficientes para la realización de las rutas.

1.2. Objetivos del proyecto

Se han planteado los siguientes objetivos para lograr las metas fijadas en el desarrollo del proyecto.

1.2.1. Objetivo general

Aplicar una metaheurística que disminuya los costos y tiempos, en la recolección de los desechos hospitalarios en Guayaquil, satisfaciendo los requerimientos de la empresa.

1.2.2. Objetivos específicos

- Reestructurar la información necesaria del departamento de operaciones
- Validar información con los responsables de las actividades de recolección de desechos.
- Implementar una metaheurística adaptada a las necesidades de la empresa disminuyendo los tiempos de planificación de las rutas.
- Comparar los resultados obtenidos con la situación actual de la empresa.
- Formular propuestas de mejora en la ejecución de las recolecciones.

1.3. Revisión de la literatura

Este proyecto de titulación contempla la optimización de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo y con capacidad heterogénea que tiene similitud a nuestro problema actual para la recolección de desechos hospitalarios, la resolución de este proyecto se resolvió con la heurística de ahorro Clarke and Wright y mejorada por la metaheurística TABÚ, aplicando las restricciones dadas. En el desarrollo de este estudio se optimizó los costos de transporte, mejorando la calidad del servicio y sus procesos de distribución y transporte. En el desarrollo de este proyecto se implementa el método de barrido modificado para obtener los clústeres y con la heurística se busca ordenar los clientes por cada clúster e ir visitándolos sin infringir las restricciones de capacidad y con la aplicación de la metaheurística se obtuvo una solución óptima para obtener rutas de acuerdo con la capacidad de sus vehículos.[1]

En este paper se utiliza, dos métodos; usando la heurística de Clark and Wright y la metaheurística de recocido simulado modificado dado que éste se puede usar para rutas heterogéneas y ventanas de tiempo. Sus restricciones más significativas serán que no se supere la capacidad del camión en cada una de las rutas, que no se supere la jornada de trabajo en cada camión y que haya la posibilidad de que un camión haga más rutas. Usando recocido simulado a diferencia de la heurística se consigue mejores resultados. [2]

En este artículo se hizo el estudio sobre la eficiencia de una empresa dedicada a comercializar productos alimenticios en la ciudad de Cali usando métodos heurísticos. La empresa cuenta con 34 clientes con una demanda definida que debe ser atendida por sus diferentes camiones con flota heterogénea y ventanas de tiempo. Para el estudio en cuestión se usó el método de ahorro de Clark and Wright con el fin de darle solución de ruteo a la empresa haciendo uso de esta heurística en particular, ya que se adapta

a las restricciones del problema con el fin de poder disminuir costos, distancia, rutas y tiempos. Para lograr el objetivo del estudio se aplicó la heurística del método de ahorro que consiste en encontrar la mejor ruta entre los diferentes puntos existentes teniendo en cuenta los mayores ahorros de las distancias. Con la ayuda de estos métodos heurísticos se hizo la comparación de la situación actual con la del estudio y se logró una disminución del número de rutas del 20 %, de la distancia total un 50 % y la capacidad del vehículo se pudo usar de forma más eficiente dando una ventaja del 20 %. Lo cual es significativo para la empresa ya que puede ahorrarse costos y tiempos con ayuda de estos métodos.[3]

1.4. Marco Teórico

A continuación, se plantea los conceptos y teorías básicas necesarias para resolver el problema planteado.

1.4.1. Preliminares

Para un mejor conocimiento de soluciones de problemas de planificación de rutas de transporte, existen varios procedimientos realizados y experimentados por investigadores en sus respectivos campos. Dado que cada problema tiene una circunstancia, existen varias alternativas para una solución conforme se detalle su necesidad y exigencia de la misma. En otras palabras, se puede concluir que el problema de planificación de rutas consta de un conjunto de clientes, una cantidad de mercancía, determinados destinos dispersos geográficamente y una de flota de transporte que se determina en un conglomerado de rutas que comienzan y finalizan en el depósito a un costo mínimo por ruta recorrida a cada cliente. A continuación, se detallará algunos de los conceptos que se necesita como conocimiento en los tipos de ruteo vehicular y sus respectivas versiones.

1.4.2. Problema de ruteo vehicular

Dantzing y Ramser fueron los primeros en introducir el VRP en el año 1959. El VRP por sus siglas en inglés (Vehicle Routing Problem) es uno de los más populares problemas en la optimización y combinatoria es clasificado como un problema NP-hard, es decir que es difícil de resolver. Este tipo de problema son los que se enfrenta cada día miles de empresas que se encargan de la entrega y recogida de mercancías. Las rutas deben satisfacer las siguientes restricciones: [4]

- Todas las rutas empiezan y terminan en el depósito
- Cada cliente es visitado exactamente una vez
- La suma de todas las demandas no debe exceder la capacidad del vehículo.

En la figura 1.2. Se tiene un ejemplo del VRP, en donde a la izquierda de la imagen se tienen todos los clientes conectados con el depósito pero se desconoce cuántas rutas serán luego en la parte derecha se aplica el VRP y sale en total 5 rutas a realizar conectadas con su respectivo depósito.

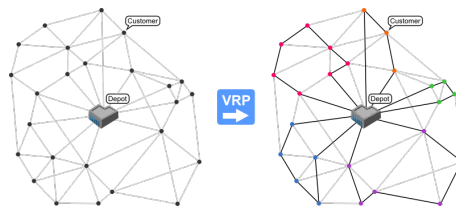


Figura 1.2: Una instancia de un VRP (izquierda) y su solución (derecha).
Fuente: Networking and Emerging Optimizacion (NEO)

Con ello se han desarrollado numerosas heurísticas o variaciones del enrutamiento de vehículos y son algunas de las que se tratará en nuestro proyecto, tales como:

1.4.3. CVRP

El CVRP (Capacited Vehicle Routing Problem) consiste en hacer la entrega de mercancías desde el depósito a cada uno de los clientes que demandan cantidades distintas con la diferencia que los vehículos cuentan con capacidad limitada y tiene como objetivo minimizar las distancias. El CVRP debe cumplir con ciertas restricciones. [5]

- Se debe cumplir con la demanda de todos los clientes

- Cada cliente deberá ser atendido por un solo vehículo
- No hay límite de uso de camiones

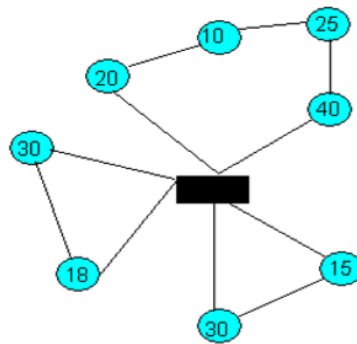


Figura 1.3: Problema de enrutamiento con capacidad.

Fuente: Frank Takes, 2010

1.4.4. VRPTW

El VRPTW (Vehicle Routing Problem and Time Windows) cuenta con la restricción de intervalos de tiempo o también llamado ventana de tiempo en el cual el cliente quiere ser visitado ya que cuenta con disponibilidad cumpliendo con las restricciones de horas y capacidad. [6] Tiene como objetivo minimizar la distancia, tiempo y costo de recorrido de los vehículos.

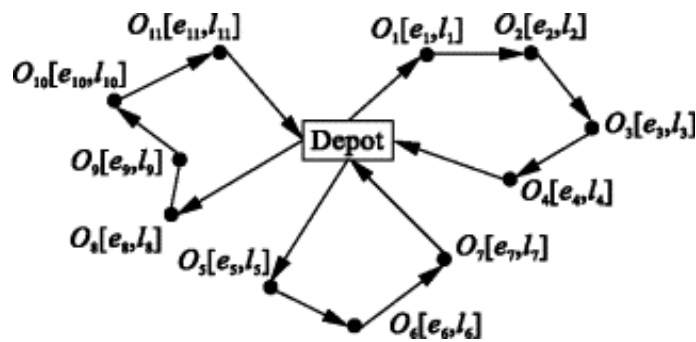


Figura 1.4: Problema de enrutamiento con ventanas de tiempo.
Fuente: Dan Zhenggang, 2009

MODELO MATEMÁTICO DEL VRPTW

El modelo matemático que se implementó se lo adaptó al modelo del VRPTW que se citó en el marco conceptual del capítulo 1. Se le hizo algunas variaciones dado que la empresa tiene diferentes restricciones tales como que posee flota heterogénea camiones con distintas capacidades y no se debe exceder la capacidad en los recorridos. A continuación, se describe el modelo matemático a implementar

Función objetivo:

(1) minimizar $\sum_{k \in K} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} T_{ijk} X_{ijk}$

Índices o conjuntos:

V: conjunto de clientes incluyendo el depósito = $\{0,1,2,\dots, 178\}$

K: camiones = $\{1,2,\dots, 8\}$

N: conjunto de clientes = $\{1,2,\dots,177\} \quad \forall(i, j) \in V$

Data:

D_{ij} : Distancia desde el nodo i al nodo j (Incluyendo el depósito)

T_{ij} : Tiempo del recorrido desde el nodo i al nodo j (Incluyendo el depósito)

a_i : Límite inferior de la ventana de tiempo de cada cliente i

b_i : Límite superior de la ventana de tiempo de cada cliente i

S_i : Tiempo de duración de servicio para cada cliente i

Q_k : Capacidad de carga de cada vehículo

d_i : Demanda de cada cliente i

Variables de decisión:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el camión } k \text{ va de } i \text{ a } j \\ 0, & \text{si no} \end{cases}$$

t_{jk} : Instante en que llega el vehículo k al cliente j

$$X_{i,j,k} \in 0, 1 \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V,$$

Restricciones :

$$\begin{aligned} (2) \sum_{j \in N} X_{0jk} &= 1 & \forall k \in K, \\ (3) \sum_{i \in N} X_{i,n+1,k} &= 1 & \forall k \in K, \\ (4) \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} X_{i,j,k} &= 1 & \forall i \in N, \\ (5) \sum_{i \in V} X_{i,j,k} - \sum_{i \in V} X_{i,j,k} &= 0 & \forall k \in K, j \in N, \\ (6) \sum_{i \in N} d_i \sum X_{i,j,k} &\leq Q_k & \forall k \in K, \\ (7) (t_{j,k} + S_i + T_{j,k} - t_{jk}) &\leq (1 - X_{i,j,k})M & \forall k \in K, \forall ij \in V, \\ (8) a_i \leq T_{i,k} \leq b_i & & \forall k \in K, i \in V, \end{aligned}$$

Se tiene como función objetivo a la ecuación (1) que busca minimizar el tiempo de recorrido por los camiones. Con las ecuaciones (2) y (3) se detalla que cada camión al iniciar y terminar la ruta debe partir y volver al depósito. Dado la ecuación (4) presenta que todo cliente debe ser visitado por un camión. A través de la ecuación (5), esta restricción de flujo asegura que el mismo camión que llega, es el mismo que sale. La ecuación (6) regula la demanda de los clientes de cada ruta con respecto a la capacidad del camión, con la siguiente ecuación (7) asegura la continuidad en el tiempo de viaje de las rutas y con la ecuación (8) aseguran que los tiempos de inicio de servicio se encuentren dentro de las ventanas definidas por el cliente.

1.4.5. HFVRP

El HFVRP (Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem), esta variante del VRP tiene como restricción la flota heterogénea de sus vehículos, se creó dado que en la práctica no es muy frecuente que la flota sea homogénea ya que existen casos particulares de que ciertos tipos de vehículos ya sean con dimensiones muy grandes, no pueden pasar por ciertas calles y para ello deben usar otros tipos de vehículos. De acuerdo con esto los costos de mantenimiento y operación tomaran diferentes valores. La ventaja de tener flota heterogénea es que permite una mayor flexibilidad al momento de planear las rutas y distribuir los camiones. En esta variación del VRP los costos asociados de un cliente i a un cliente j se consideran simétricos $C_{ij} = C_{ji}$. [7]

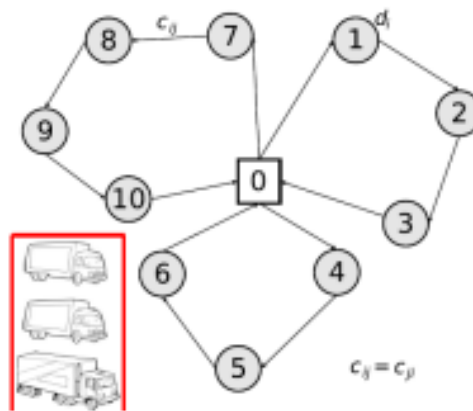


Figura 1.5: Problema de ruteo con flota heterogénea.
Fuente: Ingeniería. Investigación y Tecnología

1.4.6. HFVRPTW

El HFVRPTW (Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem and Time Windows) es un problema NP-hard (Golden et al.,1984) porque generaliza el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW), en las que cada vehículo tiene capacidades y costos diferentes, además de que se añade una ventana de tiempo en la cual un cliente puede ser atendido y en la que “se debe asignar el tipo de vehículo que atenderá a un conjunto de clientes y la ruta a seguir para satisfacer sus demandas” Con el objetivo de optimizar costos, tiempo y distancias. Su principal característica es su flota heterogénea que dependerá de su capacidad, tamaño, antigüedad.[1]

1.4.7. Metaheurística

Las metaheurísticas son reconocidas por tener enfoques eficientes a muchos problemas de optimización combinatoria difíciles de resolver ya que explora un espacio de soluciones más amplio dado que sigue estrategias de nivel superior para crear un proceso capaz de escapar de óptimos locales. [8]

Existen diferentes métodos metaheurísticos:

- Métodos evolutivos: El más utilizado porque presenta mejores resultados, es el algoritmo genético. Los métodos evolutivos implican construir un grupo de soluciones completas basándose en atributos, luego se combina con soluciones seleccionadas para finalmente ser reemplazadas.
- Métodos de búsqueda: Los métodos de búsqueda recorren el espacio de soluciones o vecindad de una solución y la mejoran paulatinamente. El procedimiento culmina cuando ya no existe una solución que mejore las soluciones anteriormente expuestas.
- Métodos constructivos: Los métodos constructivos buscan obtener soluciones a partir de un análisis y selección gradual de los componentes por los que está conformado. Proveen soluciones de una calidad moderada dado que se incorpora un nuevo elemento en cada iteración. [9]

1.4.8. Tabu Search

Tabú search o conocida en español como búsqueda tabú fue propuesta por Glover en 1986 para la resolución de problemas de optimización entera, la búsqueda tabú está basado en un algoritmo de búsqueda local que se basa en el concepto de "vecindario" que explora un espacio de soluciones que superan los óptimos locales.

Este algoritmo consiste en hacer búsqueda local de forma iterativa que comienza con una solución inicial y el algoritmo explora un subconjunto de vecinos $N(s)$ del espacio de soluciones s ; y se escoge la solución que mejore la solución actual de la función objetivo. El algoritmo trabaja con una lista tabú que consiste en una estructura de memoria de corto plazo que guarda los movimientos realizados en las últimas n iteraciones para luego compararlas con las soluciones pasadas, y si la solución no mejora, es desechada. El algoritmo termina cuando ya no se mejoren las soluciones. La búsqueda tabú puede ser aplicada en problemas de localización de plantas, diseño de redes de transporte, ruteo de vehículos entre otros. [8]

1.4.9. Algoritmo genético

El algoritmo genético está basado en el comportamiento evolutivo de los sistemas biológicos, fue introducida en 1970 por Jhon Holland. Dado que la selección se hace de forma natural cada especie gana cierta cantidad de “conocimiento” la cual es transmitida a través de los cromosomas que contienen información de los genes, los organismos que mejor logren adaptarse son los que tienen mayor probabilidad de reproducirse y sobrevivir. Algunos de estos organismos son seleccionados para ser cruzados para producir nuevas generaciones donde los genes de un cromosoma pueden sufrir mutaciones que consiste en alterar un bit de un cromosoma. Para que el algoritmo evite converger hacia los óptimos locales esta metaheurística trabaja con el concepto de mutación, que radica en realizar modificaciones principalmente aleatorias para explorar otros espacios de soluciones.[8]

1.4.10. Recocido Simulado

En 1983 Kirkpatrick estableció una equivalencia del proceso de recocido y el de resolver problemas de optimización combinatoria. El recocido simulado o también conocido en inglés como Simulated Annealing es un algoritmo de búsqueda local que puede escapar de los óptimos locales para encontrar un óptimo global. Es una herramienta muy exitosa para resolver una gran variedad de problemas de optimización combinatoria de gran escala. Este sigue un proceso similar al de los metales para mejorar su estructura de cristalización, donde se calienta el metal hasta que alcance una temperatura muy elevada y luego es enfriado progresivamente hasta que su temperatura se reduzca a cero. A medida que la temperatura decrece, los movimientos considerados como peores se producen con menos frecuencia convirtiéndose en óptimos globales. [8] El recocido simulado comienza con una solución inicial luego se genera una solución aleatoria y en cada iteración se tiene una nueva solución x , la cual es dada aceptando dos criterios, si la solución nueva de la función objetivo mejora o empeora.

A continuación, se muestra el pseudocódigo del recocido simulado,

<p>Entrada: Solución inicial (X_o)</p> <p>Salida: Solución Final (x'')</p> <p>$x=x^t = X_o$ $T = T_o$ $\text{Iter} = 0$</p> <p>Mientras $\text{iter} < \text{MaxIter}$</p> <p style="padding-left: 2em;">Generar soluciones x' en el vecindario $N(x)$ de forma aleatoria</p> <p style="padding-left: 2em;">Si $f(x') < f(x)$ $x=x'$ Sino</p> <p style="padding-left: 4em;">$r = \text{Aleatorio}(0,1)$</p> <p style="padding-left: 4em;">Si $e^{-\frac{f(x') - f(x)}{t}} > r$ (1.1)</p> <p style="padding-left: 6em;">$x=x'$ Si $f(x') < f(x^t)$</p> <p style="padding-left: 4em;">$x^t = x'$</p> <p style="padding-left: 2em;">$T = \alpha * T$</p> <p style="padding-left: 2em;">$\text{iter} = \text{iter} + 1$</p> <p>Fin</p>

Tabla 1.1: Pseudocódigo del Recocido Simulado.

Fuente: Jhon Wilmer Escobar [11]

1.4.11. Logística inversa

La logística inversa abarca el conjunto de actividades logísticas de recogida, desmontaje y desmembramiento de productos ya usados o sus componentes, así como de materiales de distinto tipo y naturaleza, con objeto de maximizar el aprovechamiento de su valor en sentido amplio de su uso sostenible y, en último caso, su destrucción. [10]

Y tiene algunas diferencias a la logística directa que se detallan en la tabla 1.2.

Logística Directa	Logística Inversa
Estimación de demanda relativamente cierta	Estimación de demanda compleja
Transporte uno a muchos	Transporte muchos a uno
Precio relativamente uniforme	Precio en función de muchos factores
Gestión de inventario relativamente sencilla	Ciclo de vida del producto complejo

Tabla 1.2: Diferencia de la logística directa vs inversa.

Fuente: Elaborado por los autores

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Este capítulo presenta la metodología de trabajo que se aplicará para alcanzar los objetivos planteados en el capítulo 1.

2.1. Técnicas de investigación

- **Entrevista**

Por medio de esta técnica de investigación se procedió a realizar una entrevista al jefe de operaciones de la empresa para conocer como realizan el proceso de ruteo en la actualidad y extraer información relevante para la posterior ejecución del proyecto.

- **Observación**

Luego se realizó el seguimiento de los camiones por medio de un sistema de rastreo satelital para la toma de tiempos de servicio con cada uno de los clientes, tiempos muertos y el tiempo que se demoran en recorrer cada ruta preestablecida.

- **Clasificación**

La empresa proporcionó la base de datos de los clientes donde están las ventanas de tiempo de cada uno de los clientes con sus respectivas coordenadas y pesos promedios. Una vez obtenida toda esta información se procedió a clasificar y a validar la información recolectada necesaria para posteriormente hacer la comparación con nuestra solución propuesta.

2.2. Software

Se utilizó el programa EXCEL para clasificar, guardar la información levantada y con la ayuda del solver VRP spreadsheet [12], se calculó las distancias y tiempos de visita a cada cliente.

Sequence	Parameter	Value	Remarks
0.Optional - GIS License	Bing Maps Key	AknuTuBXV2mpu42lj7G2r_8X2uiP_HDmphin5SNNPUqESowQpWcBLEsheopHnVXIN	You can get a free key at https://www.bingmapsportal.com/
1.Locations	Number of depots	1	[1,20]
	Number of customers	177	[5,200]
2.Distances	Distance / duration computation	Bing Maps driving distances (km)	Recommendation: use postcodes for addresses
	Bing Maps route type	Shortest	Recommendation: use Fastest
	Average vehicle speed	70	Not used for the 'Bing Maps driving distances' options
3.Vehicles	Number of vehicle types	4	Heterogeneous VRP if greater than 1
4.Solution	Vehicles must return to the depot	Yes	Open VRP if no return
	Time window type	Hard	
	Backhauls?	No	If activated, delivery locations must be visited before pickup locations
5.Optional - Visualization	Visualization background	Bing Maps	
	Location labels	Location IDs	
6.Solver	Warm start?	Yes	
	Show progress on the status bar?	No	May slow down the optimization algorithm
	CPU time limit (seconds)	10	Recommendation: At least 3360 seconds

Figura 2.1: Solver VRP.
Fuente: University of Bath

El VRP spreadsheet solver es un programa desarrollado en Excel con la programación de macros, tiene una interfaz fácil de usar. En la pantalla principal se agregan las coordenadas de los clientes a visitar y del depósito, se coloca la cantidad de camiones disponibles para hacer estas rutas. Consecutivamente se elige el solver y se calcula las distancias, donde se tendrá cada una de las distancias con sus respectivos tiempos. Una vez obtenidas las distancias y tiempos se utilizó el software MATLAB [13], que es un programa de computo numérico que ayuda a resolver problemas científicos y de ingeniería para la programación de las diferentes funciones que se necesitará de la metaheurística recocido simulado. Con el uso de esta herramienta se obtuvo las siguientes matrices de tiempos y distancias.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	17.2	21.8	20.5	19.6	18.9	19.5	19.1	18.1	18.9	18.8
1	18.3	0	6.44	3.47	2.42	1.85	2.6	2.21	1.08	2.49	1.68
2	23	6.4	0	6.85	6.17	6.92	5.52	5.38	6.14	4.8	5.03
3	21.7	3.47	6.85	0	1	2.43	1.31	1.89	2.4	2.11	2.5
4	20.6	2.42	6.17	1	0	1.43	0.95	0.93	1.42	1.41	1.58
5	20.1	1.85	6.92	2.43	1.43	0	2.26	1.87	0.84	2.22	1.87
6	20.8	2.6	5.52	1.31	0.95	2.26	0	0.56	1.69	0.78	1.19
7	20.2	2.21	5.38	1.89	0.93	1.87	0.56	0	1.3	0.64	0.7
8	19.3	1.08	6.14	2.4	1.42	0.84	1.69	1.3	0	1.61	1.12
9	20.3	2.49	4.8	2.11	1.41	2.22	0.78	0.64	1.61	0	0.94
10	19.7	1.68	5.03	2.5	1.58	1.87	1.19	0.7	1.12	0.94	0

Tabla 2.1: Matriz de distancias.

Fuente: Elaborado por los autores

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	0.39	0.55	0.52	0.48	0.45	0.51	0.53	0.42	0.5	0.45
1	0.46	0	0.15	0.14	0.09	0.06	0.09	0.08	0.04	0.09	0.06
2	0.6	0.14	0	0.18	0.16	0.19	0.13	0.14	0.17	0.11	0.12
3	0.58	0.13	0.16	0	0.04	0.09	0.05	0.07	0.09	0.06	0.1
4	0.54	0.08	0.15	0.04	0	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06
5	0.5	0.06	0.19	0.1	0.05	0	0.09	0.07	0.03	0.08	0.08
6	0.55	0.09	0.12	0.06	0.03	0.09	0	0.02	0.07	0.02	0.05
7	0.56	0.07	0.14	0.07	0.04	0.07	0.02	0	0.05	0.03	0.03
8	0.49	0.04	0.16	0.1	0.05	0.03	0.07	0.05	0	0.06	0.05
9	0.54	0.09	0.11	0.07	0.06	0.09	0.02	0.03	0.06	0	0.04
10	0.53	0.06	0.12	0.1	0.06	0.08	0.05	0.03	0.04	0.04	0

Tabla 2.2: Matriz de tiempos.
Fuente: Elaborado por los autores

2.3. Data

Para la recolección de la data se realizó levantamiento de información tomando como instancia el 4 de junio del 2019, este día la base de datos arrojó que se tenían que visitara 177 clientes de la ciudad de Guayaquil. La base de datos de la empresa posee información tal como: Nombre del Cliente, Dirección, Provincia, Ciudad, Hora1, Hora2, Días de Recolección, Peso Promedio, Fecha, Geo-coordenadas. Con toda esta información relevante que se tomó, se usó para el proyecto en cuestión, las ventanas de tiempo, las coordenadas y pesos promedios a recoger. Dado que la empresa no lleva el registro del nivel de servicio de los clientes, por medio de un sistema satelital que posee la empresa se obtuvo los tiempos de paradas, kilometraje recorrido para la visita de los 177 clientes. El nivel de servicio varía bastante dependiendo el tipo de cliente ya que la mayoría de las veces los hospitales que demandan más de 700 kg demoran alrededor de 20 a 30 minutos

en hacer estas recolecciones y con los clientes pequeños se demoran entre 3 a 10 minutos aproximadamente.

Una vez obtenida nuestras distancias y tiempos con la ayuda del software Matlab se obtendrá una matriz resultante ordenada para poder ser usada con mayor facilidad en nuestro estudio.

En la Figura 2.2, se tienen localizadas cada uno de los clientes a hacer las recolecciones.

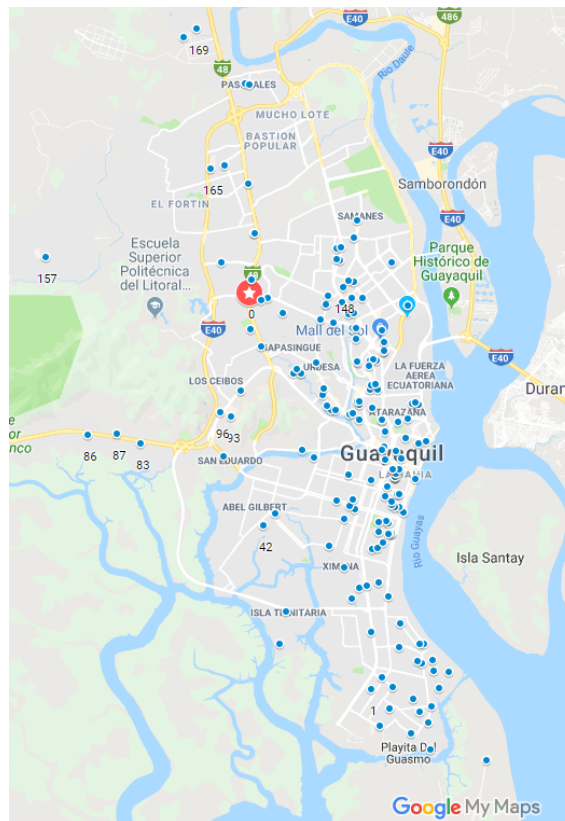


Figura 2.2: Clientes.

Fuente: Elaborado por los autores

CLIENTE	VT		COORDENADAS		PESOS (KG)	TS(MIN)
	LI	LS	Y	X		
1(Depot)	-	-	-14,96766	-639,47438	-	-
2	9:00	12:00	-15,85148	-639,16524	13,2	3
3	9:00	11:30	-16,01112	-638,87140	0,9	7
4	8:00	16:30	-15,98774	-639,01508	27,17	11
5	8:00	16:00	-15,95037	-639,06411	14,8	6
6	8:00	15:00	-15,93413	-639,14284	0,78	3
7	14:00	17:00	-15,92674	-639,02071	314	20
8	10:00	16:00	-15,90411	-639,04079	1,1	3
9	14:00	17:00	-15,89490	-639,11975	104,87	3
10	8:00	16:30	-15,89029	-639,01146	11,5	3

Tabla 2.3: Levantamiento de información.

Fuente: Elaborado por los autores

2.4. Flujograma de actividades

El siguiente flujograma muestra las diferentes actividades a seguir para la realización del proyecto.

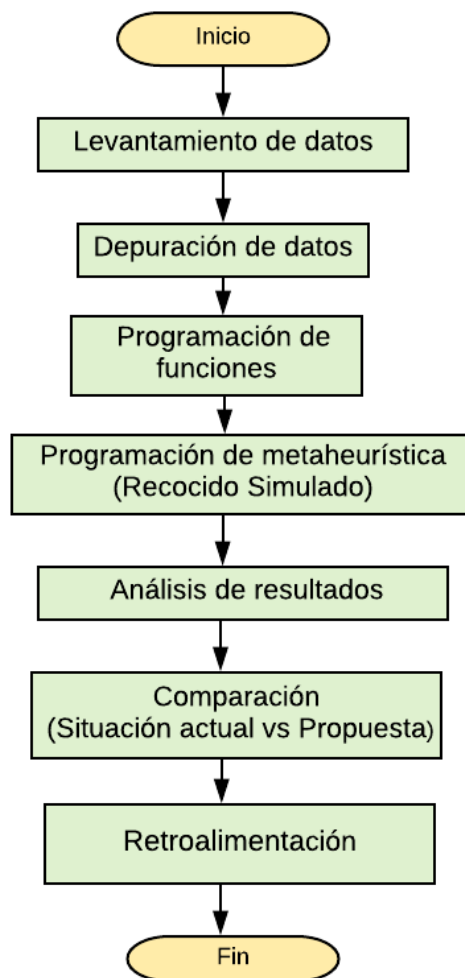


Figura 2.3: Flujograma de actividades.

Fuente: Elaborado por los autores

2.5. Cronograma de actividades

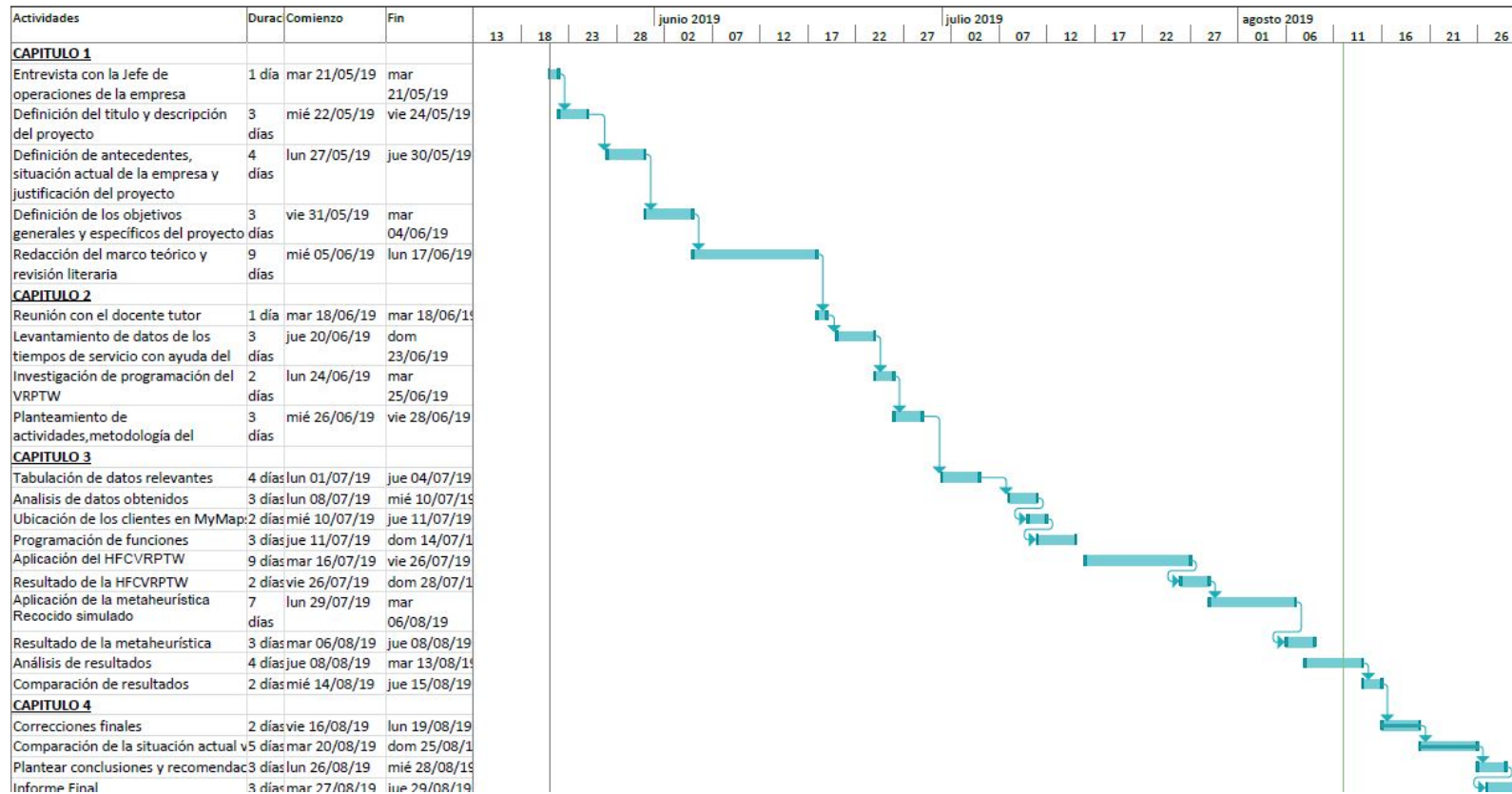


Figura 2.4: Cronograma de actividades.

Fuente: Elaborado por los autores

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN

En función al problema planteado en el capítulo 1, se realizó el modelo matemático con sus respectivas restricciones obtenidas en la sección 1.4.4. Adicionalmente se tiene presente las siguientes condiciones:

- Saliendo del depósito de origen el camión debe de visitar a todos los clientes una sola vez según la planificación de recolección de desechos.
- Terminando la planificación de recolección de desechos se debe de regresar al depósito de origen.
- Para la planificación de recolección las rutas, estas deben ser óptimas y cumplir restricciones de las capacidades de la flota heterogénea y los tiempos asignados por los clientes.
- Como objetivo principal está la minimización de tiempos por cada ruta y considerando minimizar las distancias recorridas.

3.1. Análisis de la situación actual

Se realizó el análisis de la situación actual usando una instancia específica del 4 de junio del 2019, en ella se tomó los tiempos de servicio, distancias totales, cantidad de camiones que se usaron para la recolección de desechos en este día, kilometraje y tiempos de recorrido. Se utilizó un total de 8 camiones para hacer la recolección a los 177 clientes. Cada uno salió y llegó al depósito a diferentes horas como se puede observar en la tabla 3.1. La empresa posee flota heterogénea, para este día se usó dos camiones de 3000 kg, cinco camiones de 5000 kg y un camión de 10000 kg para clientes que demandan más recolecciones.

RUTA	KM	CLIENTES	HORAS	CARGA RECOGIDA
1	192,45	31	14	1362,45
2	160	28	10	1164,88
3	122,07	25	13	1062,96
4	150,77	35	15	682,87
5	134,62	19	12	1382,21
6	139,69	23	10	560,02
7	174,92	8	14	857,44
8	65	8	5	250,4
TOTAL	1139,52	177	93	9869,65

Tabla 3.1: Situación actual.
Fuente: Elaborado por los autores

3.2. Implementación de la heurística

En la aplicación del HFCVRPTW, se considera la asignación de los clientes a los diferentes tipos de camión cuidando que no se exceda la capacidad, y respetando las ventanas de tiempo de cada cliente. La programación de esta heurística fue desarrollada en el software Matlab.

A continuación se detallan los pasos a seguir:

Paso #1. Inicialización

Ordenar las ventanas de tiempo de los clientes i de forma ascendente ($i, i+1, i+2 \dots$).

Paso #2. Cálculo de rutas

Para cada k camión asignar la ruta con la cantidad respectiva de clientes i . Considerar:

Capacidad de cada camión $Cap(k)$ sea menor a la suma de los pesos de los clientes asigna a la ruta $Sum(Pesos(y(i)))$.

El tiempo de recorrido al visitar a cada cliente i sea menor a la ventana de salida de cada cliente i .

Paso #3. Verificar asignación

Verificar que todos los clientes i sean visitados una vez, sino repetir.

Como se ilustra en la tabla 3.1 la heurística nos arroja el uso de 8 camiones para realizar las 177 recolecciones y desde ya se puede ir observando una mejoría en tiempos ya que con la secuencia de rutas ya definida se logra hacer las visitas en un total de 73 horas, 20 horas menos que en la situación actual.

Rutas	Secuencia de la ruta	Km	Tiempo(H)
1	(1,74,150,166,107,139,41,24,33,128,23,22,158,127,69,50,171,137,114,28,5,4,10,11,51,165,175,108,151,53,98,119,97,1)	240	15
2	(1,149,81,27,126,90,91,144,32,30,141,89,116,113,120,14,161,118,153,125,59,16,12,43,99,21,36,1)	166	12
3	(1,58,34,134,147,105,92,111,77,83,94,3,37,46,148,29,65,72,85,155,164,169,140,84,82,102,68,1)	219	11
4	(1,63,25,76,142,103,104,130,31,45,18,55,154,67,122,129,159,26,17,19,62,75,121,52,115,1)	153	8
5	(1,162,93,47,117,73,95,177,146,96,6,145,8,20,49,60,131,112,124,15,1)	169	9
6	(1,160,163,168,70,78,38,57,61,64,172,136,143,35,48,176,173,167,54,157,1)	161	9
7	(1,2,174,178,132,138,156,44,80,86,87,71,101,56,79,88,42,152,135,1)	117	6
8	(1,13,100,106,170,66,123,7,9,39,40,109,110,133,1)	36	3

Tabla 3.2: Rutas propuestas generadas por la heurística con el 100 % de nivel de servicio.

Fuente: Elaborado por los autores

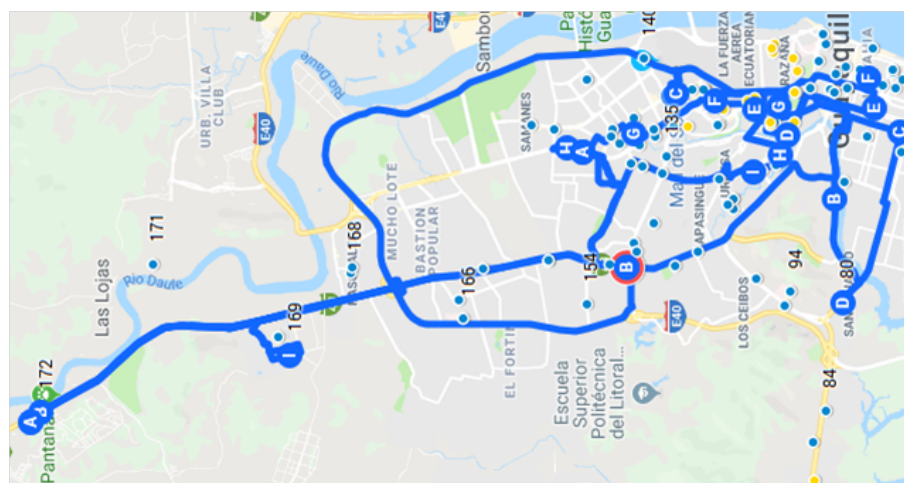


Figura 3.1: Ruta 6 generada por el HFCVRPTW.

Fuente: Elaborado por los autores

3.3. Implementación de la metaheurística

Para aplicar la metaheurística del recorrido Simulado, se necesita de una solución inicial previamente obtenida de la heurística, la cual será un parámetro de entrada en unión con datos iniciales como temperatura inicial y final, un factor de enfriamiento, una cantidad de iteraciones a realizar y un costo de la solución inicial. Una vez obtenido estos parámetros se procede a encontrar una solución vecina aleatoria que cumplan con las restricciones de ventanas de tiempo de cada cliente y que no se exceda con la capacidad de la carga del camión en el recorrido. A continuación, se comprueba que el costo de la solución vecina aleatoria sea mejor que el costo inicial, si esta se cumple se actualiza el costo inicial, reemplazando dicha solución. En caso de que el costo de la solución vecina no sea bueno, esta se actualizara si cumple con la condición de Boltzmann, que nos permite encontrar una mejor solución a partir de soluciones no tan buenas realizadas por varias iteraciones sucesivas y hasta que la temperatura sea igual a la temperatura final. Se menciona que uno de los parámetros adicionales es el nivel de servicio que es la probabilidad de visitar a los clientes dentro de las ventanas de tiempo, que se lo implementa con el fin de brindar diferentes soluciones a la empresa. Para este proyecto se escogió 4 porcentajes de nivel de servicio con el fin de mejorar la solución inicial lo más que se pueda, al poner niveles de servicios menores a 100 se suaviza las ventanas de tiempos de ciertos clientes. Los niveles de servicio a usar para el análisis de las soluciones son 100 %, 98 %, 95 % y 90 %. Para la programación de la situación propuesta realizada en el software Matlab, se ha realizado con 150 interacciones para cada nivel de servicio implementado, dando como tiempo de entrega de los resultados 15 minutos.

A continuación, la siguiente programación en Matlab.

```

Programa_HFVRPTW.m  X +
%***** PROGRAMA *****
%**PROBLEMA DE RUTEO VEHICULAR CON FLOTA HETEROGENEA Y VENTANA DE TIEMPO **
clear;clc;
% Llamar la información a usar.
load dataproxy
%***** Orden los clientes *****

%**** Vecino mas cercano HFVRPTW *****
%y =VMC_CVRPTW(1,T,Wds,[PesCam;5000],Pesos,Ts);
SolMH=[];DistaMH=[];TMH=[];Dic=[];Capt=[]; Timt=[];
%Sol=[];SolMH=[];
porcentaje=[1 0.98 0.95 0.9];
bs=inf;
for ser=[1 0.98 0.95 0.9]
tic;
while toc<10
toc;
xo=1;
if ser==1
xf =VMC_CVRPTW(xo,T,Wds, PesCam,Pesos,Ts);
[distrec, Tim] =distHFVRPTW(xf,T,Ts);
else
%**** Recocido Simulado HFVRPTW *****
y =VMC_CVRPTW(xo,T,Wds,PesCam,Pesos,Ts);
xf=RS_HFVRPTW(10,0.9,0,0.02,T,Wds,PesCam,Pesos,Ts,y,Vt,ser);
[distrec, Tim] =distHFVRPTW(xf,T,Ts);
end
end

```

Figura 3.2: Programación de la Metaheurística en Matlab.
Fuente: Elaborado por los autores

3.4. Presentación de resultados

Por temas de presentación se mostrará la planificación de rutas con porcentaje de servicio del 95 % en comparación con la situación actual. Una vez que se hizo la programación de la metaheurística en el software Matlab dio los siguientes resultados.

En la tabla 3.1 se muestra usando un nivel de servicio del 95 % la secuencia de las rutas con sus respectivos tiempos y kilometraje recorrido para atender a los 177 clientes.

Rutas	Secuencia de la ruta	Km Recorrido	Tiempo (H)
1	(1,74,81,166,58,41,27,34,126,128,177,105,30,3,127,136,120,161,147,125,48,86,52,51,71,53,68,98,102,108,97,1)	164	11
2	(1,149,150,139,24,33,32,63,92,111,23,22,47,31,37,18,14,46,55,66,67,122,146,137,11,26,174,10,121,131,135,119,82,1)	172	12
3	(1,107,134,90,91,144,141,76,77,142,103,104,93,89,116,117,113,138,148,154,96,118,101,79,159,164,54,9,5,21,36,1)	144	10
4	(1,57,83,94,162,130,49,13,50,73,72,114,6,8,4,12,16,20,59,60,152,151,1)	116	8
5	(1,158,163,168,70,78,2,38,25,61,64,155,156,171,129,29,28,35,176,17,19,45,165,133,115,1)	229	11
6	(1,172,132,95,62,69,143,160,169,173,145,56,80,110,124,100,99,112,157,1)	131	7
7	(1,178,106,123,170,153,175,65,75,88,85,39,40,42,109,84,140,167,87,15,43,44,7,1)	128	6

Tabla 3.3: Rutas propuestas generadas por la metaheurística con el 95 % .

Fuente: Elaborado por los autores

3.5. Análisis de resultados

Se puede ver una mejoría en los tiempos desde el nivel de servicio del 100% y se aprecia que a medida que disminuye el nivel de servicio mejoran los tiempos y distancias recorridas como a su vez la disminución del uso de un camión para las 177 recolecciones. Se usó diferentes niveles de servicio para darle a la empresa un abanico de opciones para que ellos tomen una decisión, en donde se sacrifica un poco el nivel de servicio con el objetivo de disminuir tiempos y costos. Al relajar las ventanas de tiempo, un porcentaje de los clientes no serán visitados en sus ventanas de tiempos definidas. Como consecuencia de la programación se tiene una reducción de tiempos de planificación en 15 minutos.

Porcentaje de servicio	Distancia	Tiempo	Número de camiones
100 %	1247	4372	8
98 %	1133	4079	7
95 %	1084	3905	7
90 %	1077	3858	7

Tabla 3.4: Resultados con diferentes niveles de servicio.

Fuente: Elaborado por los autores

A partir de los resultados hallados por el método de la metaheurística de recocido simulado se realizó una comparación entre la distancia y tiempo totales de recorrido en la actualidad y con la solución propuesta. Como se puede observar en los gráficos siguientes.

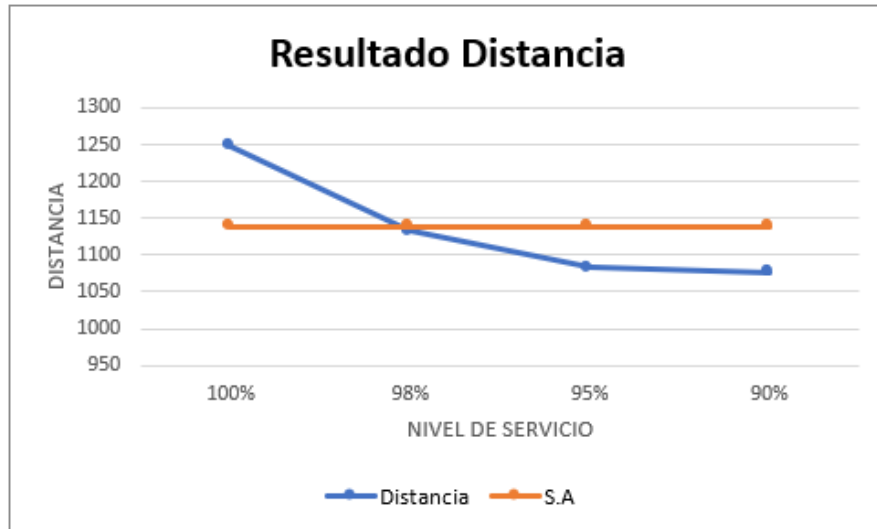


Figura 3.3: Distancia recorrida con los diferentes niveles de servicio.
Fuente: Elaborado por los autores

En la figura 3.3 se puede observar una mejora con respecto a la distancia usando un nivel de servicio del 98% y como sigue mejorando con niveles inferiores de servicio.

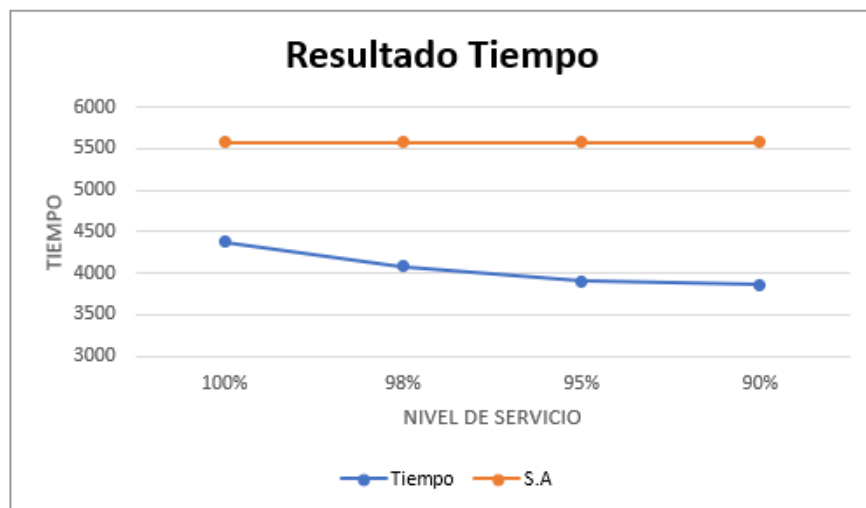


Figura 3.4: Tiempos utilizados con los diferentes niveles de servicio.
Fuente: Elaborado por los autores

Se observa en la figura 3.4 que a medida que el nivel de servicio disminuye se aprecia que los resultados obtenidos también disminuyen.

3.5.1. Costos de transporte

La empresa posee su propia flota de transporte cuyos costos son fijos y variables para cada ruta. Se calculó un aproximado de cuánto costaría cada kilómetro recorrido para la empresa y se estimó un valor de \$0.52 centavos el kilómetro recorrido. En la figura 3.5 se observa un aproximado de los costos que tienen en la actualidad con respecto a su flota de transporte de 5 toneladas.

COSTOS CAMION (REFERENCIAL)		
EJEMPLO: CAPACIDAD 5 TON.		
REFERENCIA DE RECORRIDO AL MES	12.000.00	KM
COSTOS FIJOS	DOLARES	
	COSTO MENSUAL	COSTO KM.
SUELDO FIJO CONDUCTORES	USD 606.00	USD 0.051
PAGO HORAS EXTRAS	USD 250.00	USD 0.021
PRIMA DEL SEGURO VEHICULO	USD 427.00	USD 0.036
PROVISIÓN REPARACIONES (APROX)	USD 465.93	USD 0.039
MATRICULA	USD 266.67	USD 0.022
TOTAL COSTOS FIJOS	USD 2,015.60	USD 0.168
COSTOS VARIABLES	DOLARES	
	COSTO MENSUAL	COSTO KM.
COMBUSTIBLES	USD 1,056.00	USD 0.088
LLANTAS X KM RECORRIDO	USD 625.00	USD 0.052
COSTOS LLANTAS REPARACION	USD 57.78	USD 0.005
FILTROS	USD 74.34	USD 0.006
ACEITES/LUBRICANTES	USD 221.00	USD 0.018
SISTEMA ELECTRICO Y SIST. FRENSO	USD 447.22	USD 0.037
CAJA DE CAMBIOS/SUSPENSION/RADIADOR	USD 306.08	USD 0.026
REPUESTOS MOTOR	USD 326.76	USD 0.027
ACCESORIOS EXTERNOS	USD 139.17	USD 0.012
MANTENIMIENTO BASICO	USD 70.00	USD 0.006
HERRAMIENTAS EQUIPO	USD 180.00	USD 0.015
RASTREO SATELITAL	USD 35.58	USD 0.003
FILTRO RACOR	USD 8.52	USD 0.001
FILTRO DE AIRE	USD 13.61	USD 0.001
VIATICOS	USD 400.00	USD 0.033
RETENCIONES EN LA FUENTE	USD 130.61	USD 0.011
TOTAL COSTOS VARIABLES	USD 4,091.67	USD 0.341
IMPREVISTOS	USD 45.92	USD 0.006
TOTAL COSTOS FIJOS+VARIABLES	USD 6,153.19	USD 0.52

Figura 3.5: Costos por KM recorrido.

Fuente: Elaborado por los autores

SITUACIÓN ACTUAL			
RUTA	KM RECORRIDO	HORAS	COSTO
1	192.45	14	\$ 100.07
2	160	10	\$ 83.20
3	122.07	13	\$ 63.48
4	150.77	15	\$ 78.40
5	134.62	12	\$ 70.00
6	139.69	10	\$ 72.64
7	174.92	14	\$ 90.96
8	65	5	\$ 33.80
TOTAL		93	\$ 592.55

Tabla 3.5: Costos obtenidos de la situación actual.
Fuente: Elaborado por los autores

SITUACIÓN PROPUESTA			
RUTA	KM RECORRIDO	HORAS	COSTO
1	164	11	\$ 85.28
2	172	12	\$ 89.44
3	144	10	\$ 74.88
4	116	8	\$ 60.32
5	229	11	\$ 119.08
6	131	7	\$ 68.12
7	128	6	\$ 66.56
TOTAL		65	\$ 563.68

Tabla 3.6: Costos obtenidos de la situación propuesta.
Fuente: Elaborado por los autores

Se aprecia una disminución de costos de **\$28,87** con respecto a la situación actual. Lo que mensualmente refleja un ahorro de **\$577.40** a la empresa.

3.5.2. Costos de tiempos transcurridos

Dado que los costos por hora para cada transportista son \$2.52, se pudo calcular los ahorros obtenidos en la situación propuesta de cada una de las rutas.

Se puede apreciar una disminución de costos de **\$70,70** con respecto a la situación actual.

Lo que mensualmente refleja un ahorro de **\$2,121** a la empresa.

SITUACIÓN ACTUAL		
RUTA	HORAS	COSTO
1	14	\$ 35,35
2	10	\$ 25,25
3	13	\$ 32,83
4	15	\$ 37,88
5	12	\$ 30,30
6	10	\$ 25,25
7	14	\$ 35,35
8	5	\$ 12,63
TOTAL	93	\$ 234,83

Tabla 3.7: Costos de los tiempos obtenidos de la situación actual.

Fuente: Elaborado por los autores

SITUACIÓN PROPUESTA		
RUTA	Horas	COSTO
1	11	\$ 27,78
2	12	\$ 30,30
3	10	\$ 25,25
4	8	\$ 20,20
5	11	\$ 27,78
6	7	\$ 17,68
7	6	\$ 15,15
TOTAL	65	\$ 164,13

Tabla 3.8: Costos de los tiempos obtenidos de la situación propuesta.

Fuente: Elaborado por los autores

Se puede observar que los porcentajes de mejora con respecto a los camiones mejoró en un 13 %, en distancias un 56 %, tiempos en un 30 % y costos en un 5 %.

Descripción	Camiones	Distancia (km)	Tiempo (h)	Costo total
Solución actual	8	1139.52	93	\$ 592.55
Recocido simulado	7	1084	65	\$ 563.68
Porcentaje de mejora	13 %	56 %	30 %	5 %

Tabla 3.9: Porcentajes de mejora

Fuente: Elaborado por los autores

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- La aplicación de la heurística HFCVRPTW permitió obtener una mejor propuesta de rutas para las recolecciones que la planificada actualmente y con la aplicación de la metaheurística recocido simulado se logró mejorar estos resultados.
- Los resultados obtenidos fueron favorables, mostrando así un orden de visita a los clientes y a su vez, reducción de tiempos de recorrido del 30% con un nivel de servicio del 95% y la disminución en el número de vehículos a utilizar. El tiempo en rutas disminuyó de 93 a 65 horas teniendo como consecuencia la reducción de los costos relacionados a la recolección de desechos. Al obtener menores tiempos en ruta se logra que la carga laboral de los conductores disminuya.
- Dado los diferentes niveles de servicios propuestos se observa que, a menor nivel de

servicio, los tiempos y distancias de recorridos disminuyen en comparación al nivel de servicio anterior.

- Con el uso de métodos de optimización y un programa que ayude a gestionar las rutas diarias se logra disminuir el tiempo de planificación dando como disminución de 5 horas a 15 minutos.
- Los objetivos propuestos en el capítulo 1 han sido alcanzados, ya que se logró disminuir los tiempos de planificación de las rutas.
- Se proyecta un ahorro total de \$3000, con el uso de estas herramientas.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda la aplicación de herramientas de optimización como son las heurísticas y las metaheurísticas para las empresas que requieran obtener mejores resultados en sus procesos, ya sean en tiempos y números de vehículos.
- Se recomienda gestionar con cada cliente, ya sea de manera personal o telefónica, sobre los horarios de recolección con el fin de cumplir con los tiempos establecidos y mejorar la comunicación con los mismos.
- Tener actualizada la base de datos para poder contar con información ordenada y actualizada, haciendo comprobaciones mensuales.
- Se deja a criterio de la empresa a elegir la opción que más le convenga en porcentaje de nivel de servicio.
- Gestionar indicadores de cumplimiento para la recolección de desechos.

- Este problema es bastante factible para empresas que se dediquen a la logística en reversa.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Arévalo J., (2018). “Optimización del ruteo de vehículos con ventanas de tiempo de una flota heterogénea de camiones (HFFCVRPTW) para la distribución de una empresa de venta de electrodomésticos”, ESPOL, Ecuador.

[2] Simon, S., Demalde, J. Carnero, M., (2011). “Optimización de Recorridos para la Recolección de Residuos Infecciosos”, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

[3] Arboleda J., Gaviria J., Alvarez J., (2018). “Propuesta de ruteo de vehículos con flota Heterogénea y ventanas de tiempo (HFVRPTW) aplicada a una comercializadora pyme de la ciudad de Cali”, Fundación Universidad de América.

[4] Dantzig, G. and Ramser, J. (1959) The Truck Dispatching Problem

[5] T.K. Ralphs, L. Kopman, W.R. Pulleyblank, and L.E. Trotter Jr. (2011) “On the Capacitated Vehicle Routing Problem”.

[6] Hernan J, Medina P, Arturo E. (2008), Un problema logístico de programación de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW). Universidad tecnológica de Pereira.

[7] Algoritmo bi-objetivo para el problema de enrutamiento óptimo de vehículos, considerando flota heterogénea y efectos ambientales. (2016), Universidad Tecnológica de Pereira.

- [8] GENDREAU, M.; POTVIN, J.Y. (Eds.) (2010). Handbook of Metaheuristics. International Series in Operations Research Management Science, Vol. 146, 2nd ed., Springer
- [9] Sandoya F., "Metaheurísticas y Redes Neuronales"(2015)
- [10] "Logística inversa en la gestión de la cadena de suministro", 2da edición, Domingo Cabeza, 2012
- [11] Willmer.J,Gatica G., (2014). "Un algoritmo metaheurístico para el problema de localización y ruteo con flota heterogénea", Universidad EAFIT
- [12] VRP Spreadsheet Solver (2017). Version 3.3. University of Bath
- [13] MATLAB. (2010). Version 7.10.0 (R2010a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

ANEXOS

ANEXO A. MATRIZ DE VENTANAS DE TIEMPOS, LATITUDES, LONGITUDES, PESOS Y NIVEL DE SERVICIO.

CLIENTE	LI	LS	LATITUD	LONGITUD	PESOS(KG)	NS(MIN)
1			-14.9680	-639.4722		
2	09:00	12:00	-15.8514	-639.1652	13.2	3
3	09:00	11:30	-16.0111	-638.8714	0.9	7
4	08:00	16:30	-15.9877	-639.0150	27.17	11
5	08:00	16:00	-15.9503	-639.0641	14.8	6
6	08:00	15:00	-15.9341	-639.1428	0.78	3
7	14:00	17:00	-15.9267	-639.0207	314	20
8	10:00	16:00	-15.9041	-639.0407	1.1	3
9	14:00	17:00	-15.8949	-639.1197	104.87	3
10	08:00	16:30	-15.8902	-639.0114	11.5	3

CLIENTE	LI	LS	LATITUD	LONGITUD	PESOS(KG)	NS(MIN)
11	08:00	16:30	-15.8733	-639.0585	21.8	3
12	08:00	16:30	-15.8511	-638.9930	6.2	11
13	11:00	14:00	-15.8474	-639.1099	2.4	3
14	08:00	13:00	-15.8253	-639.1371	3.3	3
15	15:00	19:00	-15.8141	-638.9664	0.2	3
16	08:30	16:00	-15.8125	-639.0055	21.3	13
17	08:00	16:30	-15.7949	-639.0371	14.2	5
18	09:00	12:30	-15.7892	-639.0476	1.4	3
19	08:00	16:30	-15.7887	-639.0085	34.6	5
20	08:00	16:30	-15.7598	-639.0952	17.2	4
21	07:00	19:00	-15.7516	-639.0309	42.4	9
22	08:00	11:00	-15.7513	-639.3978	0.9	3
23	07:00	11:00	-15.7509	-639.0420	0.2	3
24	05:30	09:00	-15.7262	-639.1652	118.7	11
25	08:00	11:00	-15.7060	-639.0919	0.4	3
26	08:30	16:00	-15.6791	-639.3814	11.4	3
27	07:00	08:30	-15.6500	-639.2134	186.2	5

CLIENTE	LI	LS	LATITUD	LONGITUD	PESOS(KG)	NS(MIN)
28	07:30	16:00	-15.6462735	-639.1218769	2.9	3
29	09:00	14:00	-15.6316482	-640.6450688	0.5	3
30	08:30	10:30	-15.6264969	-639.1956816	992.3	27
31	08:00	12:00	-15.6228030	-639.1767440	25.1	7
32	08:30	09:30	-15.6155951	-639.1466960	129.9	11
33	07:00	09:00	-15.5808597	-639.2331184	163.8	5
34	07:30	08:30	-15.5403997	-639.1613920	48.1	3
35	12:00	16:00	-15.5385321	-639.1494432	206.2	10
36	09:30	19:00	-15.5329090	-639.2736512	3.09	8
37	08:00	12:30	-15.5249724	-639.1353632	2.01	3
38	09:00	12:00	-15.5061879	-639.1131736	9.6	8
39	14:00	17:00	-15.5056622	-639.1145032	123.5	12
40	14:00	17:00	-15.5054900	-639.1140768	12	5
41	07:00	08:00	-15.5046192	-639.1173032	114.8	3
42	14:00	17:00	-15.5022147	-639.1471336	2.1	3
43	08:00	17:00	-15.4868217	-639.4402656	949.5	39
44	11:00	13:00	-15.4837774	-639.1219392	8.4	3
45	08:00	12:00	-15.4788782	-639.1266511	15.7	6
46	08:00	13:00	-15.4735722	-639.2326597	0.8	3
47	09:00	11:30	-15.4613270	-639.4104776	41	12
48	13:00	16:00	-15.4583625	-639.0818720	111.1	6
49	08:00	17:00	-15.4504987	-639.2064408	52.8	12
50	11:30	13:30	-15.4462665	-639.0933648	0.77	3
51	07:00	17:00	-15.4461521	-639.1039164	0.9	20
52	16:00	17:30	-15.4436968	-639.2211352	5.9	6
53	16:00	19:00	-15.4415212	-639.1124040	21.8	3
54	13:00	16:30	-15.4356965	-639.1131040	8	6
55	09:30	12:30	-15.4320999	-639.2534976	1.6	3
56	09:00	17:00	-15.4303079	-639.2125944	1.62	6
57	09:00	12:00	-15.4225470	-639.1307440	0.5	3
58	07:00	07:00	-15.4182900	-639.0979465	1.5	3
59	08:00	16:00	-15.4176526	-639.0984472	29	18
60	16:00	17:30	-15.4175707	-639.0949072	5.9	8
61	09:00	12:00	-15.4022400	-639.1230768	2.4	9
62	08:00	17:00	-15.3871337	-639.1658073	471.5	2
63	08:30	09:30	-15.3842052	-639.0532640	486.4	15
64	09:00	12:00	-15.3810076	-639.1054928	25.2	6
65	10:00	14:00	-15.3810076	-639.1054928	1.9	3

CLIENTE	LI	LS	LATITUD	LONGITUD	PESOS(KG)	NS(MIN)
66	09:00	17:00	-15.3798652	-639.1060416	0.5	3
67	10:00	14:00	-15.3792632	-639.1032800	0.58	3
68	18:00	20:00	-15.3792632	-639.1032800	0.5	3
69	07:00	13:00	-15.3783724	-639.1062118	3	12
70	08:30	12:00	-15.3746285	-639.2240216	1.6	3
71	08:30	17:00	-15.3712699	-639.1017112	0.24	3
72	10:00	15:00	-15.5061438	-639.1202240	29.3	6
73	09:00	13:00	-15.3712699	-639.1017112	0.31	3
74	05:30	06:30	-15.3635146	-639.0928080	34.3	12
75	08:00	17:00	-15.3633473	-639.1092544	3.3	3
76	08:00	11:00	-15.3633473	-639.1092544	2.5	6
77	08:00	11:00	-15.3409515	-639.1309688	4	5
78	08:30	12:00	-15.3380248	-639.0876888	15.9	21
79	09:00	17:00	-15.3358331	-639.3121696	0.5	6
80	08:00	17:00	-15.3332704	-639.5417200	35.1	6
81	06:00	07:30	-15.3214593	-639.1029560	92.9	3
82	08:00	18:00	-15.3116306	-639.1329696	11.8	3
83	09:00	11:00	-15.3054804	-639.0438152	246.9	17
84	07:30	17:00	-15.3047223	-639.7537880	10.3	15
85	11:00	15:00	-15.3013973	-639.0252664	0.2	3
86	08:00	17:00	-15.2932388	-639.0784600	70.4	10
87	08:00	17:00	-15.2854674	-639.8889240	3.2	9
88	09:00	17:00	-15.2841850	-639.8135064	2.87	3
89	08:00	12:00	-15.2574891	-639.0961112	75.8	3
90	07:00	09:00	-15.2549509	-639.1381344	271.2	18
91	07:00	09:00	-15.2530728	-639.1375984	84.4	6
92	08:00	10:00	-15.2524113	-639.1955592	9.9	7
93	10:30	11:00	-15.2495049	-639.0718112	48.1	18
94	09:00	11:00	-15.2451586	-639.5236216	0.4	10
95	09:00	13:00	-15.2399961	-639.2196504	119.6	20
96	11:30	14:00	-15.2389531	-639.2128256	65.8	13
97	10:00	21:00	-15.2362770	-639.5492616	1.9	6
98	10:00	20:00	-15.2315345	-639.2680168	10.8	8
99	08:00	18:00	-15.2300477	-639.2563840	0.8	6
100	08:00	17:00	-15.2255992	-639.1623088	1.1	15
101	08:30	17:00	-15.2207664	-639.2767808	281.5	12
102	16:00	19:00	-15.2196415	-639.1965976	1	6

CLIENTE	LI	LS	LATITUD	LONGITUD	PESOS(KG)	NS(MIN)
103	09:00	11:00	-15.2188960	-639.0448648	75.7	3
104	09:00	11:00	-15.2166973	-639.0617472	1.7	15
105	07:00	10:00	-15.2141836	-639.0539640	245.1	18
106	08:00	17:00	-15.2121417	-639.2012800	23.9	3
107	06:00	07:30	-15.2115705	-639.1942824	23	3
108	07:00	19:00	-15.1965247	-639.2886488	44.1	9
109	14:00	17:00	-15.1885279	-639.4983320	12	15
110	15:00	17:00	-15.1849460	-639.1690896	79.7	3
111	08:00	10:00	-15.1843048	-639.1501952	552.7	27
112	10:00	18:00	-15.1830735	-639.2872592	0.44	3
113	07:30	12:30	-15.1764445	-639.1641912	4.2	5
114	07:30	15:00	-15.1732105	-639.1543936	8.8	5
115	08:00	18:00	-15.1499597	-639.3620338	15.7	8
116	08:00	12:00	-15.1496415	-639.3444544	263.8	21
117	08:00	12:00	-15.1483753	-639.3444261	2.9	6
118	08:00	15:00	-15.1393914	-639.3548288	5.3	5
119	06:00	21:00	-15.1258114	-639.1970808	11.3	13
120	07:30	13:00	-15.1246228	-639.3057464	5.44	3
121	14:00	17:30	-15.1224584	-639.2008424	1.7	3
122	10:00	14:00	-15.1208785	-639.1683904	8.8	11
123	09:30	17:00	-15.1208785	-639.1683904	0.35	6
124	14:00	18:00	-15.1201148	-639.1510696	73.7	6
125	12:00	15:00	-15.1179147	-639.1596424	0.7	3
126	07:30	08:30	-15.1017930	-639.1330960	0.9	12
127	07:30	12:00	-15.1012750	-639.1340480	174.3	12
128	07:30	09:30	-15.0996937	-639.1329616	29	22
129	12:00	15:00	-15.0883488	-639.4444056	8.2	6
130	10:00	11:00	-15.0797822	-639.1320632	9	3
131	09:00	18:00	-15.0722453	-639.2025040	3.5	3
132	10:00	12:00	-15.0533320	-639.1376320	2.3	6
133	08:00	18:00	-15.0509233	-639.4716864	1.2	6
134	08:00	08:30	-15.0469760	-639.2033792	423	3
135	14:00	18:00	-15.0365327	-639.2617192	2	3
136	10:00	13:00	-15.0294739	-639.2936088	0.4	9
137	07:30	14:30	-15.0165673	-639.2223224	4.4	4
138	08:00	13:00	-15.0147172	-639.3894912	17.5	9
139	06:30	08:00	-15.0144659	-639.2100264	6.5	10
140	08:00	16:30	-14.9980236	-639.0728568	23.1	3

CLIENTE	LI	LS	LATITUD	LONGITUD	PESOS(KG)	NS(MIN)
141	07:30	11:00	-14.9958214	-639.2799984	1.6	6
142	08:00	11:00	-14.9958214	-639.2799984	1.2	10
143	10:00	13:00	-14.9816807	-639.2142248	0.4	3
144	07:30	09:30	-14.9815827	-639.4293347	2.9	3
145	09:00	16:00	-15.3203470	-639.3421200	4.24	8
146	10:00	14:00	-14.9764720	-639.2740512	8.2	11
147	07:00	09:00	-14.9893387	-639.2406096	129.5	8
148	08:00	13:00	-14.9854621	-639.4444304	3.5	8
149	06:40	07:00	-14.9574775	-639.2380160	95	9
150	06:00	07:00	-14.9815211	-639.1864288	11.3	9
151	09:00	19:00	-14.9455327	-639.2079240	3.8	3
152	14:00	17:00	-14.9434670	-639.2235680	12	22
153	08:00	15:00	-14.9399383	-639.4690184	0.1	6
154	08:00	13:00	-14.9013263	-639.5468776	3.5	8
155	08:00	16:00	-14.9009329	-639.1124040	47.2	3
156	09:00	13:00	-14.8958593	-639.2449288	0.96	12
157	14:00	18:00	-14.8939196	-639.2535768	0.5	3
158	06:00	12:00	-14.8887725	-639.9951520	71.42	12
159	13:00	15:00	-14.8700027	-639.2523608	41.4	3
160	08:00	12:00	-14.8678299	-639.2425648	18.8	11
161	06:00	14:00	-14.8468152	-639.2103768	1.4	3
162	09:00	11:00	-14.8369039	-639.4640792	70.9	12
163	08:00	12:00	-14.8368955	-639.4607120	17.2	12
164	08:00	16:00	-14.8078483	-639.2011200	75	10
165	08:30	17:30	-14.7261219	-639.4786808	2.3	8
166	06:00	07:00	-14.6928222	-639.5738048	435.26	18
167	08:30	16:30	-14.6848382	-639.5386447	0.9	6
168	08:00	12:00	-14.5020470	-639.4870744	19.9	6
169	09:00	16:00	-14.4002439	-639.6437328	3.5	21
170	08:00	17:00	-14.3801679	-639.6101720	0.8	6
171	08:00	14:00	-14.1681890	-639.4702872	3	8
172	09:00	12:00	-13.9808830	-639.7536128	0.76	24
173	08:00	16:30	-13.9650763	-639.7696072	1.1	21
174	09:00	12:00	-15.4804195	-639.1455360	12.6	6
175	07:30	18:00	-15.3189757	-639.1381976	0.48	9
176	15:00	16:00	-15.2790064	-639.1301856	37.6	3
177	09:00	13:00	-15.1323767	-639.1709872	2.8	18
178	09:30	12:00	-14.5050843	-639.4761128	1	3

ANEXO B. MATRIZ DE DISTANCIA Y TIEMPO DE RECORRIDOS

Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
depósito	depósito	0.00	00:00:00
depósito	Cliente 1	17.15	00:39:00
depósito	Cliente 2	21.84	00:55:00
depósito	Cliente 3	20.54	00:52:00
depósito	Cliente 4	19.56	00:48:00
depósito	Cliente 5	18.92	00:45:00
depósito	Cliente 6	19.51	00:51:00
depósito	Cliente 7	19.08	00:53:00
depósito	Cliente 8	18.14	00:42:00
depósito	Cliente 9	18.91	00:50:00
depósito	Cliente 10	18.75	00:45:00
depósito	Cliente 11	18.54	00:49:00
depósito	Cliente 12	17.59	00:44:00
depósito	Cliente 13	17.11	00:43:00
depósito	Cliente 14	18.07	00:47:00
depósito	Cliente 15	17.83	00:47:00
depósito	Cliente 16	17.25	00:45:00
depósito	Cliente 17	17.10	00:45:00
depósito	Cliente 18	17.40	00:46:00
depósito	Cliente 19	16.20	00:40:00
depósito	Cliente 20	16.67	00:43:00
depósito	Cliente 21	15.80	00:36:00
depósito	Cliente 22	16.59	00:44:00
depósito	Cliente 23	14.82	00:35:00
depósito	Cliente 24	15.48	00:40:00
depósito	Cliente 25	14.72	00:33:00
depósito	Cliente 26	13.75	00:37:00
depósito	Cliente 27	14.08	00:35:00
depósito	Cliente 28	24.81	00:26:00
depósito	Cliente 29	13.38	00:32:00
depósito	Cliente 30	14.01	00:33:00
depósito	Cliente 31	13.56	00:34:00
depósito	Cliente 32	12.25	00:29:00
depósito	Cliente 33	12.06	00:30:00
depósito	Cliente 34	12.04	00:30:00
depósito	Cliente 35	11.01	00:25:00

Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
depósito	Cliente 36	11.89	00:29:00
depósito	Cliente 37	11.85	00:29:00
depósito	Cliente 38	11.83	00:29:00
depósito	Cliente 39	11.83	00:29:00
depósito	Cliente 40	11.79	00:29:00
depósito	Cliente 41	11.40	00:28:00
depósito	Cliente 42	9.89	00:19:00
depósito	Cliente 43	11.33	00:27:00
depósito	Cliente 44	11.19	00:27:00
depósito	Cliente 45	10.35	00:23:00
depósito	Cliente 46	9.75	00:17:00
depósito	Cliente 47	10.93	00:24:00
depósito	Cliente 48	10.05	00:23:00
depósito	Cliente 49	10.72	00:24:00
depósito	Cliente 50	10.50	00:23:00
depósito	Cliente 51	9.99	00:20:00
depósito	Cliente 52	10.35	00:22:00
depósito	Cliente 53	10.21	00:22:00
depósito	Cliente 54	9.58	00:20:00
depósito	Cliente 55	9.42	00:20:00
depósito	Cliente 56	10.02	00:21:00
depósito	Cliente 57	10.13	00:22:00
depósito	Cliente 58	10.14	00:22:00
depósito	Cliente 59	10.09	00:21:00
depósito	Cliente 60	9.74	00:20:00
depósito	Cliente 61	8.98	00:18:00
depósito	Cliente 62	10.00	00:21:00
depósito	Cliente 63	9.35	00:19:00
depósito	Cliente 64	9.35	00:19:00
depósito	Cliente 65	9.34	00:19:00
depósito	Cliente 66	9.35	00:19:00
depósito	Cliente 67	9.35	00:19:00
depósito	Cliente 68	9.26	00:19:00
depósito	Cliente 69	8.64	00:18:00
depósito	Cliente 70	9.22	00:19:00

Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
depósito	Cliente 71	11.75	00:29:00
depósito	Cliente 72	9.22	00:19:00
depósito	Cliente 73	9.32	00:20:00
depósito	Cliente 74	9.05	00:18:00
depósito	Cliente 75	9.05	00:18:00
depósito	Cliente 76	8.37	00:15:00
depósito	Cliente 77	8.96	00:18:00
depósito	Cliente 78	7.39	00:14:00
depósito	Cliente 79	7.20	00:16:00
depósito	Cliente 80	8.44	00:16:00
depósito	Cliente 81	8.03	00:16:00
depósito	Cliente 82	9.56	00:22:00
depósito	Cliente 83	11.27	00:13:00
depósito	Cliente 84	9.65	00:21:00
depósito	Cliente 85	8.99	00:20:00
depósito	Cliente 86	11.53	00:13:00
depósito	Cliente 87	10.30	00:10:00
depósito	Cliente 88	8.40	00:21:00
depósito	Cliente 89	7.93	00:20:00
depósito	Cliente 90	8.02	00:14:00
depósito	Cliente 91	6.88	00:16:00
depósito	Cliente 92	9.11	00:23:00
depósito	Cliente 93	8.30	00:16:00
depósito	Cliente 94	6.57	00:16:00
depósito	Cliente 95	6.71	00:16:00
depósito	Cliente 96	5.26	00:09:00
depósito	Cliente 97	5.80	00:14:00
depósito	Cliente 98	6.08	00:15:00
depósito	Cliente 99	7.07	00:19:00
depósito	Cliente 100	5.59	00:14:00
depósito	Cliente 101	6.74	00:18:00
depósito	Cliente 102	8.69	00:22:00
depósito	Cliente 103	8.36	00:21:00
depósito	Cliente 104	8.45	00:21:00
depósito	Cliente 105	6.55	00:17:00
depósito	Cliente 106	6.61	00:17:00
depósito	Cliente 107	5.15	00:13:00

Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
depósito	Cliente 108	5.24	00:12:00
depósito	Cliente 109	6.67	00:18:00
depósito	Cliente 110	7.15	00:13:00
depósito	Cliente 111	5.05	00:14:00
depósito	Cliente 112	6.80	00:18:00
depósito	Cliente 113	6.96	00:13:00
depósito	Cliente 114	4.06	00:11:00
depósito	Cliente 115	4.23	00:11:00
depósito	Cliente 116	4.19	00:11:00
depósito	Cliente 117	4.04	00:10:00
depósito	Cliente 118	5.93	00:14:00
depósito	Cliente 119	4.20	00:10:00
depósito	Cliente 120	5.55	00:12:00
depósito	Cliente 121	6.11	00:12:00
depósito	Cliente 122	6.11	00:12:00
depósito	Cliente 123	6.01	00:11:00
depósito	Cliente 124	6.08	00:11:00
depósito	Cliente 125	7.62	00:18:00
depósito	Cliente 126	7.63	00:18:00
depósito	Cliente 127	7.61	00:18:00
depósito	Cliente 128	1.99	00:04:00
depósito	Cliente 129	6.13	00:15:00
depósito	Cliente 130	4.99	00:09:00
depósito	Cliente 131	5.81	00:14:00
depósito	Cliente 132	1.47	00:03:00
depósito	Cliente 133	5.02	00:10:00
depósito	Cliente 134	3.57	00:07:00
depósito	Cliente 135	3.11	00:06:00
depósito	Cliente 136	4.25	00:09:00
depósito	Cliente 137	2.13	00:05:00
depósito	Cliente 138	4.95	00:11:00
depósito	Cliente 139	6.85	00:15:00
depósito	Cliente 140	4.09	00:10:00
depósito	Cliente 141	4.09	00:10:00
depósito	Cliente 142	4.98	00:11:00
depósito	Cliente 143	1.07	00:02:00
depósito	Cliente 144	7.44	00:14:00

Desde	Hacia	Distancia (km)	Duración (h)
depósito	Cliente 145	4.10	00:09:00
depósito	Cliente 146	4.49	00:11:00
depósito	Cliente 147	0.92	00:02:00
depósito	Cliente 148	5.04	00:14:00
depósito	Cliente 149	5.55	00:12:00
depósito	Cliente 150	4.96	00:11:00
depósito	Cliente 151	5.09	00:13:00
depósito	Cliente 152	1.84	00:05:00
depósito	Cliente 153	2.01	00:06:00
depósito	Cliente 154	7.37	00:19:00
depósito	Cliente 155	6.24	00:15:00
depósito	Cliente 156	5.46	00:13:00
depósito	Cliente 157	9.53	00:26:00
depósito	Cliente 158	4.97	00:16:00
depósito	Cliente 159	5.85	00:17:00
depósito	Cliente 160	5.98	00:18:00
depósito	Cliente 161	2.87	00:09:00
depósito	Cliente 162	2.92	00:09:00
depósito	Cliente 163	6.73	00:21:00
depósito	Cliente 164	4.55	00:09:00
depósito	Cliente 165	5.73	00:16:00
depósito	Cliente 166	5.26	00:14:00
depósito	Cliente 167	8.47	00:14:00
depósito	Cliente 168	11.10	00:18:00
depósito	Cliente 169	10.96	00:17:00
depósito	Cliente 170	21.66	00:35:00
depósito	Cliente 171	17.32	00:21:00
depósito	Cliente 172	17.64	00:21:00
depósito	Cliente 173	11.08	00:26:00
depósito	Cliente 174	7.87	00:14:00
depósito	Cliente 175	8.55	00:19:00
depósito	Cliente 176	6.25	00:13:00
depósito	Cliente 177	8.56	00:14:00

ANEXO C. ENTREVISTA REALIZADA A LA JEFA DE OPERACIONES

1. ¿Considera que presenta un problema con respecto a la planificación de rutas en la actualidad?

Sí, dado que el tiempo que se toman para la planificación diaria es aproximadamente de 5 a 6 horas.

2. ¿Cuáles son los problemas más frecuentes en la planificación diaria de las rutas?

Jornadas laborales muy extensas para los transportistas y que no se cuenta con una secuencia previamente definida de visitas.

3. ¿Utiliza actualmente un software de gestión de rutas?

No, actualmente no contamos con un software encargado específicamente para esto.

Se lleva la planificación con Excel y sus filtros.

4. ¿La capacidad de sus camiones son homogéneos o heterogéneos?

Los camiones que usamos son de flota heterogénea y propia.

5. ¿Cuál es la capacidad de los camiones?

Contamos con camiones de 3,5 y 10 toneladas.

6. ¿Cuáles son los tipos de clientes con el cual trabaja la empresa?

Tenemos diferentes tipos de clientes ya sea para desechos hospitalarios, peligrosos e industriales.

7. ¿Los transportistas tienen horarios específicos de trabajo?

Sí, de 8 horas. En el caso de haber rutas más largas se les paga hora extras.