



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Instituto de Ciencias Matemáticas

Ingeniería en Logística y Transporte

“Dimensionamiento de flota y diseño de rutas de distribución de productos alimenticios refrigerados y secos para un operador logístico”

TESIS DE GRADO

Previo la obtención del título de:

Ingeniero en Logística y Transporte

Presentado por:

José Eduardo Cabrera Morales

Justine Andrea Sánchez Salvatierra

Guayaquil – Ecuador

2012

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a Dios por la sabiduría brindada durante mi etapa estudiantil. A mi mamá por ser el pilar fundamental en mi vida, por su incondicional apoyo y por el valor mostrado para salir adelante. A mi esposa por ser mi compañera inseparable en cada reto y sobre todo por la confianza depositada en mí. A mi hija, mi principal motivación para superarme día a día.

José Eduardo Cabrera Morales

Hoy culmina una etapa importante de mi vida, sin duda alguna nada de esto sería posible sin la existencia del ser que me dio la vida y mi querido hermano a quienes dedico éste y todos mis logros por ser mi razón de vida, mi sustento, mi apoyo, la fuerza que me empuja a salir adelante. Tal vez nunca he expresado lo valiosos que son para mí, tomo como excusa esta dedicatoria para decirles que los amo con todo mi ser y que a pesar de la distancia están siempre presentes.

Justine Andrea Sánchez Salvatierra

AGRADECIMIENTOS

A Don Morales, mi mamá, mi esposa y mi suegra por el apoyo y motivación constante. A todas las personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo. Finalmente, un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad, que me ha brindado una formación de calidad y excelencia.

José Eduardo Cabrera Morales

Agradezco a mi madre por darme una formación con valores y principios que han hecho posible el cumplimiento de mis objetivos. A Pamela Rosero, Ruth Salvatierra y Gloria De la Presa por confiar en mí y abrirme las puertas de su hogar brindándome no solo un techo sino también el afecto que necesitaba al no tener a mi familia conmigo. A Diego Toscano por el amor y el apoyo incondicional que me das.

Justine Andrea Sánchez Salvatierra

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por del contenido de este Trabajo final de graduación nos corresponden exclusivamente, así como el patrimonio intelectual del mismo corresponde a la Escuela Superior Politécnica Del Litoral.

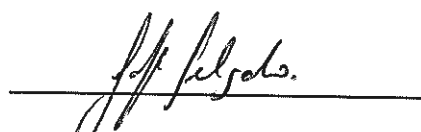


JOSÉ CABRERA MORALES



**JUSTINE SÁNCHEZ
SALVATIERRA**

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



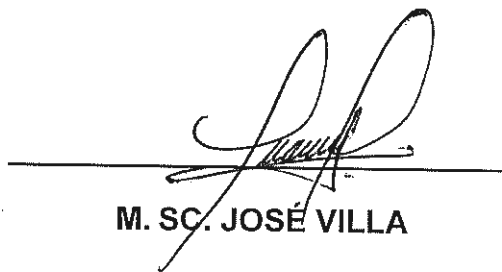
M. SC. ERWIN DELGADO

PRESIDENTE



M. SC. VÍCTOR VEGA CHICA

DIRECTOR DE TESIS



M. SC. JOSÉ VILLA

VOCAL

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIAS.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
DECLARACIÓN EXPRESA	IV
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN	V
TABLA DE CONTENIDO	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ABREVIATURAS	XV
RESUMEN.....	XVIII
1 OBJETIVOS Y GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema	2
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Objetivo General.....	5
1.5 Objetivos Específicos.....	5
1.6 Distribución de productos refrigerados y secos	6

2	MARCO TEÓRICO	8
2.1	Introducción	8
2.2	Investigación de Operaciones.....	8
2.3	Programación Lineal	10
2.4	Problemas de Optimización Combinatoria.....	12
2.5	Complejidad Computacional	14
2.6	Vehicle Routing Problem (VRP).....	15
2.6.1	Variantes del Vehicle Routing Problem	17
2.7	Vehicle Routing Problem-Time Windows (VRPTW).....	19
2.8	Modelo matemático del VRPTW	20
2.9	Parámetros del modelo.....	23
2.9.1	Costos Fijos y Costos variables	24
2.9.2	Capacidad de Carga	25
2.9.3	Demanda.....	25
2.9.4	Ventanas Horarias.....	26
2.9.5	Distancias.....	26
2.9.6	Tiempos de desplazamiento	27

2.9.7	Tiempos de servicio	28
2.10	Técnicas de Optimización	28
2.11	Búsqueda Tabú	31
2.11.1	Lista Tabú	33
2.11.2	Memoria de mediano y largo plazo	335
2.11.3	Algoritmo de la Búsqueda Tabú	36
3	DESARROLLO DEL PROBLEMA	37
3.1	Introducción	37
3.2	Herramientas Informáticas	38
3.3	Selección del Vehículo	39
3.3.1	Especificaciones generales para vehículos refrigerados	39
3.3.2	Elección de la marca y capacidades del vehículo	40
3.4	Parámetros del Modelo	47
3.4.1	Cálculo de Costos Fijos y Costos Variables	47
3.4.2	Capacidad de Carga	54
3.4.3	Demanda	55
3.4.4	Ventanas Horarias	57

3.4.5	Distancias.....	59
3.4.6	Tiempos de desplazamiento	60
3.4.7	Tiempo de servicio	60
3.5	Heurística de segmentación de clientes	61
3.6	Estructura del algoritmo Tabú que resuelve el problema.....	62
3.6.1	Determinación de la solución inicial	63
3.6.2	Estructura del vecindario.....	64
3.6.3	Evaluación de los movimientos	65
3.6.4	Creación de la lista Tabú y criterio de aspiración	65
3.7	Funciones elementales para la aplicación del Tabú	66
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
4.1	Selección del vehículo	68
4.2	Heurística de segmentación	69
4.3	Resultados del ruteo	70
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
5.1	Conclusiones	81
5.2	Recomendaciones	83

6	ANEXOS.....	86
6.1	Unificación de demanda de la zona 1 de productos refrigerados	86
6.2	Unificación de demanda de la zona 2 de productos refrigerados	87
6.3	Unificación de demanda de la zona 3 de productos refrigerados	87
6.4	Unificación de demanda de la zona 1 de productos secos	88
6.5	Unificación de demanda de la zona 2 de productos secos	89
6.6	Unificación de demanda de la zona 3 de productos secos	89
6.7	Matriz de distancias de la zona 1 de productos refrigerados	90
6.8	Matriz de distancias de la zona 2 de productos refrigerados	91
6.9	Matriz de distancias de la zona 3 de productos refrigerados	91
6.10	Matriz de distancias de la zona 1 de productos secos.....	92
6.11	Matriz de distancias de la zona 2 de productos secos.....	93
6.12	Matriz de distancias de la zona 3 de productos secos.....	93
	BIBLIOGRAFÍA	94

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2-1. Representación gráfica de un VRP 16

Figura 2-2. Gráfico de la distancia entre dos puntos..... 27

Figura 2-3. Idea básica del algoritmo de la búsqueda tabú [8]. 36

CAPÍTULO 3

Figura 3-1. Heurística de segmentación 62

CAPÍTULO 4

Figura 4-1. Ruteo para la entrega de productos refrigerados en la zona 1 71

Figura 4-2. Ruteo para la entrega de productos refrigerados en la zona 2 72

Figura 4-3. Ruteo para la entrega de productos refrigerados en la zona 3 73

Figura 4-4. Ruteo para la entrega de productos secos en la zona 1 76

Figura 4-5. Ruteo para la entrega de productos secos en la zona 2 77

Figura 4-6. Ruteo para la entrega de productos secos en la zona 3 78

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1-1. Resumen de costos actuales	3
---	---

CAPÍTULO 2

Tabla 2-1. Variantes del VRP.....	18
-----------------------------------	----

CAPÍTULO 3

Tabla 3-1. Aspectos de evaluación	42
Tabla 3-2. Escala de evaluación	43
Tabla 3-3. Evaluación de las opciones 1 y 2.....	45
Tabla 3-4. Evaluación de las opciones 1, 2 y 3.....	46
Tabla 3-5. Tabla de costos fijos de vehículos de carga refrigerada	49
Tabla 3-6. Tabla de costos fijos de vehículos de carga seca.....	50
Tabla 3-7. Tabla aproximación del tiempo de cambio de filtros	52
Tabla 3-8. Precios de Filtros	53
Tabla 3-9. Precios de llantas	53
Tabla 3-10. Precios de galones de aceite	53
Tabla 3-11. Costos variables de vehículos de carga refrigerada	54
Tabla 3-12. Costos variables de vehículos de carga seca.....	54
Tabla 3-13. Capacidades de vehículos	55
Tabla 3-14. Demandas de productos refrigerados.....	56

Tabla 3-15. Demandas de productos secos	57
Tabla 3-16. Ventanas de tiempo para la recepción de productos refrigerados ..	58
Tabla 3-17. Ventanas de tiempo para la recepción de productos secos.....	59

CAPÍTULO 4

Tabla 4-1. Resumen de la selección de marca para vehículo de 3,5 Ton	68
Tabla 4-2. Resumen de la selección de marca para vehículos de 5 y 10 Ton ...	69
Tabla 4-3. Precios de vehículos seleccionados	69
Tabla 4-4. Clasificación de clientes que demandan productos refrigerados	70
Tabla 4-5. Clasificación de clientes que demandan productos secos.....	70
Tabla 4-6. Iteraciones del algoritmo en la zona 1 para productos refrigerados con $n=40$ y $m=120$	71
Tabla 4-7. Iteraciones del algoritmo en la zona 2 para productos refrigerados con $n=40$ y $m=120$	72
Tabla 4-8. Iteraciones del algoritmo en la zona 3 para productos refrigerados con $n=40$ y $m=120$	73
Tabla 4-9. Tipos de vehículos utilizados por ruta para distribución de productos refrigerados.....	74
Tabla 4-10. Horas de visita a clientes de productos refrigerados	75
Tabla 4-11. Costos totales de distribución de productos refrigerados	75
Tabla 4-12. Iteraciones del algoritmo en la zona 1 para productos secos con $n=40$ y $m=120$	76

Tabla 4-13. Iteraciones del algoritmo en la zona 2 para productos secos con n=40 y m=120	77
Tabla 4-14. Iteraciones del algoritmo en la zona 3 para productos secos con n=40 y m=120	78
Tabla 4-15. Tipos de vehículos utilizados por ruta para distribución de productos secos	79
Tabla 4-16. Horas de visita a clientes de productos secos	80
Tabla 4-17. Costos totales de distribución de productos secos	80

CAPÍTULO 5

Tabla 5-1. Costos totales de transportación	81
Tabla 5-2. Cantidades de vehículos a utilizar para la distribución de productos	82
Tabla 5-3. Cantidades de Vehículos a subcontratar para productos refrigerados	83
Tabla 5-4. Cantidades de Vehículos a subcontratar para productos secos	84

ABREVIATURAS

OPL	Operador Logístico
Ton	Toneladas
IO	Investigación de operaciones
PL	Programación lineal
OC	Optimización Combinatoria
VRP	Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular)
CVRP	Capacited Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular con capacidades)
MDVRP	Multiple Depot Vehicle Routing Problem (Problema de ruteo vehicular con múltiples depósitos)
VRPPD	Vehicle Routing Problem – Pickup and Delivery (Problema de ruteo vehicular con entregas y devoluciones)

SDVRP	Split Delivery Vehicle Routing Problem (Problema de entregas divididas con diferentes vehículos)
SVRP	Stochastic Vehicle Routing Problem (Problema del ruteo vehicular con diferentes valores al azar)
CVRPTW	Vehicle Routing Problem -Time Windows (Problema del ruteo vehicular con ventanas de tiempo)
VRPSD	Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands (Problema del ruteo vehicular con demanda estocástica)
VRPSDC	Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Customers (Problema del ruteo vehicular con clientes y demandas estocásticas)
VRPST	Vehicle Routing Problem with Stochastic Travel Times (Problema del ruteo vehicular con tiempos de viajes variables)

VRPM

Vehicle Routing Problem with Multiple use of
vehicles (Problema del ruteo vehicular con
múltiple uso del vehículo)

RESUMEN

El presente trabajo es realizado para una empresa de la ciudad de Guayaquil que desarrolla operaciones logísticas para su propia red de locales de comida rápida y para otras empresas que no poseen el suficiente “Know How” para realizarlas, siendo la distribución de diversos productos alimenticios refrigerados y secos su actividad de mayor trascendencia y en la cual se enfoca el presente estudio. Dicha distribución se ejecuta de manera empírica, incurriendo en gastos por devoluciones debido a que no se cumplen las ventanas de tiempo pactadas entre las partes involucradas, además se está pagando un precio estándar por la transportación de productos refrigerados y otro para los productos secos, lo que no es correcto ya que se están obviando diversos aspectos que afectan directamente a los costos totales.

En función de esto, se planteó la utilización de un modelo matemático que permita establecer la cantidad y capacidad de vehículos necesarios, el costo de transportación y la ruta que cada vehículo debe realizar. Para ello fue necesario realizar la elección de la marca y modelo idóneos para la transportación de los diferentes productos, el análisis de costos de transportación y el diseño de rutas.

La marca de los vehículos se determinó empleando el concepto de matriz de ponderaciones por su efectividad y gran rapidez en la toma de decisiones, definida para tres aspectos específicos en base a un estudio de mercado

exploratorio realizado al personal especializado de cinco empresas dedicadas a la transportación de carga.

Luego se determinaron los costos fijos y variables de utilización de cada tipo de vehículo. Los costos fijos considerados para el presente estudio implican el valor comercial del vehículo, el costo del furgón, sueldos, seguros, costo de matrícula, depreciación del vehículo, baterías y mantenimiento del vehículo. Mientras que los costos variables dependen de los kilómetros recorridos y están compuestos por el consumo de combustible, llantas, filtros y lubricantes.

Finalmente, el diseño de las rutas de distribución es realizado para cada zona tanto de productos refrigerados como de productos secos, por lo que se modela el problema como un VRPTW (Vehicle Routing Problem Time Windows), y se lo resuelve mediante la aplicación de una metaheurística, luego del cual se obtienen las cantidades necesarias de cada tipo de vehículo a un precio justo de transportación y garantizando la entrega de los productos en la cantidad y hora de llegada acordada.

CAPÍTULO 1

1 OBJETIVOS Y GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

La empresa objeto de estudio, a quien denominaremos el OPL, realiza sus labores como una central de compras, brindando sus servicios a diversos clientes en la provincia del Guayas, en actividades relacionadas con el almacenamiento, la gestión de inventarios y la distribución de productos alimenticios desde la central de compras hasta los puntos de uso o consumo.

El OPL distribuye dos tipos de productos alimenticios: productos secos y productos refrigerados. Para el transporte de carga refrigerada se emplea una flota heterogénea de vehículos, mientras que para la carga seca se utiliza únicamente vehículos de 5 Ton; en este último caso el OPL trabaja con una flota homogénea de vehículos. En ambos casos los medios de transporte a utilizar no forman parte de los activos de la empresa; es decir, se subcontrata una flota de vehículos que cumplen con las especificaciones técnicas requeridas para la correcta conservación de los diferentes productos a transportar.

En sus inicios, el OPL realizaba sus operaciones logísticas como actividad de soporte para su propia red de locales de comida rápida, debido a la creciente

evolución de este tipo de actividades en el mercado local, los directivos consideraron necesario brindar sus servicios a otras organizaciones con intereses comunes a fin de obtener mejores descuentos que los obtenidos individualmente.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente, la planificación de las rutas necesarias se realiza de manera empírica, y no existe un análisis que permita establecer el costo real de transportación, ya que se está pagando un precio fijo sin considerar factores tales como: la distancia recorrida, el mantenimiento del vehículo, pago de sueldos, entre otros. Además, se desconoce la cantidad, la capacidad necesaria de vehículos para abastecer a sus clientes y el recorrido idóneo que cada vehículo deba realizar para poder cumplir con lo planificado.

Esto no sólo afecta a los costos sino que también podría darse un incumplimiento por parte de la empresa en cuanto a las horas de llegada establecidas por los locales y a su vez provocaría una molestia para sus clientes.

Los problemas antes mencionados nos indican que existen grandes oportunidades de mejora.

Si las decisiones en la planificación de la distribución no son acertadas, se puede incurrir en errores como los mencionados anteriormente, que ocasionarían devoluciones y en el peor de los casos, si las acciones son reincidentes, involucraría la pérdida de los clientes.

En la tabla 1-1 se presentan los costos resumidos en los que actualmente la empresa incurre al momento de realizar la distribución de los productos.

	Cantidad de rutas utilizadas				Precio/ruta	Costo total
	ZONA 1	ZONA 2	ZONA 3	Total		
Productos Refrigerados	6	2	2	10	\$ 45	\$ 450
Productos Secos	8	4	3	15	\$ 38	\$ 570

Tabla 1-1. Resumen de costos actuales

La empresa busca mejorar su nivel de servicio respecto al cumplimiento de las ventanas horarias y reducir sus costos operativos, para ello ha encaminado acciones de estudio en sus actividades de distribución para una correcta planificación en cuanto a la forma en la que se realizará dicha operación, priorizando la optimización de los recursos.

Por tal motivo se plantea un estudio para determinar el conjunto de rutas factibles y el costo real de transportación por la utilización de los diferentes tipos de vehículos, garantizando la disponibilidad de los productos y el cumplimiento de las horas de llegada establecidas por los diferentes clientes que pertenecen a la red de locales.

1.3 Justificación del problema

Entre los factores más importantes por los cuales la administración ha decidido realizar un estudio exhaustivo de la planificación de distribución de los productos refrigerados y secos, se tiene:

- **Costo de distribución.-** Los costos de distribución entre la empresa y los puntos de consumo dependen además de la distancia, de la configuración geográfica de la ciudad y del tipo de vehículo para realizar la transportación de los diferentes productos, también del conjunto de rutas factibles, puesto que de ello dependerá la cantidad exacta de los diferentes medios de transporte necesarios para realizar la entrega y satisfacer la gran demanda de la empresa.
- **Recursos.-** Utilizar eficientemente recursos disponibles para la realización de esta operación, tales como: capacidad de los vehículos, personal y herramientas de apoyo y soporte para realizar las actividades en el manejo de los productos refrigerados y secos.
- **Eficiencia del servicio.-** La entera satisfacción de los clientes que conforman la red de locales depende de que los productos adquiridos sean los adecuados en cantidad, calidad y dentro del tiempo pactado,

permitiéndoles una adecuada planificación y asegurándoles la disponibilidad de los productos en todo momento.

1.4 Objetivo General

El objetivo del presente estudio es diseñar el conjunto de rutas que contribuyan a mejorar la distribución de productos refrigerados y secos para un operador logístico de la ciudad de Guayaquil.

1.5 Objetivos Específicos

- Determinar los medios de transportación idóneos en cuanto a capacidad, cantidad y uso, para llevar a cabo el proceso de distribución.
- Establecer el precio de transportación mediante el estudio de un plan tarifario de acuerdo al tipo de vehículo seleccionado para el proceso de distribución.
- Construir un conjunto de rutas factibles para la distribución de productos refrigerados y secos, mediante el análisis de resultados del modelo matemático VRPTW.

1.6 Distribución de productos refrigerados y secos

Para un operador logístico que maneja este tipo de productos, mantener la cadena de frío es sin duda la tarea más delicada y ocupa un lugar considerable dentro de los costos logísticos de la empresa.

El objetivo de todos los que participan en las operaciones de distribución debe ser que el producto se mantenga en las mejores condiciones posibles durante el transporte y éste se lleve a cabo con rapidez y eficiencia. Para conseguirlo, es necesario entre otras cosas que los productos se manipulen con las debidas precauciones en un vehículo adecuado.

Ante la gran exigencia de un mercado cada vez más competitivo se debe tratar en lo posible de asegurar la calidad de los productos durante la transportación, para ello es necesario tener en cuenta ciertas consideraciones que puedan afectar la naturaleza de los mismos, por ejemplo:

- **Daños físicos:** Estos pueden ser ocasionados por una mala manipulación del producto (en la carga y descarga), apilamiento incorrecto de la carga, vibración del vehículo y conducción a altas velocidades, esto para el caso de los productos secos, debido a que son los únicos productos que no son transportados en un recipiente estándar que impida que los productos sufran algún tipo de daño físico.

- **Daños en la composición:** Cuando se pierde la cadena de frío, contaminación cruzada, fechas de expiración, entre otras.

Para los productos refrigerados es importante considerar los niveles adecuados de temperatura en el vehículo para conservar las características de calidad del producto y que éste cumpla con las expectativas del cliente.

Finalmente, en la transportación de productos no sólo se tienen como parámetros los recursos existentes en la empresa sino todas aquellas variables exógenas que los vehículos refrigerados y secos deben cumplir para lograr el ordenamiento de la circulación como medida de seguridad.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

El presente capítulo plantea los conceptos y teorías básicas necesarias para resolver el problema planteado.

2.2 Investigación de Operaciones

Los inicios de la investigación de operaciones se le atribuyen a los servicios militares a principios de la segunda guerra mundial. Debido a que existía una necesidad urgente de asignar recursos escasos a las distintas operaciones militares y a las actividades dentro de cada operación en la forma más efectiva, las administraciones militares hicieron un llamado a un gran número de científicos para que aplicaran el método científico a éste y a otros problemas estratégicos y tácticos. [1]

Después de la guerra, muchos científicos que habían participado en los equipos de IO o que tenían información sobre este trabajo, se encontraban motivados a buscar resultados sustanciales; de esto resultaron avances importantes. Un ejemplo sobresaliente es el método símplex para resolver problemas de

programación lineal, desarrollado en 1947 por George Dantzig: Muchas de las herramientas características de la IO, como la programación lineal, programación dinámica, líneas de espera y teoría de inventarios, se habían desarrollado casi por completo antes del término de la década de 1950 [1].

Como su nombre lo dice, la investigación de operaciones significa “investigar sobre las operaciones”, quiere decir que es aplicable a problemas que se refieren a la conducción y coordinación de operaciones (o actividades) dentro de una organización. La naturaleza de la organización, es en esencia inmaterial y, de hecho, la IO se ha aplicado de manera extensa e áreas tan diversas como manufactura, transporte, construcción, telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, milicia y servicios públicos, por nombrar algunas. Así, la gama de aplicaciones es extraordinariamente amplia [1].

2.3 Programación Lineal

La programación lineal es una técnica que permite resolver problemas de optimización y utiliza un modelo matemático para describirlo. El término “programación” se refiere esencialmente a “planificación” y el adjetivo “lineal” determina la característica de que todas las funciones matemáticas en este modelo sean funciones lineales. En general, la programación lineal comprende la planificación de actividades para obtener un resultado óptimo, es decir, un resultado que alcance la meta especificada en la mejor forma (según el modelo) entre todas las alternativas o soluciones factibles [2].

La PL es una herramienta muy útil y aplicable a diversos campos, pero su aplicación tiene dos limitaciones que deben ser consideradas para la resolución de los problemas, una se relaciona con la cantidad de cálculos y la otra se refiere al costo de formular un problema de PL.

Así también un modelo de programación lineal proporciona una solución óptima tomada de un conjunto de soluciones factibles asignables a un determinado problema, dichos modelos están compuestos de un conjunto de variables de decisión o incógnitas del problema, una función objetivo que es la meta que se desea optimizar o alcanzar y un conjunto de restricciones que son los diferentes requisitos que debe cumplir cualquier solución para que pueda llevarse a cabo.

Es así que todos los problemas del mundo real que intenten resolverse y se adapten a la forma estándar de la PL serán considerados como problemas de programación lineal.

Forma estándar de un modelo de programación lineal:

Función Objetivo

$$\text{Max (Min) } z = c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n$$

Restricciones:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

$$a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3n}x_n \leq b_3$$

$$\vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

Donde c_j , a_{ij} y b_i son parámetros dados por un problema particular y x_j son las variables de decisión o incógnitas que serán determinadas a partir de la solución del modelo.

2.4 Problemas de Optimización Combinatoria

La Optimización Combinatoria es una rama de la Investigación de Operaciones que consiste en encontrar la solución óptima a un problema en que cada solución está asociada a un determinado valor (el valor de la solución) [3].

El término Combinatoria hace referencia a la rama de la matemática que estudia las colecciones finitas de objetos que satisfacen unos criterios especificados, y se ocupa, en particular, del "recuento" de los objetos de dichas colecciones, mientras que el término Optimización hace referencia a este segundo aspecto de la búsqueda del mejor valor [3].

La optimización combinatoria actúa en el campo de los problemas de optimización en los que el conjunto de soluciones factibles es discreto (o reducible a discreto). En algunos casos se tiende a suponer que la OC es la programación lineal entera con variables binarias. La búsqueda (o la definición de la existencia) de un óptimo para tipos específicos de problemas ha dado lugar a una cantidad considerable de algoritmos que son capaces de resolver casos específicos en tiempo polinomial. Los problemas de optimización combinatoria tratan de encontrar la mejor solución de entre un conjunto discretos de ítems y por tanto finito. En principio cualquier algoritmo constructivo o de búsqueda podría encontrar la solución óptima, pero no necesariamente la

garantizarla. En aquellos casos en que el problema parece resistirse a ser resuelto se suele abordar el problema de diferentes maneras:

- Algoritmos que funcionan bien generalmente para tamaños pequeños de problemas.
- En ocasiones hay problemas que su versión “aplicada” no presenta las características del peor escenario.
- Algoritmos de aproximación que son capaces de dar soluciones muy cerca del óptimo [3].

En la práctica la optimización combinatoria es una herramienta de vital transcendencia para la toma de decisiones en las organizaciones, en cualquier campo debido a la necesidad de la optimización de recursos escasos estos pueden ser: recurso humano, materia prima, tiempo y dinero.

Resolver este tipo de problemas del mundo real podría ser imposible sin la ayuda de diversos algoritmos para resolver los problemas de optimización, he aquí la importancia de la misma.

2.5 Complejidad Computacional

La Teoría de la Complejidad Computacional es el área de las ciencias computacionales que estudia la computabilidad de un problema y los recursos requeridos para resolverlo. En este contexto podemos definir la complejidad de cálculo como la cantidad de recursos necesarios para efectuar un cálculo. Los recursos comúnmente estudiados son el tiempo (número de pasos de ejecución de un algoritmo para resolver un problema) y el espacio (cantidad de memoria utilizada para resolver un problema) [4].

El estudio de los procesos computacionales, conduce a una clasificación de los problemas en dos grandes clases: los problemas con solución y los problemas sin solución. Los problemas solucionables, requieren gran cantidad de recursos como tiempo y espacio de almacenamiento. Los problemas que tienen una solución con orden de complejidad lineal son los problemas que se resuelven en un tiempo que se relaciona linealmente con su tamaño. No obstante, la mayoría de los algoritmos resueltos por las máquinas tienen como máximo una complejidad o costo computacional polinómico, es decir, la relación entre el tamaño del problema y su tiempo de ejecución es polinómica. Éstos son problemas agrupados en la clase P [4].

Los problemas con costo no polinomial están agrupados en la clase NP. Estos problemas no tienen una solución algorítmica, es decir, una máquina no puede resolverlos en un tiempo razonable [4].

Es necesario comprender la importancia de la complejidad computacional dado que muchos modelos que resuelven problemas del mundo real como: Travelling Salesman Problem (TSP), Bin Packing Problem (BPP), Vehicle Routing Problem (VRP) y todas sus variantes pertenecen la familia de los problemas NP.

2.6 Vehicle Routing Problem (VRP)

Dentro de la administración de la cadena de suministro, la transportación física de los productos ocupa un papel importante, y a su vez es uno de los problemas más difíciles y costosos de resolver para toda empresa, en especial cuando se tiene que atender a un conjunto de clientes. El Vehicle Routing Problem (VRP) intenta resolver este problema.

El VRP básico, introducido por Dantzig y Ramser en 1959, consiste en la determinación de un conjunto de rutas que parten de un depósito común, de tal manera que visite un conjunto de clientes satisfaciendo sus demandas a un costo mínimo. Este problema se puede modelar mediante un grafo en el que los vértices representan los clientes y el depósito; y los arcos representan las

interconexiones entre clientes o entre depósitos y los clientes. Es importante destacar que los arcos pueden ser unidireccionales o bidireccionales, dependiendo si los caminos de interconexión pueden ser recorridos en una o ambas direcciones respectivamente [5].

En la Figura 2-1 se muestra una ejemplificación de un VRP donde se aprecia la existencia de un único depósito denotado por d , el cual es el punto de partida y de llegada de las diferentes rutas. Nótese además, que las conexiones en el grafo están dadas por arcos dirigidos.

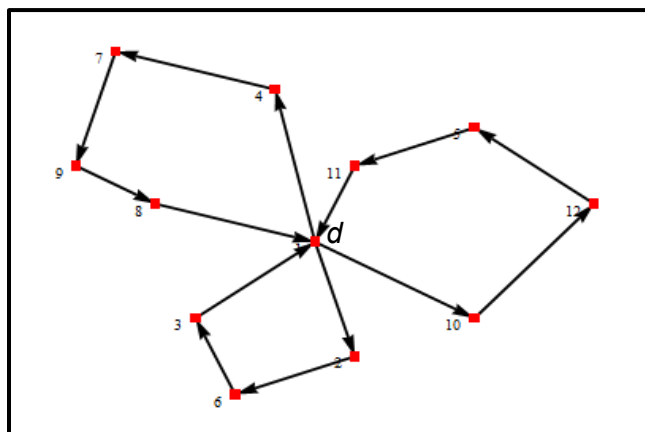


Figura 2-1. Representación gráfica de un VRP

2.6.1 Variantes del Vehicle Routing Problem

Existen muchas variantes del VRP entre las más conocidas tenemos:

CVRP – Capacitated Vehicle Routing Problem

Esta primera variante coincide con el VRP básico, la única diferencia es que en este modelo se considera una cantidad limitada K de vehículos, cada uno con una capacidad Q la cual no puede ser excedida por la suma total de las demandas asignadas a dicha ruta o vehículo.

MDVRP – Multiple Depot Vehicle Routing Problem

A diferencia de los problemas anteriores éste se caracteriza por tener más de un depósito y consiste en determinar la mínima cantidad de rutas necesarias para satisfacer la demanda de los clientes asignados a cada depósito y que a su vez cumplan con las restricciones del sistema.

VRPPD – Vehicle Routing Problem - Pickup and Delivery

Esta variante particular del VRP considera que los clientes puedan devolver algún tipo de artículo y no necesariamente son los productos que en algún momento demandaron sino envases o gavetas que fueron necesarios para su transportación inicial, esto implica que el problema se vuelva más complejo y se pueda pensar que sea necesario aumentar el

tamaño de la flota. Por tal motivo es recomendable que en las restricciones del sistema se considere realizar las entregas de los productos demandados por los clientes antes de recibir las devoluciones de los mismos.

Otras variantes del VRP

SDVRP	Split Delivery Vehicle Routing Problem.
SVRP	Stochastic Vehicle Routing Problem.
VRPTW	Vehicle Routing Problem-Time Windows.
VRPSD	Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands.
VRPSDC	Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands and Customers.
VRPST	Vehicle Routing Problem with Stochastic Travel Times.
VRPM	Vehicle Routing Problem with Multiple use of vehicles.

Tabla 2-1. Variantes del VRP

2.7 Vehicle Routing Problem-Time Windows (VRPTW)

Este problema consiste en determinar un conjunto de rutas óptimas que empiecen en un depósito central y terminen en el mismo, visitando a un conjunto de clientes una sola vez y satisfaciendo las ventanas horarias de los clientes asignados a dichas rutas sin violar las restricciones de capacidad de cada vehículo a un costo mínimo. Cabe recalcar que por la naturaleza del problema, esta variante del VRP será la que se aplique para resolver el problema planteado en el capítulo 1.

La principal característica de esta variante del VRP es el cumplimiento de la ventana horaria, es así que cada cliente previamente ha establecido un único intervalo de tiempo $[a, b]$ en el que podrá ser visitado, es decir, para considerar que una solución es factible bajo ningún concepto deberá ocurrir que el cliente sea visitado antes o después de su ventana horaria, cuando esto ocurre se denominan ventanas horarias duras. Pero llevado a la práctica, en muchas ocasiones podría resultar difícil de lograr. Por ello surgen también los tipos de ventanas horarias suaves.

Establecer un tipo de ventana horaria suave para las diferentes rutas, consiste en permitir el incumplimiento de las ventanas horarias impuestas por los clientes

siempre y cuando existan penalizaciones por las acciones mencionadas que afectarán directamente al costo total de la ruta.

2.8 Modelo matemático del VRPTW

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 representa las interconexiones posibles entre clientes; y entre clientes y depósitos. A cada par ordenado $(v_i, v_j) \in E$ se asocia un costo c_{ij} y un tiempo de viaje t_{ij} . Cada cliente $v_i \in V \setminus v_0$ 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 idénticos de capacidad máxima Q se encuentra disponible en el depósito. El número de vehículos es conocido de ante mano o considerado como una variable de decisión. Así mismo, sea r la máxima longitud que un vehículo puede recorrer [5].

Para este modelo matemático se define la siguiente variable de decisión Binaria:

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si el viaje es realizado desde el cliente } i \text{ hacia } j \text{ en el vehículo } k \\ 0, & \text{Sino} \end{cases}$$

Función Objetivo

Consiste en minimizar la suma de todos los costos de transportación asociados a las variables de decisión que forma parte de la solución:

$$\text{Min } Z = \sum_{k \in K} \sum_{(v_i, v_j) \in V} C_{ij} X_{ijk} \quad (2.1)$$

Restricciones del problema

1.- De cada nodo $v_i \in V \setminus v_0$ antes visitado por algún vehículo k , éste deberá tener como siguiente destino un único v_j partiendo desde v_i

$$\sum_{v_j \in V} \sum_{k \in K} X_{ijk} = 1 \quad \forall v_i \in V \quad (2.2)$$

2.- Cada vehículo deberá salir desde el depósito hacia cualquier cliente $v_j \in V \setminus v_0$.

$$\sum_{v_j \in V} X_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (2.3)$$

3.- Restricción del Flujo: Cada vehículo que ha visitado a un nodo $v_i \in V \setminus v_0$ deberá partir del mismo hacia cualquier otro nodo

$$\sum_{v_j \in V} X_{ijk} - \sum_{v_j \in V} X_{jik} = 0 \quad \forall v_i \in V, k \in K \quad (2.4)$$

4.- Cumplimiento de la ventana horaria: Siendo la variable de decisión positiva H_{v_i} definida como el tiempo de llegada al nodo v_i , deberá cumplirse que el tiempo de llegada sea mayor al límite inferior y menor al límite superior del intervalo de tiempo.

$$a_{v_i} \leq H_{v_i} \leq b_{v_i} \quad \forall v_i \in V \setminus v_0 \quad (2.5)$$

5.- Sea el tiempo de servicio s_{v_i} y el tiempo de desplazamiento t_{v_i, v_j}

$$X_{ijk}(H_{v_i} + s_{v_i} + t_{v_i, v_j} - H_{v_j}) \leq 0 \quad \forall (v_i, v_j) \in V \setminus v_0 \quad (2.6)$$

Esta restricción establece que el tiempo de llegada al nodo v_i más su tiempo de servicio y más el tiempo de traslado de v_i a v_j deberá ser igual al tiempo de llegada al nodo v_j . Esta restricción hace que el problema se vuelva más complejo puesto que la ecuación no es lineal, pero se puede solucionar con el Método del gran Número (M), con su aplicación tendríamos la siguiente ecuación:

$$b_{v_i} + s_{v_i} + t_{v_i, v_j} - b_{v_j} \leq M(1 - X_{ijk}) \quad \forall k \in K \forall (v_i, v_j) \in V \setminus v_0 \quad (2.7)$$

6.- La siguiente restricción tiene un significado parecido pero se define para los tiempos de llegada desde un depósito v_0 hacia cualquier nodo $v_j \in V$, de igual forma se deberá aplicar el método del gran Número (M) para linealizar la ecuación.

$$t_{v_0, v_j} - b_{v_j} \leq M(1 - X_{0jk}) \quad \forall k \in K \forall v_j \in V \quad (2.8)$$

7.- Sea $L_{v_i,k}$ una variable de decisión positiva que representa la carga con la que un vehículo k se encuentra al visitar al nodo v_i incluyendo la demanda del nodo v_j no debe exceder la capacidad del vehículo. Esta restricción tampoco es lineal por tanto se utiliza el método antes mencionado.

$$L_{v_i,k} + d_{v_j} - L_{v_i,k} \leq M (1 - X_{ijk}) \quad \forall k \in K \quad \forall (v_i, v_j) \in V \setminus v_0 \quad (2.9)$$

8.- De igual manera en esta restricción se define la carga a entregar desde el depósito v_0 hacia cualquier nodo $v_j \in V$ con la misma problemática de una ecuación no lineal revuelta por el Método del gran Número (M).

$$d_{v_j} - L_{v_j,k} \leq M (1 - X_{0jk}) \quad \forall k \in K \quad \forall v_j \in V \quad (2.10)$$

9.- Restricción del cumplimiento de capacidad de los vehículos.

$$L_{v_i,k} \leq Q_k \quad \forall k \in K \quad \forall v_i \in V \setminus v_0 \quad (2.11)$$

2.9 Parámetros del modelo

Para el modelo de transporte planteado en este capítulo, se establecen los siguientes parámetros que alimentan a dicho modelo y servirán como punto de partida para la implementación del mismo.

2.9.1 Costos Fijos y Costos variables

Existen tres formas para establecer el costo de transportación, mediante el cálculo de: Costos fijos, Costos variables o el Mixto que considera ambos costos para establecer el flete.

Costos Fijos: Son aquellos costos que permanecen constantes independientemente de la distancia recorrida por el vehículo, es decir, los costos fijos son costos inevitables porque deben ser cubiertos sin considerar las eventualidades de cada día.

Costos Variables: Se consideran costos variables aquellos que dependen de los kilómetros recorridos del vehículo y el tiempo de utilización del mismo durante un periodo.

Costo Mixto: Es la unión de los costos antes mencionados y a su vez es la posición más justa para ambas partes al momento de realizar la negociación y establecer un flete justo, puesto que los costos mixtos consideran aquellos gastos que varían en función del tiempo y los kilómetros recorridos y aquellos que estuvieron presentes incluso desde antes de la realización del servicio y continuarán presentes a lo largo del mismo.

2.9.2 Capacidad de Carga

La capacidad de carga de cada vehículo que deberá utilizar la empresa, se define en función del tipo de productos que han sido asignados al mismo, no solo porque es un indicador de la cantidad de mercancías que podría transportar sino porque le permite al modelo definir la cantidad de vehículos de igual o diferente capacidad que serán necesarios para cubrir la gran demanda. Cabe recalcar que para cualquier ruta que forme parte de la solución, si la cantidad de productos asignados a dicho vehículo sobrepasa la capacidad del mismo, dicha solución o ruta será considerada como no factible.

2.9.3 Demanda

Sin demanda no hay oferta, el modelo matemático planteado busca resolver una realidad compleja que para el presente se traduce en: Abastecer a todos sus clientes considerando ciertas circunstancias o parámetros importantes, pero; ¿Cómo hacerlo sin definir la demanda que deberá satisfacer cada uno de los vehículos?; sin ello, lo anterior sería imposible. Es por esto que definir la demanda de cada cliente es de vital importancia para la resolución del modelo. Al igual que en el punto anterior de determinación de capacidad de carga, el

incumplimiento de la demanda de algún cliente será un indicativo de que la solución obtenida no es factible.

2.9.4 Ventanas Horarias

Tal como se mencionó anteriormente, las ventanas horarias son un parámetro establecido por el cliente y es una de las características principales de esta variante del problema del ruteo vehicular.

Es importante acotar que en el presente trabajo se empleó un tipo de ventana horaria dura, pues los clientes no pueden ser visitados fuera del intervalo de tiempo establecido en el contrato.

2.9.5 Distancias

Para un problema complejo como lo es el diseño de rutas es recomendable sustituir la norma euclídea que es el método más conocido para el cálculo de las distancias entre pares de puntos, por la métrica de Manhattan.

La métrica de Manhattan proporciona una mejor estimación de las distancias para los problemas de transporte debido a que no considera que la distancia más corta entre dos puntos siempre es una línea recta, pues en la vida real eso significaría que los vehículos pueden circular por cualquier lugar sin considerar

que en dicha línea o dirección existen casas, locales o edificios que deberán ser atravesados para poder llegar al punto de destino.

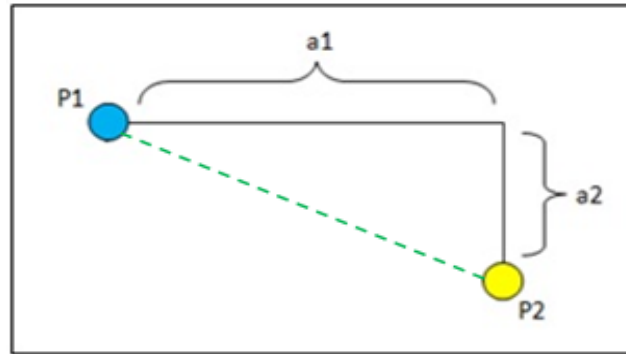


Figura 2-2. Gráfico de la distancia entre dos puntos

Para los puntos P1 y P2 que se muestran en la figura 2-2, cada uno con coordenadas (x_1, y_1) y (x_2, y_2) respectivamente, la distancia Manhattan entre este par de puntos sería la suma de a_1 y a_2 en valor absoluto, donde a_1 es la distancia horizontal $|x_2 - x_1|$ y a_2 es la distancia vertical $|y_2 - y_1|$, es decir las sumas de las distancias ambas en valor absoluto.

$$(P1, P2) = |y_2 - y_1| + |x_2 - x_1| \quad (2.12)$$

2.9.6 Tiempos de desplazamiento

Los tiempos de desplazamiento entre cada nodo de la red son calculados a partir de la matriz de distancias estableciendo una velocidad constante.

2.9.7 Tiempos de servicio

Para establecer que un vehículo pueda llegar dentro del intervalo de visita establecido por algún cliente “b”, es necesario conocer el tiempo de desplazamiento desde un cliente “a” (anteriormente visitado) hacia el cliente “b”, pero no es la única variable de la que depende el cumplimiento de una ventana horaria puesto que también es necesario considerar los tiempos de descarga o también denominado tiempo de servicio de los diferentes productos demandados por el cliente. En ocasiones estos tiempos podrían variar según la naturaleza y la cantidad de productos a manipular en cada parada.

2.10 Técnicas de Optimización

Bajo el concepto de intentar resolver los problemas de transporte antes mencionados y así un sinnúmero de problemas del mundo real, tenemos las técnicas exactas o exhaustivas y las técnicas aproximadas.

Las técnicas exactas garantizan encontrar la solución óptima para cualquier instancia de cualquier problema en un tiempo acotado. El inconveniente de estos métodos es que el tiempo necesario para llevarlos a cabo, aunque acotado, crece exponencialmente con el tamaño del problema, ya que la

mayoría de éstos son NP-Complejos. Esto provoca en muchos casos que el tiempo necesario para la resolución del problema sea inabordable (cientos de años). Estos métodos sacrifican la garantía de encontrar el óptimo a cambio de encontrar una buena solución en un tiempo razonable [6].

Es por esta razón que se vuelve casi indispensable el conocimiento y uso correcto de aquellas técnicas de optimización como son las Heurísticas y las Metaheurísticas, las cuales están dentro de la clasificación de las técnicas aproximadas.

Una Heurística es una técnica que busca soluciones buenas (es decir, casi óptimas) a un costo computacional razonable, aunque sin garantizar la factibilidad u optimalidad de las mismas. En algunos casos, ni siquiera se puede determinar qué tan cerca del óptimo se encuentra una solución factible en particular [7], por otro lado, “las metaheurísticas son métodos diseñados para resolver problemas de optimización combinatoria, en los que las heurísticas clásicas no son efectivas. Las metaheurísticas proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos” [8].

Una conclusión general sobre estas técnicas de optimización es tener en cuenta que el concepto heurístico fue creado para dar solución a problemas

específicos, mientras que las metaheurísticas fueron creadas para resolver un conjunto de problemas en diferentes campos.

Estas técnicas aproximadas pueden dividirse en métodos basados en trayectoria y métodos basados en población.

- Métodos Basados en Población

Los métodos basados en población operan en cada iteración del algoritmo con un conjunto de soluciones, denominada población. Así ellos, en forma natural, exploran el espacio de búsqueda desde varias regiones a la vez. El resultado final depende de la forma en que la población es manipulada. Los métodos basados en población más ampliamente estudiados son los Algoritmos Evolutivos, la optimización de Colonia de Hormigas, Optimización por Cúmulo de Partículas y Búsqueda Dispersa [10].

- Métodos Basados en Trayectoria

El término Método Basado en Trayectoria es usado porque el proceso de búsqueda llevado a cabo se caracteriza por determinar una trayectoria en el espacio de soluciones. Por lo tanto, una solución sucesora puede o no pertenecer al vecindario de la actual. Entre estos métodos se destacan: Búsqueda Adaptativa Aleatoriamente Voraz, Búsqueda en Vecindario Variable, Búsqueda Local Guiada, Búsqueda Local Iterada, Recocido Simulado y la Búsqueda Tabú [10] que por sus características de

búsqueda será la técnica de optimización utilizada para realizar el diseño de las rutas de distribución del presente trabajo.

2.11 Búsqueda Tabú

Introducido por Fred Glover (1986), El término tabú (taboo) procede de la Polinesia, donde es usado por los aborígenes de la isla Tonga para referirse a cosas que no pueden ser tocadas porque son sagradas, una acepción más moderna la define como “Una prohibición impuesta por costumbres sociales como una medida de protección”, también como “marcada como que constituye un riesgo”, esta acepción es la que está más cerca de la esencia del método donde el riesgo a ser evitado es el de seguir un camino no productivo, incluyendo el de ser conducido a una trampa de la que no se puede salir (óptimo local) [11].

El método consiste en mantener información almacenada sobre las últimas soluciones visitadas con el fin de usarla para guiar la búsqueda y evitar que el algoritmo se mueva a soluciones visitadas recientemente, por lo que se dice que la búsqueda tabú tiene memoria (Aarts y Lenstra, 2003). En cada iteración, el algoritmo explora el vecindario de la mejor solución encontrada. Se adopta como mejor solución la mejor solución en el vecindario, aun si ésta no es mejor que la solución actual. Para que el algoritmo no se quede atrapado en un ciclo, se

almacena la información relativa a las soluciones recientemente visitadas en una lista llamada lista tabú (Sait y Youssef, 1999). Para copiar información sobre el pasado reciente, la búsqueda tabú almacena los últimos movimientos, donde un movimiento es una operación por medio de la cual se alcanza una solución vecina a partir de la solución actual, un movimiento puede consistir en intercambiar la posición de dos elementos en el vector [8].

Conceptos de los métodos de búsqueda

- Dado un problema P de optimización combinatoria utilizaremos X para denotar el conjunto de soluciones posibles del problema y C para la función objetivo [11].
- Cada solución tiene un conjunto de posibles soluciones asociadas, que se denomina entorno o vecindario de x y se denota como $N(x)$ [11].
- Cada solución del entorno puede obtenerse directamente a partir de x mediante una operación llamada movimiento [11].
- La solución Inicial X_0 dependerá del algoritmo específico que la genera, se puede usar una heurística para proporcionar una buena solución inicial o se puede partir de una solución obtenida aleatoriamente, lo usual es utilizar el conocimiento que se tiene de dónde podría haber una buena solución, pero, si no se tiene ninguna información puede partirse de cualquier valor y mejorarlo en el proceso de solución [11].

- Un procedimiento de búsqueda local parte de una solución inicial X_0 , calcula su vecindario $N(X_0)$ y escoge una nueva solución X_1 en ese vecindario, de acuerdo a un criterio de selección pre establecido. Es decir, realiza un movimiento que aplicado a X_0 da como resultado X_1 , este proceso se realiza reiteradamente [11].
- Se pueden definir diferentes criterios para seleccionar una nueva solución del entorno. Uno de los criterios más simples consiste en tomar la solución con mejor evaluación de la función objetivo, siempre que la nueva solución sea mejor que la actual. Este criterio, conocido como greedy (voraz, goloso), permite ir mejorando la solución actual mientras se pueda [11].

Cabe recalcar que la estructura de las soluciones obtenidas con el método dependerá del problema que se va a resolver.

2.11.1 Lista Tabú

Es una lista en la cual se almacenan movimientos o atributos recientes por un lapso denominado tiempo de permanencia, dichos movimientos son atribuidos a la lista tabú siempre que éstos hayan sido considerados como la mejor solución de la vecindad. Así, el algoritmo previene los ciclos al prohibir que se ejecute un movimiento en la lista. Es decir, si un movimiento ha sido asignado a la lista tabú

en la iteración 10 y su tiempo de permanencia en la lista es de 5, saldrá de la misma en la iteración 15, pero esta prohibición puede anularse si se cumple una condición denominada “criterio de aspiración”, que consiste en admitir la salida de un movimiento de la lista tabú si la solución que genera este movimiento es la mejor de la historia.

Se pueden tener los siguientes criterios de aspiración

- Aspiración por Default: Si todos los movimientos posibles son clasificados como tabú, entonces se selecciona el movimiento “menos tabú”, es decir, si el movimiento m_1 está penalizado en la lista tabú durante 2 iteraciones más y m_2 está penalizado durante 1, m_2 es menos tabú que m_1 [11].
- Aspiración por Objetivo: Una aspiración de movimiento se satisface, permitiendo que un movimiento x sea un candidato para seleccionarse si, por ejemplo, $F(x) < \text{mejor costo}$ (en un problema de minimización) [11].
- Aspiración por Dirección de Búsqueda: Un atributo de aspiración para la solución “ s ” se satisface si la dirección en “ s ” proporciona un mejoramiento y el actual movimiento es un movimiento de mejora. Entonces “ s ” se considera un candidato [11].

2.11.2 Memoria de mediano y largo plazo

El mecanismo de memoria de mediano plazo consiste en favorecer la búsqueda en regiones donde se han encontrado buenas soluciones. Este proceso se conoce como de intensificación y se lleva a cabo dándoles alta prioridad a soluciones similares a la actual y penalizando las que se alejen de ella. Se dice que la intensificación es un mecanismo de memoria de mediano plazo porque normalmente el proceso se da por terminado si durante un número fijo de iteraciones no se logra mejorar la función objetivo. Una vez terminado el proceso de intensificación puede resultar conveniente explorar regiones nuevas en el espacio de búsqueda. El mecanismo de memoria de largo plazo cumple con este objetivo de diversificación por favorecer soluciones con características diferentes a la solución actual [8]. Una forma clásica de diversificación consiste en reiniciar periódicamente la búsqueda desde puntos elegidos aleatoriamente, si se tiene alguna información acerca de la región factible se puede hacer un “muestreo” para cubrir la región en lo posible, sino, cada vez se escoge aleatoriamente un punto de partida (método multi arranque) [11].

Ambos procesos, la intensificación y la diversificación, se incorporan en la función objetivo con pesos o ponderaciones que se modifican durante el desarrollo del algoritmo [8].

2.11.3 Algoritmo de la Búsqueda Tabú

```

Sea  $x^* \in \Omega$  la mejor solución encontrada
Sea  $N_A$  el nivel de aspiración

Hacer  $x^* \leftarrow x_0$ 
Mientras no se cumpla el criterio de parada:
    Seleccionar al azar el conjunto  $V \subseteq N(x^*)$  de vecinos de  $x^*$ 
    Sea  $x' \in V$  la mejor solución en  $V$ 
    Si el movimiento que generó  $x'$  no está en la lista Tabú
        Aceptar el movimiento haciendo  $x^* \leftarrow x'$ 
        Actualizar la lista Tabú incorporando a la lista el movimiento que generó  $x'$ 
        Actualizar  $N_A$ 
    Sino
        Si se cumple el criterio de aspiración
            Aceptar el movimiento haciendo  $x^* \leftarrow x'$ 
            Actualizar la lista Tabú incorporando a la lista el movimiento que generó  $x'$ 
        Fin
    Fin
Fin

```

Figura 2-3. Idea básica del algoritmo de la búsqueda tabú [8].

CAPÍTULO 3

3 DESARROLLO DEL PROBLEMA

3.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo la obtención de los datos necesarios para la resolución del problema planteado, para ello es necesario realizar la selección de vehículos que se ajusten a las necesidades de la empresa y permitan asegurar la calidad de los productos alimenticios refrigerados y secos, debido a que ciertos parámetros del modelo dependen de ellos.

Para la simplificación del problema fue necesario realizar un artificio que básicamente hace referencia a la agrupación de un conjunto de clientes que tengan características en común, tales como frecuencia de entrega y la ubicación, pues una gran cantidad de ellos se encuentran ubicados en centros comerciales de la ciudad de Guayaquil, es decir, poseen las mismas coordenadas geográficas.

Dicha agrupación de clientes dará lugar a la creación de un nuevo nodo, para el cual se deberá considerar la demanda y los tiempos de servicio de todo el conjunto de clientes que conforman dicho nodo.

Debido a que la empresa distribuye dos tipos de productos, se estableció un código para cada cliente que hace referencia al tipo de producto que demandan, siendo para los clientes de productos refrigerados un único código que deberá empezar con la letra “R” y para aquellos que demanden productos secos su código deberá empezar con la letra “S”.

3.2 Herramientas Informáticas

Las herramientas informáticas utilizadas para la resolución del presente trabajo son Microsoft Excel, Google Earth y el sistema algebraico computacional Wolfram Mathematica versión 8.0.

El primero de la lista es un software que le permite al usuario realizar el análisis de datos empleando cálculos matemáticos, registros, cuadros estadísticos, etc. Por su eficiencia y fácil manejo, fue utilizado para realizar cálculos referentes a los costos de transportación, selección de vehículo y presentación de la información mediante la utilización de tablas.

Google Earth es una aplicación gratuita que permite la visualización a escala de cualquier parte del planeta concediendo información relevante; su utilización permitió determinar la ubicación geográfica de cada uno de los nodos de la red y la visualización de los mismos.

Finalmente, Wolfram Mathematica es una infraestructura digital en la cual otro software puede ser fácilmente desarrollado. Es utilizado en diversas áreas de la ciencia debido a que brinda soluciones a problemas complejos; es decir, problemas con muchas variables, datos de entrada entre otras. Sin embargo, las soluciones obtenidas para este tipo de problemas sólo se aproximan a la solución que sería la óptima. Este software fue empleado para la construcción de la heurística de segmentación de clientes y una metaheurística basada en el procedimiento de Búsqueda Tabú, dicho algoritmo fue elegido por su alta eficiencia en la resolución de problemas complejos.

3.3 Selección del Vehículo

3.3.1 Especificaciones generales para vehículos refrigerados

Antes de la carga, los vehículos deben pre-enfriarse de forma que las paredes, techo y suelo del furgón alcancen una temperatura que sea lo más baja y próxima posible de la temperatura del producto que se va cargar [9].

Para el caso del OPL las temperaturas utilizadas para la conservación de los productos a transportar oscilan entre 0° c y 6° c.

Los vehículos deben tener instalados instrumentos de medición de temperatura en el lugar de mayor calor del furgón y la lectura debe ser visible desde el asiento del transportista [9].

Es necesario que la temperatura de conservación de los diversos productos alimenticios a transportar sea compatible entre sí.

Además, ninguno de estos productos puede ser causa de alteración o modificación de los otros, especialmente por olores, polvo, contaminaciones y partículas orgánicas o minerales [9].

El furgón de los vehículos no deberá contener elementos o instalaciones ajenas al producto que se transporta.

Las partes interiores, incluyendo techo y suelo, deben estar fabricadas a base de materiales resistentes a la corrosión, impermeables, imputrescibles y fáciles de limpiar, lavar y desinfectar [9].

3.3.2 Elección de la marca y capacidades del vehículo

La solución propuesta para el problema planteado depende ante todo de la elección de la marca y las capacidades adecuadas para realizar la distribución de los diferentes productos considerando las restricciones viales para el

transporte de carga en la ciudad de Guayaquil, debido a que existen clientes ubicados en zonas que por sus características geográficas hace imposible el tránsito con vehículos de capacidad superior a 3,5 Ton.

Debido a la creciente evolución de este tipo de negocios y en base a estudios recientemente realizados por la empresa, se estableció que además de ser necesario utilizar vehículos de 3,5 Ton, es indispensable considerar para la solución del problema el uso de vehículos de 5 Ton ya que es el medio de transportación utilizado actualmente y vehículos de 10 Ton que permitan responder de manera oportuna la demanda futura de la empresa.

Una vez establecidos las capacidades de vehículos necesarias para realizar la transportación, el siguiente paso es determinar la marca del vehículo.

- **Opciones a seleccionar**

En el país existen tres marcas que poseen los tipos de vehículos para el transporte de carga definidos anteriormente, estas son: Chevrolet, Hyundai e Hino. Entre las principales razones por las cuales se eligieron estas marcas es su posicionamiento y gran trayectoria en venta de vehículos en el mercado tanto nacional como internacional. Estas opciones fueron evaluadas considerando tres aspectos decisivos al

momento de realizar la compra de vehículos para el transporte de carga. En la tabla 3-1, se detallan las características que describen cada uno de los aspectos antes mencionados.

Aspectos	Características a evaluar
Técnico	Motor
	Potencia
	Torque
	Nivel de emisiones
	Facilidad de mantenimiento
	Bajo consumo de combustible
	Sistema de frenos
	Suspensión
	Confort
	Impacto ambiental
	Diámetro de giro
Servicio Post-venta	Posicionamiento de la marca
	Garantías
	Disponibilidad de repuestos
	Costo de repuestos
	Seguridad del vehículo
	Servicio Técnico
	Tiempos de respuesta
Económico	Precio del vehículo

Tabla 3-1. Aspectos de evaluación

- **Forma de evaluación de las opciones**

La evaluación de las opciones antes descritas se realizó mediante un estudio de mercado exploratorio.

Este tipo de investigación de mercados se utiliza para las etapas tempranas de los procesos de toma de decisiones, donde se busca obtener información de primera mano, para realizar un análisis preliminar de la situación con un gasto mínimo de esfuerzo y dinero [10].

Dicha investigación se efectuó a partir de entrevistas al personal especializado de cinco empresas dedicadas a la transportación de carga que cuentan con vehículos de características similares en las marcas a analizar, además de una amplia experiencia en el uso de este tipo de vehículos.

Para ello se utilizó una escala del uno al cinco, la primera califica a las características de cada aspecto como pésimo y la segunda como excelente.

En la tabla 3-2, se muestra la escala de evaluación de las distintas opciones.

1	2	3	4	5
Pésimo	Malo	Regular	Bueno	Excelente

Tabla 3-2. Escala de evaluación

- **Matriz de ponderación**

Para el análisis se utilizó un modelo aplicable para la toma de decisiones denominado “Matriz de ponderación” que es una herramienta muy útil

debido a que no requiere de mayores esfuerzos en cuanto al levantamiento de la información o al momento realizar los cálculos matemáticos. La evaluación y selección de la mejor opción en cuanto a la marca de vehículo fue realizada empleando los siguientes pasos:

- 1) Identificación del problema.
- 2) Obtención de la información.
- 3) Definición de opciones.
- 4) Asignación de pesos o ponderaciones.
- 5) Selección de la mejor opción.

Dicho esto, la primera evaluación fue realizada para seleccionar la marca de los vehículos de 3,5 Ton entre Chevrolet y Hyundai a quienes se ha denominado como opción 1 y opción 2 respectivamente, debido a que son las únicas que poseen vehículos de esas capacidades.

En la tabla 3-3 se presenta la matriz de ponderación con los resultados de la evaluación. Cabe recalcar que los resultados obtenidos para cada una de las características fueron calculados como el promedio de la calificación asignada por cada uno de los cinco evaluadores respecto de alguna característica en particular.

			Opciones	
Aspectos	Características a evaluar	Pesos	1	2
Técnico 50%	Motor			
	Potencia	10%	1,4	2,4
	Torque	10%	1,6	2,4
	Nivel de emisiones	5%	1,6	1,8
	Facilidad de mantenimiento	15%	2,8	2
	Bajo consumo de combustible	15%	1,4	1,8
	Sistema de frenos	10%	1,2	2
	Suspensión	15%	2,4	3
	Confort	10%	1,4	3,4
	Impacto ambiental	5%	2,4	2,8
	Diámetro de giro	5%	2,4	3
	Subtotal		1,87	2,42
Servicio Post-venta 35%	Posicionamiento de la marca	15%	3,4	2,6
	Garantías	15%	3,4	3,2
	Disponibilidad de repuestos	25%	3,4	2,8
	Costo de repuestos	15%	4,4	2,6
	Seguridad del vehículo	10%	1,2	2,6
	Servicio Técnico	10%	3,8	4,6
	Tiempos de respuesta	10%	2,6	2,6
	Subtotal		3,29	2,94
Económico 15%	Precio del vehículo	100%	4,4	4
	Subtotal		4,4	4
Totales			2,7465	2,839

Tabla 3-3. Evaluación de las opciones 1 y 2

Así mismo, se realizó una segunda evaluación entre las marcas Chevrolet, Hyundai e Hino siendo ésta última considerada como la opción 3. En este caso se tomó como referencia únicamente al vehículo de 5 Ton debido a que las tres marcas poseen vehículos con capacidades de

5 y 10 Ton. En la tabla 3-4, se muestran los resultados obtenidos de la segunda evaluación.

Aspectos	Características a evaluar	Pesos	Opciones		
			1	2	3
Técnico 50%	Motor				
	Potencia	10%	2,4	2,6	3
	Torque	10%	2	2,6	3,8
	Nivel de emisiones	5%	1,8	1,8	1,8
	Facilidad de mantenimiento	15%	3	2	1
	Bajo consumo de combustible	15%	1,2	2,2	2,8
	Sistema de frenos	10%	1	2	4,4
	Suspensión	15%	2,2	3,6	4,8
	Confort	10%	1,6	3,4	4,4
	Impacto ambiental	5%	2,4	2,8	2,6
	Diámetro de giro	5%	2,6	3,6	4,4
	Subtotal		2	2,64	3,29
Servicio Post-venta 35%	Posicionamiento de la marca	15%	3,8	3	3
	Garantías	15%	3,4	4	4,4
	Disponibilidad de repuestos	25%	3,6	2,8	1,8
	Costo de repuestos	15%	4,4	2,6	1
	Seguridad del vehículo	10%	1,2	2,6	2,4
	Servicio Técnico	10%	4,2	4,6	4,6
	Tiempos de respuesta	10%	2,6	3	4,8
	Subtotal		3,44	3,16	2,89
Económico 15%	Precio del vehículo	100%	4,6	4	3,2
	Subtotal		4,6	4	3,2
Totales			2,894	3,026	3,1365

Tabla 3-4. Evaluación de las opciones 1, 2 y 3

3.4 Parámetros del Modelo

Para el modelo de transporte planteado en el capítulo 2, se establecen los siguientes parámetros que nutren a dicho modelo y servirán como punto de partida para la resolución del mismo.

3.4.1 Cálculo de Costos Fijos y Costos Variables

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, existen tres formas para establecer el precio de transportación, para la resolución del problema planteado se consideró necesario utilizar el costo mixto, el cual se obtiene a partir de los diferentes costos fijos y variables asociados al tipo de vehículo utilizado. Según el punto anterior, se determinó que los vehículos idóneos para realizar la transportación serían marca HINO.

Costos Fijos: Los aspectos necesarios para el cálculo de los costos fijos son: Costo de vehículo, Matricula, Seguros, Baterías, Sueldo Chofer y Ayudante, Lavado del vehículo y Mantenimiento anual.

Para calcular el costo total del vehículo, fue necesario realizar las cotizaciones de los vehículos antes mencionados en la respectiva concesionaria y de los furgones que satisfagan las condiciones

requeridas por la naturaleza de los productos a tratar, tomando en cuenta la depreciación anual del vehículo (Chasis y Furgón), sabiendo que la vida útil de todo vehículo es de cinco años.

El porcentaje para el pago de matrícula es del 2.5% anual según la Comisión de Transito del Ecuador (CTE), así mismo, la prima establecida por la compañía aseguradora que brinda el servicio es del 4.5% anual por cada vehículo, cabe recalcar que para obtener el cálculo de ambos costos se toma como referencia el valor comercial del vehículo sin incluir el costo del furgón.

El costo de baterías al año fue determinado según referencias del personal especializado de la misma concesionaria el cual varía para cada tipo de vehículo, indicando a su vez que la cantidad promedio de baterías utilizadas al año es 2.

Para el costo sueldos de Chofer incluyendo al Ayudante se tomó como referencia el valor actual que la empresa está en capacidad de pagar a sus empleados.

Según datos históricos de la empresa, se determinó que para la correcta conservación de los alimentos a transportar en lo furgones, es necesario lavar el furgón con diversos químicos y desinfectantes esto se debe realizar una vez a la semana a un costo de \$10.

El costo del mantenimiento anual se calculó en base a todos los costos de mantenimiento preventivo y correctivo en los cuales se incurre para lograr una correcta conservación del vehículo.

A continuación se presentan las tablas con los costos fijos por viaje de los vehículos estimando que cada vehículo realiza dos viajes al día.

En la tabla 3-5, se detallan los costos fijos asociados a la utilización de los vehículos de 10Ton, 5Ton, 3,5Ton para el transporte de carga refrigerada. Así mismo, en la tabla 3-6 se detallan los costos fijos asociados a las capacidades de vehículos antes mencionadas para el transporte de carga seca.

Costos Fijos		HINO 10 Ton	HINO 5 Ton	HYUNDAI 3,5 Ton
Chasis	Compra	\$ 62.807,04	\$ 32.032,00	\$ 27.990,00
Furgón	Compra	\$ 19.712,00	\$ 9.856,00	\$ 7.885,00
(a) Chasis + Furgón	[V.U. 5 años]	\$ 16.104,00	\$ 8.378,00	\$ 7.175,00
(b) Matrícula	2,50% al año	\$ 1.520,00	\$ 801,00	\$ 701,00
(c) Seguro	4,50% al año	\$ 2.736,00	\$ 1.441,00	\$ 1.260,00
Baterías	Compra	\$ 183,00	\$ 150,00	\$ 150,00
(d) Batería	[V.U. 1 año]	\$ 410,00	\$ 336,00	\$ 336,00
Sueldo Chofer y Ayudante	Mensual	\$ 757,00	\$ 757,00	\$ 757,00
(e) Sueldo	Al año	\$ 9.084,00	\$ 9.084,00	\$ 9.084,00
(f) Lavado	52 lavadas al año	\$ 520,00	\$ 520,00	\$ 520,00
(g) Mantenimiento anual	6% chasis + furgón	\$ 4.843,00	\$ 2.519,46	\$ 2.158,00
Costo anual (a+b+c+d+e+f+g)		\$ 35.217,24	\$ 23.079,30	\$ 21.232,04
Costo fijo por día		\$ 96,76	\$ 63,40	\$ 58,32
Costo fijo por viaje		\$ 48,38	\$ 31,70	\$ 29,16

Tabla 3-5. Tabla de costos fijos de vehículos de carga refrigerada

Costos Fijos		HINO 10 Ton	HINO 5 Ton	HYUNDAI 3,5 Ton
Chasis	Compra	\$ 62.807,04	\$ 32.032,00	\$ 27.990,00
Furgón	Compra	\$ 8.624,00	\$ 4.592,00	\$ 3.214,00
(a) Chasis + Furgón	[V.U. 5 años]	\$ 13.886,00	\$ 7.325,00	\$ 6.241,00
(b) Matrícula	2,50% al año	\$ 1.520,00	\$ 801,00	\$ 700,00
(c) Seguro	4,50% al año	\$ 2.736,00	\$ 1.441,00	\$ 1.260,00
Baterías	Compra	\$ 183,00	\$ 150,00	\$ 150,00
(d) Batería	[V.U. 1 año]	\$ 410,00	\$ 336,00	\$ 336,00
Sueldo Chofer y Ayudante	Mensual	\$ 757,00	\$ 757,00	\$ 757,00
(e) Sueldo	Al año	\$ 9.084,00	\$ 9.084,00	\$ 9.084,00
(f) Lavado	52 lavadas al año	\$ 520,00	\$ 520,00	\$ 520,00
(g) Mantenimiento anual	6% chasis + furgón	\$ 4.176,00	\$ 2.203,00	\$ 1.877,00
Costo anual (a+b+c+d+e+f+g)		\$ 32.332,72	\$ 21.709,88	\$ 20.017,05
Costo fijo por día		\$ 88,82	\$ 59,64	\$ 55,00
Costo fijo por viaje		\$ 44,41	\$ 29,82	\$ 27,50

Tabla 3-6. Tabla de costos fijos de vehículos de carga seca

Costos Variables: Los costos variables considerados para este estudio son: consumo de combustible, neumáticos, lubricantes y filtros.

- a) **Consumo de combustible:** Para determinar el consumo de combustible es necesario tener en cuenta el precio por galón del combustible adecuado para un vehículo en particular y el rendimiento en kilómetros por galón.

$$Precio = \left(\frac{\$}{galón} \right) \quad (3.1)$$

$$Rendimiento = \left(\frac{km}{galón} \right) \quad (3.2)$$

Para determinar el costo por kilómetro recorrido se utilizó:

$$\text{Costo combustible} \left(\frac{\$}{km} \right) = \frac{\text{Precio}}{\text{Rendimiento}} \quad (3.3)$$

- b) **Consumo de neumáticos:** El consumo de neumáticos obedece básicamente al rendimiento, la cantidad de neumáticos necesarios según el tipo de vehículo, los accesorios tales como tubos y defensas y el precio, dicho rendimiento generalmente depende del uso que se le va dar, es decir, los kilómetros que recorra, el estado de la vía por la cual deba transitar normalmente el vehículo, la ubicación adecuada del neumático según su labrado (Parte delantera: Llantas lisas, Parte trasera: Llantas de tracción), la alineación, el balanceo oportuno.

Se obtuvo el precio total de los neumáticos a través de:

$$\text{Precio} = \text{precio unitario} * \text{cantidad} \quad (3.4)$$

Para determinar el costo por concepto de neumáticos se utilizó:

$$\text{Costo neumáticos} \left(\frac{\$}{km} \right) = \frac{\text{Precio} (\$)}{\text{Rendimiento} (km)} \quad (3.5)$$

- c) **Consumo de lubricantes y filtros:** Para el caso del consumo de lubricantes, estos se determinan de manera similar al consumo de combustible mediante las siguientes fórmulas:

$$Precio = \left(\frac{\$}{galón} \right) \quad (3.6)$$

$$Consumo = \left(\frac{galón}{km} \right) \quad (3.7)$$

$$Costo\ lubricantes \left(\frac{\$}{km} \right) = Precio * Consumo \quad (3.8)$$

En cuanto al consumo de filtros se tomaron en cuenta los 4 componentes de filtración en un vehículo estos son: Filtro de aire, aceite, combustible y de agua, cada uno de los cuales deben ser sustituidos aproximadamente cada cierto tiempo según se indica en la tabla 3-7.

Componente	Tiempo
Filtro de aire	Cada 15.000 o 20.000 km
Filtro de aceite	Cada 10.000 km
Filtro de combustible	Cada 20.000 km
Filtro de agua	Cada año

Tabla 3-7. Tabla aproximación del tiempo de cambio de filtros

En la tabla 3-8, 3-9 y 3-10 se detallan los precios de los filtros, llantas y aceites, cabe recalcar que dichos precios son los que rigen durante la realización del presente trabajo.

	HINO	HINO	HYUNDAI
	10 Ton	5 Ton	3,5 Ton
Filtro de Agua	\$ 35,76	\$ 19,34	\$ 19,34
Filtro de Aceite	\$ 11,25	\$ 7,50	\$ 7,50
Filtro de Combustible	\$ 18,50	\$ 11,40	\$ 11,40
Filtro de Aire	\$ 15,65	\$ 14,00	\$ 14,00

Tabla 3-8. Precios de Filtros

	Hino	Hino	Hyundai
	10 Ton	5 Ton	3,5 Ton
Precio unitario	\$ 574,00	\$ 323,33	\$ 249,17
Cantidad de neumáticos	6	6	6
Precio total	\$ 3.444,00	\$ 1.940,00	\$ 1.495,00

Tabla 3-9. Precios de llantas

	Precio/Galón
Aceite Caja	\$ 21,78
Aceite Transmisión	\$ 21,07
Aceite Motor	\$ 21,00
Aceite Dirección	\$ 5,50
Combustible (Diesel)	\$ 1,04

Tabla 3-10. Precios de galones de aceite y combustible

En la tabla 3-11 y 3-12 se detallan los costos variables por la utilización de los diferentes tipos de vehículos.

	HINO	HINO	HYUNDAI
Costos	10 Ton	5 Ton	3,5 Ton
Consumo de combustible	\$ 0,0650 / Km	\$ 0,0650 / Km	\$ 0,0650 / Km
Consumo de llanta	\$ 0,0431 / Km	\$ 0,0243 / Km	\$ 0,0187 / Km
Consumo de lubricante	\$ 0,0445 / Km	\$ 0,0445 / Km	\$ 0,0445 / Km
Consumo de filtros	\$ 0,0091 / Km	\$ 0,0060 / Km	\$ 0,0060 / Km
Costos variables (\$ / km)	\$ 0,1616 / Km	\$ 0,1397 / Km	\$ 0,1341 / Km

Tabla 3-11. Costos variables de vehículos de carga refrigerada

	HINO	HINO	HYUNDAI
Costos	10 Ton	5 Ton	3,5 Ton
Consumo de combustible	\$ 0,0520 / Km	\$ 0,0520 / Km	\$ 0,0520 / Km
Consumo de llanta	\$ 0,0431 / Km	\$ 0,0243 / Km	\$ 0,0187 / Km
Consumo de lubricante	\$ 0,0445 / Km	\$ 0,0445 / Km	\$ 0,0445 / Km
Consumo de filtros	\$ 0,0091 / Km	\$ 0,0060 / Km	\$ 0,0060 / Km
Costos variables (\$ / km)	\$ 0,1486 / Km	\$ 0,1267 / Km	\$ 0,1211 / Km

Tabla 3-12. Costos variables de vehículos de carga seca

3.4.2 Capacidad de Carga

Es importante mencionar que debido a la naturaleza de los productos y como política de la empresa, los productos refrigerados deben ser transportados en jabas o gavetas, es por ello que la capacidad de los vehículos de carga refrigerada está dada en función de la cantidad de gavetas que pueden transportar, sin embargo no sucede lo mismo para los productos secos puesto

que la gran mayoría no pueden ser transportados en recipientes estandarizados, es por esta razón que la capacidad de estos vehículos está dada en porcentajes respecto al volumen de lo que se podría transportar en el vehículo de 5 toneladas C(5 Ton), el cual ha sido tomado como referencia debido a que es el tipo de vehículo utilizado actualmente para la transportación de carga seca. En la tabla 3-10 se muestran las capacidades de los vehículos en función del tipo de producto a transportar.

Capacidad de vehículos [Toneladas]	Capacidad en vehículos de carga refrigerada [Jabas]	Capacidad en vehículos de carga seca [% C(5Ton)]
3,5	128	80
5	160	100
10	320	200

Tabla 3-13. Capacidades de vehículos

3.4.3 Demanda

En la tabla 3-11 y 3-12 se muestra la demanda de los clientes en función de las mismas unidades de medida que se estableció para la transportación de los diferentes productos, dichas demandas fueron tomadas en una semana pico de la empresa.

PRODUCTOS REFRIGERADOS					
Nº	Código Cliente	Demanda [Jabas]	Nº	Código Cliente	Demanda [Jabas]
1	R0001	85	22	R0022	16
2	R0002	35	23	R0023	27
3	R0003	38	24	R0024	29
4	R0004	28	25	R0025	10
5	R0005	18	26	R0026	20
6	R0006	15	27	R0027	38
7	R0007	16	28	R0028	5
8	R0008	25	29	R0029	5
9	R0009	24	30	R0030	15
10	R0010	21	31	R0031	17
11	R0011	79	32	R0032	17
12	R0012	14	33	R0033	5
13	R0013	30	34	R0034	8
14	R0014	46	35	R0035	20
15	R0015	60	36	R0036	7
16	R0016	28	37	R0037	6
17	R0017	29	38	R0038	14
18	R0018	30	39	R0039	104
19	R0019	25	40	R0040	53
20	R0020	23	41	R0041	101
21	R0021	39			

Tabla 3-14. Demandas de productos refrigerados

PRODUCTOS SECOS					
Nº	Código Cliente	Demanda [% del vehículo de 5 Ton como referencia]	Nº	Código Cliente	Demanda [% del vehículo de 5 Ton como referencia]
1	S0001	1	19	S0019	0,5
2	S0002	0,25	20	S0020	0,2
3	S0003	0,2	21	S0021	0,25
4	S0004	0,25	22	S0022	0,5
5	S0005	0,25	23	S0023	0,45
6	S0006	0,1	24	S0024	0,25
7	S0007	0,25	25	S0025	0,2
8	S0008	0,3	26	S0026	0,15
9	S0009	0,2	27	S0027	0,25
10	S0010	0,2	28	S0028	0,9
11	S0011	0,3	29	S0029	0,15
12	S0012	0,81	30	S0030	0,6
13	S0013	0,3	31	S0031	0,1
14	S0014	0,2	32	S0032	0,15
15	S0015	0,25	33	S0033	0,15
16	S0016	0,15	34	S0034	0,1
17	S0017	0,25	35	S0035	0,91
18	S0018	0,1			

Tabla 3-15. Demandas de productos secos

3.4.4 Ventanas Horarias

En el presente trabajo se utilizó el tipo de ventana horaria dura debido a que los clientes no pueden ser visitados fuera del intervalo de tiempo establecido en el contrato, ya que muchos de ellos se encuentran ubicados en centros

comerciales o lugares muy concurridos. En la tabla 3-13 y 3-14 se muestran las ventanas horarias para productos refrigerados y secos respectivamente.

PRODUCTOS REFRIGERADOS							
Nº	Código Cliente	Hora Inicio	Hora Fin	Nº	Código Cliente	Hora Inicio	Hora Fin
1	R0001	7:00	10:00	22	R0022	12:00	18:00
2	R0002	11:00	14:00	23	R0023	7:00	10:00
3	R0003	6:00	9:00	24	R0024	7:00	10:00
4	R0004	6:00	9:00	25	R0025	14:00	18:00
5	R0005	6:00	9:00	26	R0026	14:00	18:00
6	R0006	6:00	9:00	27	R0027	15:00	18:00
7	R0007	6:00	9:00	28	R0028	15:00	18:00
8	R0008	10:00	12:00	29	R0029	15:00	18:00
9	R0009	10:00	13:00	30	R0030	15:00	18:00
10	R0010	10:00	12:00	31	R0031	15:00	18:00
11	R0011	8:00	10:00	32	R0032	15:00	18:00
12	R0012	7:00	9:00	33	R0033	15:00	18:00
13	R0013	7:00	10:00	34	R0034	10:00	13:00
14	R0014	7:00	10:00	35	R0035	10:00	13:00
15	R0015	8:00	10:00	36	R0036	7:00	13:00
16	R0016	10:00	13:00	37	R0037	7:00	13:00
17	R0017	10:00	13:00	38	R0038	7:00	13:00
18	R0018	11:00	14:00	39	R0039	10:00	13:00
19	R0019	11:00	14:00	40	R0040	7:00	10:00
20	R0020	11:00	14:00	41	R0041	7:00	11:00
21	R0021	10:00	15:00				

Tabla 3-16. Ventanas de tiempo para la recepción de productos refrigerados

PRODUCTOS SECOS							
Nº	Código Cliente	Hora Inicio	Hora Fin	Nº	Código Cliente	Hora Inicio	Hora Fin
1	S0001	6:00	9:00	19	S0019	13:00	15:00
2	S0002	8:00	10:00	20	S0020	14:00	18:00
3	S0003	8:00	11:00	21	S0021	14:00	18:00
4	S0004	14:00	16:00	22	S0022	13:00	18:00
5	S0005	9:00	13:00	23	S0023	13:00	18:00
6	S0006	9:00	13:00	24	S0024	13:00	17:00
7	S0007	9:00	13:00	25	S0025	14:00	17:00
8	S0008	14:00	18:00	26	S0026	14:00	17:00
9	S0009	14:00	18:00	27	S0027	14:00	17:00
10	S0010	14:00	18:00	28	S0028	14:00	17:00
11	S0011	14:00	18:00	29	S0029	14:00	17:00
12	S0012	6:00	10:00	30	S0030	14:00	18:00
13	S0013	6:00	8:00	31	S0031	8:00	10:00
14	S0014	6:00	8:00	32	S0032	8:00	12:00
15	S0015	6:00	8:00	33	S0033	11:00	15:00
16	S0016	14:00	17:00	34	S0034	11:00	15:00
17	S0017	14:00	17:00	35	S0035	14:00	17:00
18	S0018	14:00	17:00				

Tabla 3-17. Ventanas de tiempo para la recepción de productos secos

3.4.5 Distancias

En este trabajo fue necesario estimar el cálculo de las distancias entre los 41 nodos de la red de clientes que demandan productos refrigerados y los 35 nodos pertenecientes a los clientes de la línea de productos secos, utilizando la métrica de Manhattan ya que es el método ideal para realizar este tipo de

estimaciones. Las distancias obtenidas para la resolución del problema planteado, se muestran como anexos del documento.

3.4.6 Tiempos de desplazamiento

Los tiempos de desplazamiento entre cada nodo de la red son calculados a partir de la matriz de distancias estableciendo una velocidad constante de 40 km/h independientemente del tipo de vehículo utilizado, al igual que el punto anterior los tiempos de desplazamiento se encuentran disponibles en los anexos del documento.

3.4.7 Tiempo de servicio

En cuanto al tiempo de servicio se estimó necesario que este parámetro en particular sea el mismo para todos los clientes ya que según datos históricos de la empresa, el tiempo de servicio promedio es de 5 minutos.

Para la ejecución del modelo fue necesario realizar la agrupación de ciertos clientes y darles tratamiento como si fueran uno solo, esto implica que los tiempos de servicios de dichos nodos se vean afectados alcanzando tiempos mayores a los normales.

3.5 Heurística de segmentación de clientes

Una de las dificultades para la implementación del modelo de transporte planteado es la gran cantidad de nodos o clientes que el modelo debía considerar. Los nodos de la red se encuentran ubicados en diferentes zonas geográficas de la ciudad de Guayaquil que hemos denominado como zonas: 1, 2 y 3, por tal motivo se consideró necesaria la realización de una heurística que permita determinar el conjunto de clientes que se encuentran ubicados en las diferentes zonas, es decir, los resultados finales del presente estudio están dados en función de las diferentes zonas y para los diferentes tipos de productos que maneja la empresa (productos secos y refrigerados).

La heurística consta de una función cuyos datos de entrada son el conjunto de clientes, la matriz de distancias y tres variables dadas por el usuario, cuyo valor haga referencia a un nodo o semilla perteneciente a cada zona.

El objetivo de la heurística es tomar las variables dadas por el usuario y asignar cada nodo perteneciente a las diferentes zonas a un conjunto vacío.

En dichos conjuntos se incluirán únicamente aquellos nodos cuyas distancias sean mínimas partiendo desde el nodo dado por el usuario.

En la figura 3-1, se presenta el código de la Heurística de segmentación.

```

segc[n1_, n2_, n3_, dis_, c1_] :=
(
  c1 = {}; c2 = {}; c3 = {};
  c1 = Append[c1, n1];
  c2 = Append[c2, n2];
  c3 = Append[c3, n3];
  For[t = 2, t ≤ Length[dis], t++,
    If[t ≠ n1 && t ≠ n2 && t ≠ n3,
      e1 = dis[[n1, t]];
      e2 = dis[[n2, t]];
      e3 = dis[[n3, t]];
      If[e1 ≤ e2 && e1 ≤ e3, c1 = Append[c1, t],
        If[e2 ≤ e3 && e2 ≤ e1, c2 = Append[c2, t],
          If[e3 ≤ e1 && e3 ≤ e2, c3 = Append[c3, t]]];];];
  zona1 = {}; For[w = 1, w ≤ Length[c1], w++,
    zona1 = Append[zona1, c1[[w]]];];
  zona2 = {}; For[q = 1, q ≤ Length[c2], q++,
    zona2 = Append[zona2, c2[[q]]];];
  zona3 = {}; For[r = 1, r ≤ Length[c3], r++,
    zona3 = Append[zona3, c3[[r]]];];
)

```

Figura 3-1. Heurística de segmentación

3.6 Estructura del algoritmo Tabú que resuelve el problema

La implementación del procedimiento de búsqueda tabú para resolver la problemática actual de la empresa en base al modelo matemático planteado en el capítulo 2, presenta la siguiente estructura:

- Determinación de la solución Inicial.

- Estructura del vecindario.
- Evaluación de los movimientos.
- Creación de la lista Tabú.
- Criterio de Aspiración.

3.6.1 Determinación de la solución inicial

La implementación del algoritmo requiere de una solución inicial, la misma que se obtuvo con una heurística basada en el criterio del vecino más cercano. En términos generales, esta heurística consiste en elegir un nodo y partir hacia el más próximo que aún no haya sido visitado considerando las capacidades de los vehículos disponibles, finalizando cuando se haya visitado a todos los nodos obteniendo un conjunto de rutas.

Tal como se menciona, la solución obtenida hasta aquí no resuelve el problema planteado en un principio, pues únicamente satisface restricciones de capacidad de los vehículos sin considerar los tiempos de entrega.

La solución obtenida tiene la siguiente estructura:

Sea $S=\{R_1, R_2, R_3, R_4, \dots, R_p\}$ el conjunto de todas las rutas obtenidas donde cada elemento del vector S representa la ruta realizada por vehículo p , y a su vez cada subconjunto R contiene los elementos o clientes que serán visitados de manera secuencial.

$$R_p = \{(c_d \rightarrow c_1), (c_1 \rightarrow c_2), \dots, (c_n \rightarrow c_d)\} \quad (3.9)$$

Como se puede apreciar, R_p es la ruta conformada por los clientes $c_1, c_2, \dots, c_n$ la misma que empieza en un punto y termina en el mismo, siendo este el depósito.

3.6.2 Estructura del vecindario

Dada una solución actual se procede a la generación de m vecinos, este procedimiento consiste en un intercambio máximo de dos elementos de un mismo subconjunto R o elementos entre dos subconjuntos distintos, siempre que dichos intercambios generen nuevas soluciones factibles.

Sabiendo que una solución factible es aquella que cumple con todas las restricciones del problema y no necesariamente es la óptima.

La vecindad obtenida para el presente trabajo tiene la siguiente estructura:

$$\text{Sea la matriz } V_{m \times 1} = \begin{pmatrix} \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_p\} \\ \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_q\} \\ \vdots \\ \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_r\} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

3.6.3 Evaluación de los movimientos

En este punto se procede a evaluar cada una de las soluciones que se encuentran en la vecindad, mediante el cálculo del costo fijo asociado al utilizar el vehículo p y los costos variables de acuerdo a la distancia total recorrida por el mismo. Esto se realiza para cada solución de la vecindad obteniendo la siguiente matriz:

$$\begin{pmatrix} \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_p\} & C_1 \\ \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_q\} & C_2 \\ \vdots & \vdots \\ \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_r\} & C_m \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Para la obtención de quién será la nueva solución actual se busca en la vecindad la ruta que presente el menor costo.

3.6.4 Creación de la lista Tabú y criterio de aspiración

Una lista tabú es un esquema de memoria que almacena los movimientos o las rutas que han sido seleccionadas anteriormente, por lo que dichos movimientos se consideran prohibidos. Cada movimiento ingresado a la lista tabú deberá tener una permanencia de $k=5$ iteraciones dentro de la misma, luego de ello podrá volver a formar parte del conjunto de soluciones. Otra forma de que una

solución pueda salir de la lista tabú es que dicha solución presente el menor costo y a su vez sea la mejor solución encontrada al momento.

3.7 Funciones elementales para la aplicación del Tabú

A continuación se presentan las funciones básicas necesarias para la implementación de la metaheurística:

- 1. Función de intercambio de nodos:** Esta función requiere como datos de entrada el conjunto de rutas, la demanda y las capacidades de cada vehículo, dicha función se encarga de generar nuevos vecinos mediante la selección aleatoria de una ruta y un cliente, el cual es incorporado a otra ruta seleccionada de manera aleatoria generando un conjunto de rutas diferentes a la ya existente. Finalmente se verifica la demanda de los clientes asociados a cada ruta y en base a esto el programa asigna un vehículo de tal forma que la suma total de la demanda no exceda la capacidad del vehículo.
- 2. Función costo fijo:** Evalúa una solución dada, obteniendo como resultado el costo fijo de cada ruta en base a la cantidad y los tipos de vehículos utilizados.

3. **Función costo variable:** Al igual que la función anterior como dato de entrada se tiene una solución que al ser evaluada se obtendrá como resultado el costo variable en función de la distancia total recorrida por los vehículos asignados a cada ruta.
4. **Función de costo de demora:** Esta función evalúa la solución dada y realiza las respectivas penalizaciones que afectan directamente al costo total de la ruta siempre que se incumplan las ventanas horarias.
5. **Costo tránsito:** Existen clientes ubicados en zonas con acceso restringido para vehículos de ciertas capacidades, debido a esto, la función costo tránsito detecta la ubicación de los mismos en cada una de las rutas establecidas en la solución dada y realiza penalizaciones siempre que el vehículo a utilizar sea de capacidad superior a la permitida.
6. **Costo de utilización:** Se encarga de garantizar que los vehículos sean cargados con un porcentaje no inferior al dado por el usuario mediante penalizaciones.

CAPÍTULO 4

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta el análisis de los resultados obtenidos con la implementación de la metaheurística basada en el algoritmo de la búsqueda tabú que permite resolver el problema planteado en el capítulo 2.

4.1 Selección del vehículo

En el capítulo anterior se determinaron los posibles tipos de vehículos a utilizar y las marcas mediante la implementación del modelo de matriz de ponderación como se muestra en el resumen de las tablas 4-1 y 4-2.

Aspectos	Opciones	
	Chevrolet	Hyundai
Técnico 50%	1,87	2,42
Servicio Post-venta 35%	3,29	2,94
Económico 15%	4,4	4
Total	2,7465	2,839

Tabla 4-1. Resumen de la selección de marca para vehículo de 3,5 Ton

Aspectos	Opciones		
	Chevrolet	Hyundai	Hino
Técnico 50%	2	2,64	3,29
Servicio Post-venta 35%	3,44	3,16	2,89
Económico 15%	4,6	4	3,20
Total	2,894	3,026	3,1365

Tabla 4-2. Resumen de la selección de marca para vehículos de 5 y 10 Ton

En las tablas anteriores se establece que para el vehículo de 3,5 Ton la marca Hyundai es ganadora con 2,839 puntos y para los vehículos de 5 y 10 Ton es la marca Hino con 3,1365 puntos. Así mismo, en la tabla 4-3 se muestran los costos en los que se incurre al adquirir los tres tipos de vehículos en las marcas ganadoras.

Marca	Hyundai	Hino	Hino
Capacidad	3,5 Ton	5 Ton	10 Ton
Precio	\$ 27.990,00	\$ 32.032,00	\$ 60.807,04

Tabla 4-3. Precios de vehículos seleccionados

4.2 Heurística de segmentación

Las tablas 4-4 y 4-5 muestran los resultados obtenidos con la implementación de la heurística de segmentación de clientes, la cual fue realizada para los dos

tipos de productos que maneja la empresa empleando datos reales obtenidos en Google Earth de la ubicación geográfica de cada uno de los locales.

Productos Refrigerados	
Zona 1	23 Clientes
Zona 2	10 Clientes
Zona 3	8 Clientes

Tabla 4-4. Clasificación de clientes que demandan productos refrigerados

Productos Secos	
Zona 1	20 Clientes
Zona 2	9 Clientes
Zona 3	6 Clientes

Tabla 4-5. Clasificación de clientes que demandan productos secos

4.3 Resultados del ruteo

Los resultados obtenidos para la línea de productos alimenticios refrigerados y secos están dados por cada una de las zonas antes descritas, para ello se realizaron cinco corridas cada una con n iteraciones y una lista de m vecinos. Cabe recalcar que los resultados obtenidos en el presente estudio consideran los costos totales de transportación (costos fijos y variables) y el 30% de utilidad exigida por la empresa que brinda el servicio de transportación al OPL.

Zona 2

- Costo actual de rutas: \$90

	Solución Tabú	Distancia total recorrida	Ahorro porcentual
1	\$84,79	51,52 km	6%
2	\$84,79	51,52 km	6%
3	\$84,79	51,52 km	6%
4	\$84,79	51,52 km	6%
5	\$84,79	51,52 km	6%

Tabla 4-7. Iteraciones del algoritmo en la zona 2 para productos refrigerados con $n=40$ y $m=120$

- Mejor solución del tabú: \$ 84,79

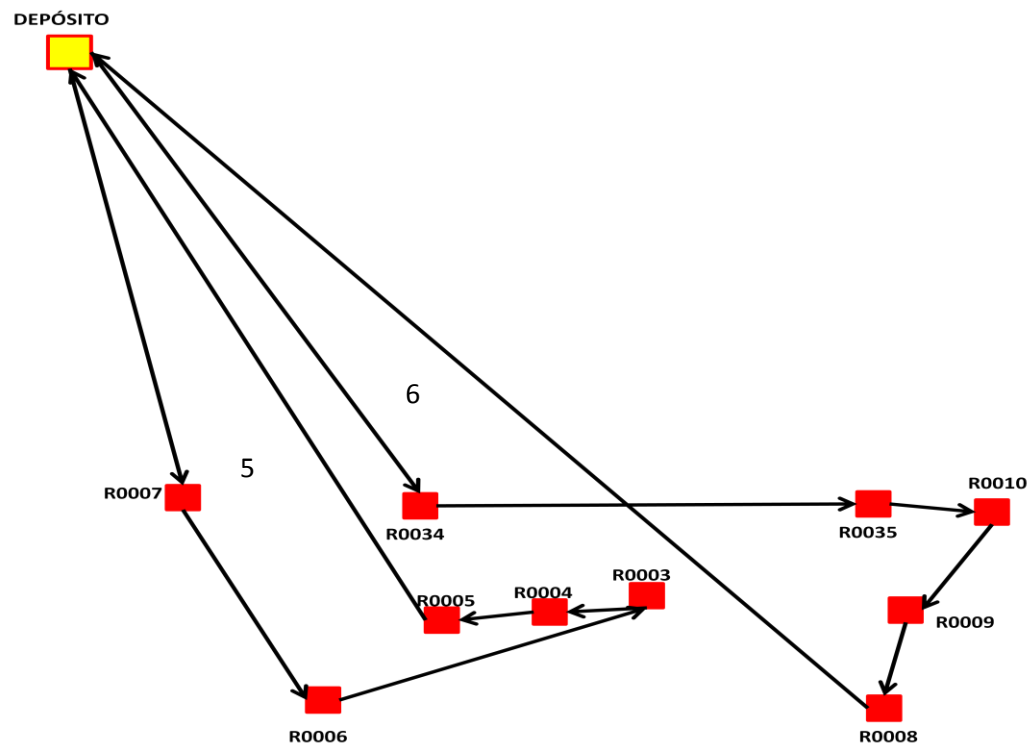


Figura 4-2. Ruteo para la entrega de productos refrigerados en la zona 2

Zona 3

- Costo actual de rutas: \$90

	Solución Tabú	Distancia total recorrida	Ahorro porcentual
1	\$73,75	53,84 km	18%
2	\$72,27	44,68 km	20%
3	\$73,75	53,84 km	18%
4	\$72,27	44,68 km	20%
5	\$73,75	53,84 km	18%

Tabla 4-8. Iteraciones del algoritmo en la zona 3 para productos refrigerados con $n=40$ y $m=120$

- Mejor solución del tabú: \$ 72,27

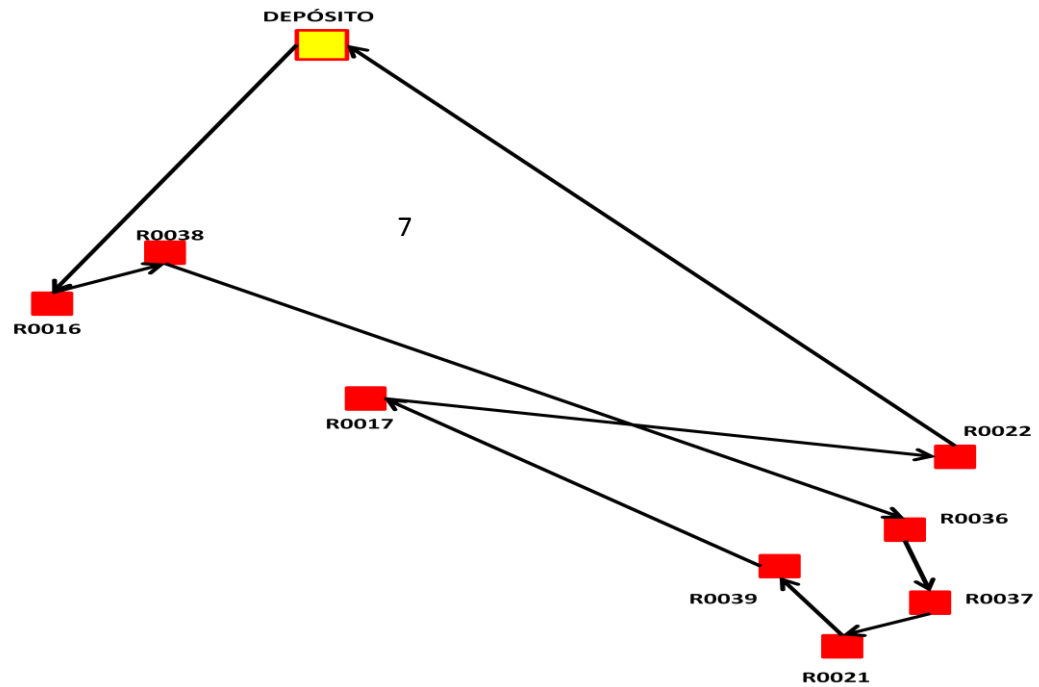


Figura 4-3. Ruteo para la entrega de productos refrigerados en la zona 3

En la tabla 4-9 se presentan los tipos de vehículos a utilizar para realizar la distribución de productos refrigerados obtenidos en la mejor solución del tabú de cada zona.

Ruta	Tipo de vehículo
1	10 Toneladas
2	3,5 Toneladas
3	5 Toneladas
4	10 Toneladas
5	3,5 Toneladas
6	3,5 Toneladas
7	10 Toneladas

Tabla 4-9. Tipos de vehículos utilizados por ruta para distribución de productos refrigerados

En la tabla 4-10 se presentan los tiempos en que se ha estimado visitar a cada cliente que demanda productos refrigerados según los resultados obtenidos mediante la metaheurística, en la cual observamos que todos los clientes son visitados dentro de las ventanas horarias establecidas.

PRODUCTOS REFRIGERADOS				
Nº	CLIENTE	H-INICIO	H-VISITA ESTIMADA	H-FIN
1	R0001	07:00	07:50	10:00
2	R0002	11:00	11:00	14:00
3	R0003	06:00	06:15	09:00
4	R0004	06:00	06:22	09:00
5	R0005	06:00	06:27	09:00
6	R0006	06:00	06:07	09:00
7	R0007	06:00	06:00	09:00
8	R0008	10:00	10:37	12:00
9	R0009	10:00	10:27	13:00
10	R0010	10:00	10:19	12:00
11	R0011	08:00	08:06	10:00
12	R0012	07:00	07:08	09:00
13	R0013	07:00	07:00	10:00
14	R0014	07:00	07:00	10:00
15	R0015	08:00	08:21	10:00
16	R0016	10:00	10:00	13:00
17	R0017	10:00	11:53	13:00
18	R0018	11:00	11:20	14:00

19	R0019	11:00	11:55	14:00
20	R0020	11:00	11:43	14:00
21	R0021	10:00	10:56	15:00
22	R0022	12:00	12:04	18:00
23	R0023	07:00	07:20	10:00
24	R0024	07:00	07:57	10:00
25	R0025	14:00	15:28	18:00
26	R0026	14:00	15:21	18:00
27	R0027	15:00	15:15	18:00
28	R0028	15:00	15:00	18:00
29	R0029	15:00	15:08	18:00
30	R0030	15:00	15:48	18:00
31	R0031	15:00	15:35	18:00
32	R0032	15:00	16:01	18:00
33	R0033	15:00	16:12	18:00
34	R0034	10:00	10:00	13:00
35	R0035	10:00	10:08	13:00
36	R0036	07:00	10:41	13:00
37	R0037	07:00	10:49	13:00
38	R0038	07:00	10:17	13:00
39	R0039	10:00	11:16	13:00
40	R0040	07:00	07:31	10:00
41	R0041	07:00	07:17	11:00

Tabla 4-10. Horas de visita a clientes de productos refrigerados

Con los resultados obtenidos, se puede determinar que el costo actual de distribución de productos refrigerados es de \$450, mientras que la solución tabú muestra un costo de \$381, es decir, existe un ahorro de 15%, tal como se indica en la tabla 4-11.

	Costos actual	Costo tabú	Ahorro porcentual
Zona 1	\$ 270	\$ 223,94	17%
Zona 2	\$ 90	\$ 84,79	6%
Zona 3	\$ 90	\$ 72,27	20%
Total	\$ 450	\$ 381	15%

Tabla 4-11. Costos totales de distribución de productos refrigerados

Zona 2

- Costo actual de rutas: \$152

	Solución Tabú	Distancia total recorrida	Ahorro porcentual
1	\$119,28	76,39 km	22%
2	\$119,43	76,97 km	21%
3	\$119,28	76,39 km	22%
4	\$119,33	76,48 km	21%
5	\$119,28	76,39 km	22%

Tabla 4-13. Iteraciones del algoritmo en la zona 2 para productos secos con $n=40$ y $m=120$

- Mejor solución del tabú: \$ 119,28

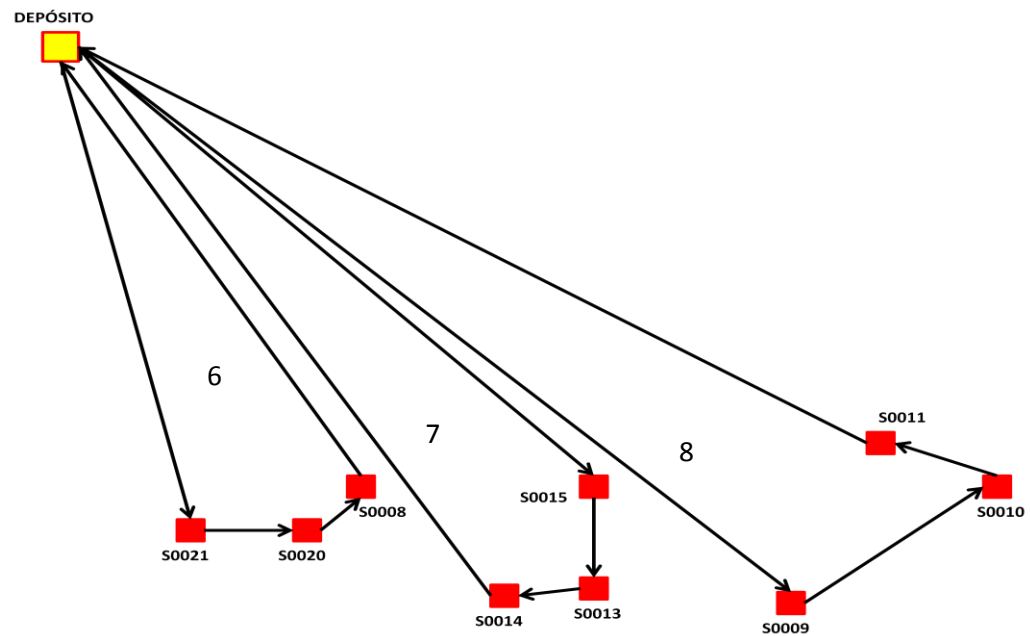


Figura 4-5. Ruteo para la entrega de productos secos en la zona 2

Zona 3

- Costo actual de rutas: \$114

	Solución Tabú	Distancia total recorrida	Ahorro porcentual
1	\$103,34	54,90 km	9%
2	\$103,34	54,90 km	9%
3	\$103,34	54,90 km	9%
4	\$103,34	54,90 km	9%
5	\$103,34	54,90 km	9%

Tabla 4-14. Iteraciones del algoritmo en la zona 3 para productos secos con $n=40$ y $m=120$

- Mejor solución del tabú: \$ 103,34

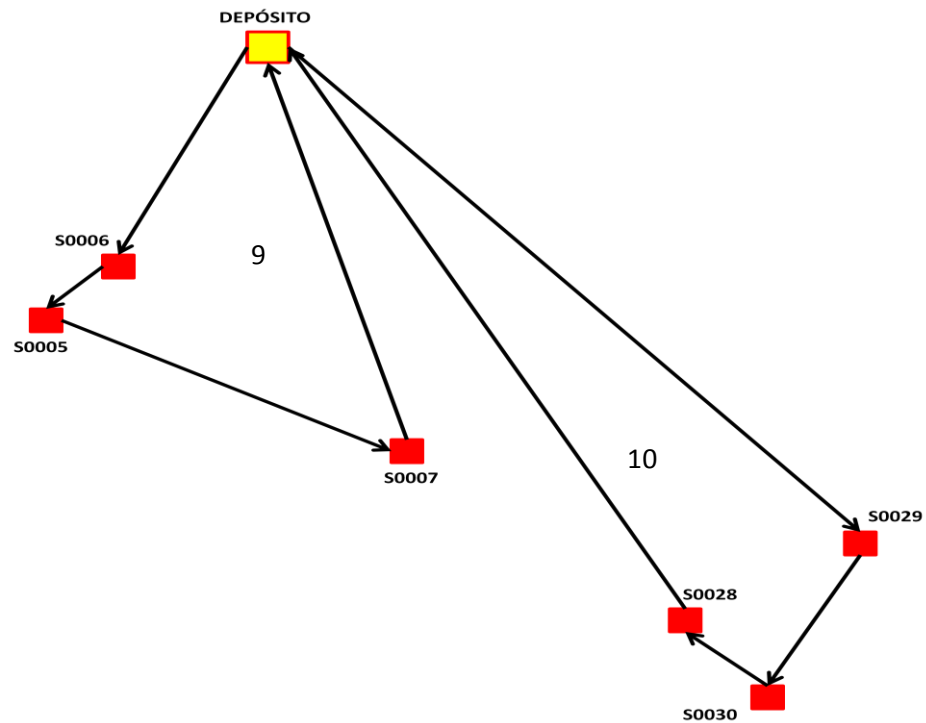


Figura 4-6. Ruteo para la entrega de productos secos en la zona 3

En tabla 4-15 se presentan los tipos de vehículos a utilizar para realizar la distribución de productos secos obtenidos en la mejor solución del tabú para cada zona.

Ruta	Tipo de vehículo
1	3,5 Toneladas
2	3,5 Toneladas
3	10 Toneladas
4	10 Toneladas
5	10 Toneladas
6	3,5 Toneladas
7	3,5 Toneladas
8	3,5 Toneladas
9	3,5 Toneladas
10	10 Toneladas

Tabla 4-15. Tipos de vehículos utilizados por ruta para distribución de productos secos

En la tabla 4-16 se presentan los tiempos en que se ha estimado visitar a cada cliente que demanda productos secos según los resultados obtenidos mediante la metaheurística, en la cual observamos que todos los clientes son visitados dentro de las ventanas horarias establecidas.

PRODUCTOS SECOS				
Nº	CLIENTE	H-INICIO	H-VISITA ESTIMADA	H-FIN
1	S0001	06:00	07:05	09:00
2	S0002	08:00	08:00	10:00
3	S0003	08:00	08:20	11:00
4	S0004	14:00	14:00	16:00
5	S0005	09:00	09:07	13:00
6	S0006	09:00	09:00	13:00
7	S0007	09:00	09:30	13:00
8	S0008	14:00	14:17	18:00
9	S0009	14:00	14:00	18:00
10	S0010	14:00	14:13	18:00
11	S0011	14:00	14:20	18:00
12	S0012	06:00	06:00	10:00
13	S0013	06:00	06:07	08:00
14	S0014	06:00	06:15	08:00

15	S0015	06:00	06:00	08:00
16	S0016	14:00	14:29	17:00
17	S0017	14:00	14:21	17:00
18	S0018	14:00	14:00	17:00
19	S0019	13:00	14:56	15:00
20	S0020	14:00	14:08	18:00
21	S0021	14:00	14:00	18:00
22	S0022	13:00	14:17	18:00
23	S0023	13:00	14:11	18:00
24	S0024	13:00	14:47	17:00
25	S0025	14:00	14:53	17:00
26	S0026	14:00	14:40	17:00
27	S0027	14:00	14:32	17:00
28	S0028	14:00	14:29	17:00
29	S0029	14:00	14:00	17:00
30	S0030	14:00	14:12	18:00
31	S0031	08:00	08:43	10:00
32	S0032	08:00	08:52	12:00
33	S0033	11:00	14:39	15:00
34	S0034	11:00	14:48	15:00
35	S0035	14:00	14:00	17:00

Tabla 4-16. Horas de visita a clientes de productos secos

Con los resultados obtenidos, se puede determinar que el costo actual de distribución de productos refrigerados es de \$532, mientras que la solución tabú muestra un costo de \$484,31; es decir, existe un ahorro del 9%, tal como se indica en la tabla 4-17.

	Costo actual	Costo tabú	Ahorro porcentual
Zona 1	\$ 304	\$ 261,69	14%
Zona 2	\$ 152	\$ 119,28	22%
Zona 3	\$ 114	\$ 103,34	9%
Total	\$ 532	\$ 484,31	9%

Tabla 4-17. Costos totales de distribución de productos secos

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- En base al estudio técnico realizado en este trabajo se obtuvieron considerables reducciones en los costos, lo que puede ser atribuible al establecimiento del precio justo de transportación evitando que las partes implicadas en la contratación de la flota salgan perjudicadas.
- Para el caso de los productos refrigerados existe una reducción en los costos de transportación del 15%, mientras que para la distribución de productos secos el ahorro es del 9% como se indica en la tabla 5-1.

	Costo actual (mensual)	Costo mejorado	Costo actual (diario)	Costo mejorado	Ahorro porcentual
Productos Refrigerados	\$ 13.500	\$ 11.430	\$ 450	\$ 381,00	15%
Productos Secos	\$ 17.100	\$ 14.529,30	\$ 570	\$ 484,31	9%

Tabla 5-1. Costos totales de transportación

- Una vez realizado el estudio en base a la matriz de ponderaciones se pudo determinar que la marca adecuada para vehículos de 3,5 Ton es Hyundai y para los vehículos de 5 y 10 Ton es la marca Hino. Así mismo,

se puede afirmar que las cantidades a utilizar de cada tipo de vehículo son las que se muestran en la tabla 5-2.

	Tipo de vehículo		
	3,5 [Ton]	5 [Ton]	10 [Ton]
Productos refrigerados	3	1	3
Productos secos	6	-	4

Tabla 5-2. Cantidades de vehículos a utilizar para la distribución de productos

- Como resultado de las iteraciones del algoritmo se obtuvo el conjunto de rutas que contribuyen a mejorar la distribución de los productos de la empresa, determinando que las rutas de distribución deben ser rediseñadas debido a que actualmente la empresa utiliza un total de 10 rutas para abastecer a clientes que demandan productos refrigerados y 14 para aquellos que demandan productos secos, mientras que la solución del algoritmo plantea que únicamente sería necesaria la utilización de 7 y 10 rutas respectivamente para abastecer en su totalidad la demanda. Esta reducción de rutas contribuye al ahorro en los costos de transportación y a su vez favorece las operaciones de distribución.
- La planificación de las rutas como la que se plantea en este estudio, considera restricciones de ventanas horarias, demanda de productos tanto en cantidad como en calidad a fin de cumplir una promesa de servicio.

5.2 Recomendaciones

- Dado que el presente estudio es realizado para una empresa que pretende mejorar la distribución de sus productos empleando una flota tercerizada y en base a los resultados obtenidos con la implementación del algoritmo, no se considera necesaria la contratación del total de vehículos detallados en la tabla 5-2 ya que el cumplimiento de las ventanas horarias establece que una gran cantidad de rutas sean realizadas en horarios de la mañana y otras en horarios de la tarde. Esto facilita la planificación de rutas permitiendo a la empresa la designación de un mismo vehículo a rutas compatibles, siempre que estas no precisen ser realizadas al mismo tiempo. Por ello, se recomienda la contratación de los vehículos tal como se muestra en las tablas 5-3 y 5-4, esto no significa que exista una reducción de costos mayor que la presentada en la tabla 5-1 puesto que la realización de dos o más rutas empleando un mismo vehículo no exime a la empresa del costo sino del manejo de más vehículos para realizar la distribución.

	Productos Refrigerados		
	3,5 [Ton]	5 [Ton]	10 [Ton]
Rutas en Horario Matutino	2	-	2
Rutas en Horario Vespertino	1	1	1
Total de Vehículos a Subcontratar	2	1	2

Tabla 5-3. Cantidades de Vehículos a subcontratar para productos refrigerados

	Productos Secos		
	3,5 [Ton]	5 [Ton]	10 [Ton]
Rutas en Horario Matutino	3	-	1
Rutas en Horario Vespertino	3	-	3
Total de Vehículos a Subcontratar	3	-	3

Tabla 5-4. Cantidades de Vehículos a subcontratar para productos secos

- Al realizar estudios de este tipo es recomendable considerar ciertas variables exógenas como las restricciones viales, variaciones en los costos que afectan directa e indirectamente al flete y otras dadas por la empresa como el porcentaje de utilización mínimo que debe poseer cada vehículo para poder salir del depósito.
- Antes de realizar la distribución diaria de productos, se considera necesario que cada chofer cuente con el plan de ruta impreso exigiéndole que cumpla con el orden detallado para obtener la reducción de costos estimada en el presente estudio.
- Es recomendable que las decisiones se tomen en base a estudios e investigaciones realizadas, la asignación de nuevos clientes a una ruta es una actividad que puede parecer sencilla pero que al realizarla de manera empírica es muy probable que genere efectos negativos en los costos y/o en la promesa de servicio.
- Es importante mencionar que existen otras maneras de realizar la segmentación de clientes, entre ellas la más recomendable para

problemas de este tipo seria segmentar de acuerdo a la concentración de clientes en cada zona.

- Debido a la constante evolución del mercado, se recomienda el desarrollo de una plataforma informática que permita la modificación de los parámetros de entrada del modelo usando como base la información obtenida en este trabajo.

6 ANEXOS

6.1 Unificación de demanda de la zona 1 de productos

refrigerados

ZONA 1 (PRODUCTOS REFRIGERADOS)				
Nº	NODOS	CLIENTES	DEMANDA [jabas]	
			CLIENTE	NODO
1	R0001	R0001-01	18	85
		R0001-02	13	
		R0001-03	15	
		R0001-04	17	
		R0001-05	10	
		R0001-06	12	
2	R0002	R0002-01	10	35
		R0002-02	6	
		R0002-03	11	
		R0002-04	8	
3	R0011	R0011-01	20	79
		R0011-02	32	
		R0011-03	27	
4	R0012	R0012-01	14	14
5	R0013	R0013-01	30	30
6	R0014	R0014-01	11	46
		R0014-02	20	
		R0014-03	15	
7	R0015	R0015-01	8	60
		R0015-02	10	
		R0015-03	5	
		R0015-04	2	
		R0015-05	9	
		R0015-06	3	
		R0015-07	6	
		R0015-08	7	
		R0015-09	5	
		R0015-10	3	
8	R0018	R0018-01	13	30
		R0018-02	7	
		R0018-03	10	
9	R0019	R0019-01	25	25
10	R0020	R0020-01	14	23
		R0020-02	9	
11	R0023	R0023-01	27	27
12	R0024	R0024-01	29	29
13	R0025	R0025-01	10	10
14	R0026	R0026-01	20	20
15	R0027	R0027-01	38	38
16	R0028	R0028-01	5	5
17	R0029	R0029-01	5	5
18	R0030	R0030-01	15	15
19	R0031	R0031-01	17	17
20	R0032	R0032-01	17	17
21	R0033	R0033-01	5	5
22	R0040	R0040-01	17	53
		R0040-02	14	
		R0040-03	22	
23	R0041	R0041-01	22	101
		R0041-02	24	
		R0041-03	18	
		R0041-04	15	
		R0041-05	13	
		R0041-06	9	

6.2 Unificación de demanda de la zona 2 de productos

refrigerados

ZONA 2 (PRODUCTOS REFRIGERADOS)				
Nº	NODOS	CLIENTES	DEMANDA [jabas]	
			CLIENTE	NODO
1	R0003	R0003-01	38	38
2	R0004	R0004-01	28	28
3	R0005	R0005-01	18	18
4	R0006	R0006-01	15	15
5	R0007	R0007-01	16	16
6	R0008	R0008-01	25	25
7	R0009	R0009-01	14	24
		R0009-02	10	
8	R0010	R0010-01	21	21
9	R0034	R0034-01	8	8
10	R0035	R0035-01	20	20

6.3 Unificación de demanda de la zona 3 de productos

refrigerados

ZONA 3 (PRODUCTOS REFRIGERADOS)				
Nº	NODOS	CLIENTES	DEMANDA [jabas]	
			CLIENTE	NODO
1	R0016	R0016-01	9	26
		R0016-02	11	
		R0016-03	6	
2	R0017	R0017-01	29	29
3	R0021	R0021-01	12	39
		R0021-02	14	
		R0021-03	13	
4	R0022	R0022-01	16	16
5	R0036	R0036-01	7	7
6	R0037	R0037-01	6	6
7	R0038	R0038-01	14	14
8	R0039	R0039-01	15	104
		R0039-02	16	
		R0039-03	14	
		R0039-04	19	
		R0039-05	12	
		R0039-06	11	
		R0039-07	17	

6.4 Unificación de demanda de la zona 1 de productos secos

ZONA 1 (PRODUCTOS SECOS)				
Nº	NODOS	CLIENTES	DEMANDA [% utilización]	
			CLIENTE	NODO
1	S0001	S0001-01	0,15	1
		S0001-02	0,18	
		S0001-03	0,12	
		S0001-04	0,2	
		S0001-05	0,23	
		S0001-06	0,12	
2	S0002	S0002-01	0,08	0,25
		S0002-02	0,06	
		S0002-03	0,04	
		S0002-04	0,07	
3	S0003	S0003-01	0,06	0,2
		S0003-02	0,03	
		S0003-03	0,11	
4	S0004	S0004-01	0,07	0,25
		S0004-02	0,08	
		S0004-03	0,1	
5	S0012	S0012-01	0,05	0,81
		S0012-02	0,07	
		S0012-03	0,02	
		S0012-04	0,04	
		S0012-05	0,09	
		S0012-06	0,1	
		S0012-07	0,12	
		S0012-08	0,08	
		S0012-09	0,05	
		S0012-10	0,06	
		S0012-11	0,07	
		S0012-12	0,06	
6	S0016	S0016-01	0,15	0,15
7	S0017	S0017-01	0,25	0,25
8	S0018	S0018-01	0,1	0,1
9	S0019	S0019-01	0,15	0,5
		S0019-02	0,2	
		S0019-03	0,15	
10	S0022	S0022-01	0,12	0,5
		S0022-02	0,15	
		S0022-03	0,23	
11	S0023	S0023-01	0,45	0,45
12	S0024	S0024-01	0,25	0,25
13	S0025	S0025-01	0,2	0,2
14	S0026	S0026-01	0,15	0,15
15	S0027	S0027-01	0,25	0,25
16	S0031	S0031-01	0,1	0,1
17	S0032	S0032-01	0,1	0,15
		S0032-02	0,05	
18	S0033	S0033-01	0,15	0,15
19	S0034	S0034-01	0,1	0,1
20	S0035	S0035-01	0,16	0,91
		S0035-02	0,12	
		S0035-03	0,18	
		S0035-04	0,22	
		S0035-05	0,1	
		S0035-06	0,13	

6.5 Unificación de demanda de la zona 2 de productos secos

ZONA 2 (PRODUCTOS SECOS)				
Nº	NODOS	CLIENTES	DEMANDA [% utilización]	
			CLIENTE	NODO
1	S0008	S0008-01	0,3	0,3
2	S0009	S0009-01	0,12	0,2
		S0009-02	0,08	
3	S0010	S0010-01	0,2	0,2
4	S0011	S0011-01	0,3	0,3
5	S0013	S0013-01	0,3	0,3
6	S0014	S0014-01	0,2	0,2
7	S0015	S0015-01	0,25	0,25
8	S0020	S0020-01	0,2	0,2
9	S0021	S0021-01	0,25	0,25

6.6 Unificación de demanda de la zona 3 de productos secos

ZONA 3 (PRODUCTOS SECOS)				
Nº	NODOS	CLIENTES	DEMANDA [% utilización]	
			CLIENTE	NODO
1	S0005	S0005-01	0,1	0,25
		S0005-02	0,08	
		S0005-03	0,07	
2	S0006	S0006-01	0,1	0,1
3	S0007	S0007-01	0,25	0,25
4	S0028	S0028-01	0,18	0,9
		S0028-02	0,14	
		S0028-03	0,25	
		S0028-04	0,1	
		S0028-05	0,06	
		S0028-06	0,17	
5	S0029	S0029-01	0,15	0,15
6	S0030	S0030-01	0,26	0,6
		S0030-02	0,22	
		S0030-03	0,12	

6.7 Matriz de distancias de la zona 1 de productos refrigerados

ZONA1 (Productos refrigerados)																								
	PLANTA	R0001	R0002	R0011	R0012	R0013	R0014	R0015	R0018	R0019	R0020	R0023	R0024	R0025	R0026	R0027	R0028	R0029	R0030	R0031	R0032	R0033	R0040	R0041
PLANTA	0,0	6,9	8,2	6,7	2,1	4,6	3,6	6,9	8,4	15,2	15,8	3,1	7,5	5,9	5,0	4,4	2,9	5,1	7,3	6,4	8,6	9,1	7,7	3,2
R0001	6,9	0,0	2,0	2,8	9,0	11,4	4,8	1,1	1,8	8,3	8,9	7,1	5,1	2,0	1,9	2,5	4,4	3,0	4,3	1,0	1,9	2,4	5,0	3,6
R0002	8,2	2,0	0,0	4,8	10,3	12,8	6,1	3,1	0,2	7,0	7,6	9,2	7,1	4,0	3,9	3,9	6,4	5,1	6,4	3,0	3,9	4,5	7,0	5,0
R0011	6,7	2,8	4,8	0,0	8,8	11,3	4,6	1,7	4,6	8,5	9,1	4,3	2,3	0,8	1,7	2,3	3,8	1,6	1,5	1,8	1,9	2,4	2,2	3,5
R0012	2,1	9,0	10,3	8,8	0,0	2,5	4,2	9,0	10,5	17,3	17,9	5,2	9,6	8,1	7,1	6,5	5,0	7,2	9,4	8,5	10,7	11,2	9,8	5,3
R0013	4,6	11,4	12,8	11,3	2,5	0,0	6,6	11,4	12,9	19,7	20,3	7,6	12,0	10,5	9,5	8,9	7,4	9,7	11,9	11,0	13,2	13,6	12,2	7,8
R0014	3,6	4,8	6,1	4,6	4,2	6,6	0,0	4,8	6,3	13,1	13,7	5,9	5,4	3,9	2,9	2,3	3,1	3,0	5,2	4,3	6,5	7,0	5,6	1,7
R0015	6,9	1,1	3,1	1,7	9,0	11,4	4,8	0,0	2,9	8,3	8,9	6,1	4,0	0,9	1,9	2,5	4,0	2,0	3,2	0,5	1,7	2,2	3,9	3,7
R0018	8,4	1,8	0,2	4,6	10,5	12,9	6,3	2,9	0,0	6,8	7,4	9,0	6,9	3,8	3,7	4,0	6,2	4,8	6,1	2,8	3,7	4,2	6,8	5,2
R0019	15,2	8,3	7,0	8,5	17,3	19,7	13,1	8,3	6,8	0,0	2,5	12,1	7,7	9,2	10,2	10,8	12,3	10,1	7,9	8,8	6,6	6,1	7,5	12,0
R0020	15,8	8,9	7,6	9,1	17,9	20,3	13,7	8,9	7,4	2,5	0,0	12,7	8,3	9,8	10,8	11,4	12,9	10,7	8,5	9,4	7,2	6,7	8,1	12,6
R0023	3,1	7,1	9,2	4,3	5,2	7,6	5,9	6,1	9,0	12,1	12,7	0,0	4,4	5,1	5,3	5,5	2,8	4,1	4,2	6,1	5,5	6,0	4,6	4,1
R0024	7,5	5,1	7,1	2,3	9,6	12,0	5,4	4,0	6,9	7,7	8,3	4,4	0,0	3,1	3,3	3,4	4,6	2,3	0,8	4,1	3,2	2,7	0,2	4,2
R0025	5,9	2,0	4,0	0,8	8,1	10,5	3,9	0,9	3,8	9,2	9,8	5,1	3,1	0,0	1,0	1,6	3,1	1,0	2,3	1,0	2,7	3,1	3,0	2,7
R0026	5,0	1,9	3,9	1,7	7,1	9,5	2,9	1,9	3,7	10,2	10,8	5,3	3,3	1,0	0,0	0,6	2,5	1,2	2,5	1,4	3,6	4,1	3,1	1,8
R0027	4,4	2,5	3,9	2,3	6,5	8,9	2,3	2,5	4,0	10,8	11,4	5,5	3,4	1,6	0,6	0,0	2,7	1,4	2,9	2,1	4,2	4,7	3,3	1,3
R0028	2,9	4,4	6,4	3,8	5,0	7,4	3,1	4,0	6,2	12,3	12,9	2,8	4,6	3,1	2,5	2,7	0,0	2,2	4,4	3,6	5,7	6,2	4,8	1,4
R0029	5,1	3,0	5,1	1,6	7,2	9,7	3,0	2,0	4,8	10,1	10,7	4,1	2,3	1,0	1,2	1,4	2,2	0,0	2,2	2,0	3,5	4,0	2,6	1,9
R0030	7,3	4,3	6,4	1,5	9,4	11,9	5,2	3,2	6,1	7,9	8,5	4,2	0,8	2,3	2,5	2,9	4,4	2,2	0,0	3,3	2,4	1,9	0,7	4,1
R0031	6,4	1,0	3,0	1,8	8,5	11,0	4,3	0,5	2,8	8,8	9,4	6,1	4,1	1,0	1,4	2,1	3,6	2,0	3,3	0,0	2,2	2,6	4,0	3,2
R0032	8,6	1,9	3,9	1,9	10,7	13,2	6,5	1,7	3,7	6,6	7,2	5,5	3,2	2,7	3,6	4,2	5,7	3,5	2,4	2,2	0,0	0,5	3,1	5,4
R0033	9,1	2,4	4,5	2,4	11,2	13,6	7,0	2,2	4,2	6,1	6,7	6,0	2,7	3,1	4,1	4,7	6,2	4,0	1,9	2,6	0,5	0,0	2,6	5,9
R0040	7,7	5,0	7,0	2,2	9,8	12,2	5,6	3,9	6,8	7,5	8,1	4,6	0,2	3,0	3,1	3,3	4,8	2,6	0,7	4,0	3,1	2,6	0,0	4,5
R0041	3,2	3,6	5,0	3,5	5,3	7,8	1,7	3,7	5,2	12,0	12,6	4,1	4,2	2,7	1,8	1,3	1,4	1,9	4,1	3,2	5,4	5,9	4,5	0,0

6.8 Matriz de distancias de la zona 2 de productos refrigerados

	ZONA 2 (Productos refrigerados)										
	PLANTA	R0003	R0004	R0005	R0006	R0007	R0008	R0009	R0010	R0034	R0035
PLANTA	0,0	11,9	11,6	11,5	11,1	9,9	12,9	12,0	11,9	10,6	11,5
R0003	11,9	0,0	0,2	0,3	0,9	2,0	1,1	1,1	1,3	1,3	1,1
R0004	11,6	0,2	0,0	0,1	0,8	1,8	1,3	1,3	1,4	1,1	1,2
R0005	11,5	0,3	0,1	0,0	0,7	1,7	1,4	1,4	1,5	1,0	1,2
R0006	11,1	0,9	0,8	0,7	0,0	1,2	1,9	1,9	2,2	0,5	1,9
R0007	9,9	2,0	1,8	1,7	1,2	0,0	3,1	3,1	2,3	0,7	2,0
R0008	12,9	1,1	1,3	1,4	1,9	3,1	0,0	0,0	2,1	2,3	1,9
R0009	12,0	1,1	1,3	1,4	1,9	3,1	0,0	0,0	2,1	2,3	1,9
R0010	11,9	1,3	1,4	1,5	2,2	2,3	2,1	2,1	0,0	2,0	0,4
R0034	10,6	1,3	1,1	1,0	0,5	0,7	2,3	2,3	2,0	0,0	1,8
R0035	11,5	1,1	1,2	1,2	1,9	2,0	1,9	1,9	0,4	1,8	0,0

6.9 Matriz de distancias de la zona 3 de productos refrigerados

	ZONA 3 (Productos refrigerados)								
	PLANTA	R0016	R0017	R0021	R0022	R0036	R0037	R0038	R0039
PLANTA	0,0	5,9	9,2	16,0	13,3	14,2	15,9	4,7	14,2
R0016	5,9	0,0	5,9	12,7	10,0	10,9	12,6	1,3	10,8
R0017	9,2	5,9	0,0	6,8	4,1	5,0	6,7	5,6	5,0
R0021	16,0	12,7	6,8	0,0	4,6	2,4	1,0	12,4	1,8
R0022	13,3	10,0	4,1	4,6	0,0	2,2	3,6	12,7	3,5
R0036	14,2	10,9	5,0	2,4	2,2	0,0	1,7	10,6	1,3
R0037	15,9	12,6	6,7	1,0	3,6	1,7	0,0	12,3	1,8
R0038	4,7	1,3	5,6	12,4	12,7	10,6	12,3	0,0	10,6
R0039	14,2	10,8	5,0	1,8	3,5	1,3	1,8	10,6	0,0

6.10 Matriz de distancias de la zona 1 de productos secos

	ZONA 1 (Productos secos)																				
	PLANTA	S0001	S0002	S0003	S0004	S0012	S0016	S0017	S0018	S0019	S0022	S0023	S0024	S0025	S0026	S0027	S0031	S0032	S0033	S0034	S0035
PLANTA	0,0	6,9	8,2	8,4	3,6	6,9	4,6	2,1	3,1	6,7	7,7	7,5	5,0	4,4	6,0	7,3	14,3	16,7	6,4	8,6	3,2
S0001	6,9	0,0	2,0	1,8	4,8	1,1	11,4	9,0	7,1	2,8	5,0	5,1	1,9	2,5	2,0	4,3	7,4	9,9	1,0	1,9	3,7
S0002	8,2	2,0	0,0	0,2	6,2	3,1	12,8	10,3	9,2	4,9	7,0	7,1	3,9	3,9	4,0	6,4	6,0	8,5	3,0	3,9	5,0
S0003	8,4	1,8	0,2	0,0	6,3	2,9	12,9	10,5	9,0	4,6	6,8	6,9	3,7	4,0	3,8	6,1	5,9	8,4	2,8	3,7	5,2
S0004	3,6	4,8	6,2	6,3	0,0	4,8	6,6	4,2	5,9	4,6	5,6	5,4	2,9	2,3	3,9	5,2	12,2	14,6	4,4	6,5	1,7
S0012	6,9	1,1	3,1	2,9	4,8	0,0	11,5	9,0	6,1	1,8	3,9	4,0	1,9	2,5	0,9	3,3	7,4	9,8	0,5	1,7	3,7
S0016	4,6	11,4	12,8	12,9	6,6	11,5	0,0	2,5	7,6	11,3	12,2	12,0	9,5	8,9	10,5	11,9	18,8	21,3	11,0	13,2	7,8
S0017	2,1	9,0	10,3	10,5	4,2	9,0	2,5	0,0	5,2	8,8	9,8	9,6	7,1	6,5	8,1	9,4	16,4	18,8	8,5	10,7	5,3
S0018	3,1	7,1	9,2	9,0	5,9	6,1	7,6	5,2	0,0	4,3	4,6	4,4	5,3	5,5	5,1	4,2	11,2	13,6	6,2	5,5	4,1
S0019	6,7	2,8	4,9	4,6	4,6	1,8	11,3	8,8	4,3	0,0	2,2	2,3	1,7	2,3	0,8	1,5	7,5	10,0	1,8	1,9	3,5
S0022	7,7	5,0	7,0	6,8	5,6	3,9	12,2	9,8	4,6	2,2	0,0	0,2	3,1	3,3	3,0	0,7	6,6	9,1	4,0	3,1	4,5
S0023	7,5	5,1	7,1	6,9	5,4	4,0	12,0	9,6	4,4	2,3	0,2	0,0	3,3	3,4	3,1	0,8	6,8	9,3	4,1	3,2	4,3
S0024	5,0	1,9	3,9	3,7	2,9	1,9	9,5	7,1	5,3	1,7	3,1	3,3	0,0	0,6	1,0	2,5	9,3	11,7	1,5	3,6	1,8
S0025	4,4	2,5	3,9	4,0	2,3	2,5	8,9	6,5	5,5	2,3	3,3	3,4	0,6	0,0	1,6	2,9	9,9	12,4	2,1	4,2	1,3
S0026	6,0	2,0	4,0	3,8	3,9	0,9	10,5	8,1	5,1	0,8	3,0	3,1	1,0	1,6	0,0	2,3	8,3	10,8	1,0	2,7	2,8
S0027	7,3	4,3	6,4	6,1	5,2	3,3	11,9	9,4	4,2	1,5	0,7	0,8	2,5	2,9	2,3	0,0	7,0	9,4	3,3	2,4	4,1
S0031	14,3	7,4	6,0	5,9	12,2	7,4	18,8	16,4	11,2	7,5	6,6	6,8	9,3	9,9	8,3	7,0	0,0	2,5	7,8	5,6	11,1
S0032	16,7	9,9	8,5	8,4	14,6	9,8	21,3	18,8	13,6	10,0	9,1	9,3	11,7	12,4	10,8	9,4	2,5	0,0	10,3	8,1	13,5
S0033	6,4	1,0	3,0	2,8	4,4	0,5	11,0	8,5	6,2	1,8	4,0	4,1	1,5	2,1	1,0	3,3	7,8	10,3	0,0	2,2	3,2
S0034	8,6	1,9	3,9	3,7	6,5	1,7	13,2	10,7	5,5	1,9	3,1	3,2	3,6	4,2	2,7	2,4	5,6	8,1	2,2	0,0	5,4
S0035	3,2	3,7	5,0	5,2	1,7	3,7	7,8	5,3	4,1	3,5	4,5	4,3	1,8	1,3	2,8	4,1	11,1	13,5	3,2	5,4	0,0

6.11 Matriz de distancias de la zona 2 de productos secos

	ZONA 2 (Productos secos)									
	PLANTA	S0008	S0009	S0010	S0011	S0013	S0014	S0015	S0020	S0021
PLANTA	0,0	12,9	12,9	11,9	11,5	11,9	11,6	11,5	11,1	9,9
S0008	12,9	0,0	0,0	2,1	1,9	1,1	1,3	1,4	1,9	3,1
S0009	12,9	0,0	0,0	2,1	1,9	1,1	1,3	1,4	1,9	3,1
S0010	11,9	2,1	2,1	0,0	0,4	1,3	1,4	1,5	2,2	2,3
S0011	11,5	1,9	1,9	0,4	0,0	1,1	1,2	1,2	1,9	2,0
S0013	11,9	1,1	1,1	1,3	1,1	0,0	0,2	0,3	0,9	2,0
S0014	11,6	1,3	1,3	1,4	1,2	0,2	0,0	0,1	0,8	1,8
S0015	11,5	1,4	1,4	1,5	1,2	0,3	0,1	0,0	0,7	1,7
S0020	11,1	1,9	1,9	2,2	1,9	0,9	0,8	0,7	0,0	1,2
S0021	9,9	3,1	3,1	2,3	2,0	2,0	1,8	1,7	1,2	0,0

6.12 Matriz de distancias de la zona 3 de productos secos

	ZONA 3 (Productos secos)						
	PLANTA	S0005	S0006	S0007	S0028	S0029	S0030
PLANTA	0,0	5,9	4,7	9,2	14,2	13,3	16,0
S0005	5,9	0,0	1,3	5,9	10,8	10,0	12,7
S0006	4,7	1,3	0,0	5,8	10,8	9,9	12,6
S0007	9,2	5,9	5,8	0,0	5,0	4,1	6,8
S0028	14,2	10,8	10,8	5,0	0,0	3,5	1,8
S0029	13,3	10,0	9,9	4,1	3,5	0,0	4,6
S0030	16,0	12,7	12,6	6,8	1,8	4,6	0,0

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hillier, F., Lieberman, G., Investigación de Operaciones, McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A., 2001, Pág. 1-2.
- [2] Cepeda, C., “Diseño de una red logística de abastecimiento de alimentos para la ciudad de Guayaquil mediante la aplicación de un modelo matemático”. ESPOL. 2007.
- [3] García, J. y Maheut, J., “Modelos y métodos de investigación de operaciones,” Grupo de Investigación ROGLE. 2011-2012. Pág.28.
- [4] Cortes, A., “Teoría de la complejidad computacional y teoría de la computabilidad,” Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2004, ISSN: 1815-0268, Pág. 103-104.
- [5] Delgado, Erwin., “Problema de recolección de Desechos Hospitalarios en la Ciudad de Guayaquil”. ESPOL. 2007.
- [6] García, J., “Algoritmos basados en cúmulos de partículas para la resolución de problemas complejos,” 2006.
- [7] Hernández, J., Presentación de “Metaheurísticas aplicada a la bioinformática”. Corporación universitaria para el desarrollo de internet A.C. 2011. Pág. 4.

- [8] Vélez, M. y Montoya, J., “Metaheurísticos: una alternativa para la solución de problemas combinatorios en administración de operaciones,” Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia). 2007, ISSN 1794-1237 Número 8, Pág. 106–108.
- [9] AECOC, “RAL sobre productos congelados,” 1997.
- [10] Alfonso, H., Salto, C., Minetti, G., Stark, N., “Algoritmos Metaheurísticos para Optimización y Aplicación a Problemas NP Completos,” Universidad Nacional de La Pampa.
- [11] Riojas, A., “Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N-reinas: Búsqueda Tabú,” Monografía para Licenciatura de Investigación Operativa, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2005.