

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS**

**DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS**

**TESIS DE GRADO**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**“MAGÍSTER EN CONTROL DE OPERACIONES Y GESTIÓN LOGÍSTICA”**

**TEMA:**

**“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO PARA RUTEO  
VEHICULAR QUE PERMITA OPTIMIZAR LA DISTRIBUCIÓN EN UNA  
EMPRESA COMERCIALIZADORA DE AUTOPARTES EN QUITO”**

**AUTOR:**

**ING. ISRAEL DAVID HERRERA GRANDA**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO**

**2015**

# DEDICATORIA

Ing. Israel David Herrera Granda.

A Dios, por siempre estar presente cuidándome en todo camino que he decidido tomar.

A los miembros de mi familia: José Luis, Norma, Dayana y en especial para mi hermano Erick, quien me inspira a ser un buen hermano mayor, y a mejorar cada día.

Y a todos los que confían en mí...

## **AGRADECIMIENTO**

Aprovecho la oportunidad para agradecer a todos quienes aportaron para poder completar este proyecto para mi crecimiento profesional.

A mi mentor el M.Sc. Carlos Martín Barreiro por su apoyo incondicional dentro del presente.

A la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas por los conocimientos impartidos durante mi formación académica en la carrera de control de operaciones y gestión logística.

A la familia Granda Luces por acogerme como un miembro más de su hogar durante la elaboración del presente.

A mis colegas logísticos Jorge Chicaiza, y Christian Díaz por aportar conceptualmente al presente.

A mis compañeros Alex C. & Henry Y. Por su apoyo con información logística y su leal aporte dentro de mi equipo de trabajo.

## DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Graduación, me corresponden exclusivamente; el patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas, Departamento de Matemáticas** de la Escuela Superior Politécnica del Litoral.



---

Ing. Israel David Herrera Granda

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Johni Bustamante Romero, P.h.D.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



M.Sc. Carlos Martín Barreiro

DIRECTOR DE TESIS



M.Sc. Anibal Suárez Hernández

VOCAL DEL TRIBUNAL

## RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó y evaluó una metaheurística de algoritmo genético hibridándola con la metaheurística del vecino más cercano para el ruteo de vehículos con el objetivo de optimizar la distribución en una empresa comercializadora de autopartes de nombre ficticio "REPUESTOS S.A." en la ciudad de Quito, para ello se desarrolló una aplicación programada en el lenguaje C# e inspirada a su vez en el enunciado del problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo y capacidad limitada CVRPTW. Una vez desarrollada la aplicación se la evaluó contra un modelo aproximado del VRPTW programado en GAMS con una pequeña cantidad de nodos clientes demostrándose la calidad de las respuestas proporcionadas por la aplicación, luego se pasó a resolver los problemas reales de una empresa distribuidora de autopartes en la ciudad de Quito o DMQ, con una mayor cantidad de clientes en donde se detectó las posibilidades de mejora y la factibilidad de implementarlo en dicha empresa.

Los recientes avances en investigación de operaciones y el desarrollo de algoritmos matemáticos aplicados dentro de entornos computacionales sobre los problemas de SCM en la industria, han demostrado mejoras efectivas para la solución de dichos problemas como el problema de la programación y diseño de rutas para los vehículos de reparto (Hillier, 2010). La creación de un algoritmo matemático orientado a optimizar el ruteo de los vehículos de reparto ayudaría a la empresa en cuestión a optimizar su sistema de distribución urbana.

El problema del ruteo vehicular se encuentra comprendido dentro campo del conocimiento "Estrategia del transporte", y este campo a su vez está comprendido dentro de la Administración de la cadena de suministro o SCM (Ballou, 2004). El presente estudio planteaba solucionar el problema de la programación y diseño de rutas para vehículos también conocido como ruteo, para una empresa comercializadora de autopartes, mediante la creación de un software computacional con base en un procedimiento metaheurístico híbrido que pueda ser usado como guía para optimizar la distribución de autopartes dentro del perímetro urbano de la ciudad de Quito o DMQ. Para ello se tomó en

cuenta la complejidad del tráfico vehicular en dicha ciudad, debido a factores como el exceso de vehículos sobre la infraestructura vial del DMQ. Sobre todo en horas pico, el cumplimiento ordenanzas como el pico y placa, las políticas ambientales (Sánchez, 2013), y reglamentaciones en cuanto a pesos y dimensiones máximas permitidas (MTOP, 2012). También se hizo un breve análisis técnico a los vehículos de la flota, para determinar su consumo promedio de combustible y velocidad de circulación promedio en el perímetro urbano del DMQ, para ingresar esos datos como parámetros en el modelo. En la mayoría de casos se usó datos reales o muy cercanos a la realidad para poder ofrecer buenos resultados

En la mencionada empresa, las operaciones de distribución de las autopartes dentro del perímetro urbano del DMQ se realizaban con una flota de transporte propio, y era política de dicha empresa cumplir con todos los requerimientos y expectativas de servicio hacia sus clientes como: entregas dentro del tiempo acordado o promesa de entrega, horarios para la entrega de la mercadería o ventanas de tiempo, y la capacidad de carga de los vehículos era limitada. Sin embargo en dicha empresa la programación y diseño de las rutas para los vehículos se las realizaba de manera empírica por los mismos choferes de los vehículos de reparto.

Los antecedentes mencionados evidenciaban la necesidad de dicha empresa por contar con un sistema o método adecuado para programar y diseñar las rutas de su flota vehicular.

Es importante mencionar que para la realización del estudio propuesto no se contaba con los permisos para implementarlo en la empresa autopartista, por ello no se planeaba llegar a las etapas de implementación, solamente se llegó hasta las etapas de evaluación.

La problemática se solucionó mediante la implementación de un software para el adecuado ruteo de los vehículos de la empresa, con base en una metaheurística del algoritmo genético hibridándola con la heurística del vecino más cercano y programados con el lenguaje de programación C-Sharp.Net; Las direcciones de los clientes fueron extraídas de una base de datos reales dentro del perímetro urbano de la ciudad de Quito, y fueron convertidas a

coordenadas geográficas de latitud y longitud de los clientes con la ayuda del software Google-Earth para poder trabajar en un entorno computacional.

# TABLA DE CONTENIDO

|  | Página |
|--|--------|
| CAPÍTULO I .....   | 1      |
| 1. MARCO TEÓRICO .....   | 1      |
| 1.1. Heurística.....   | 1      |
| 1.2. El problema del vendedor viajero TSP .....                        | 3      |
| 1.3. Métodos para medir la calidad de un algoritmo .....               | 5      |
| 1.3.1. Comparación con la solución óptima .....                        | 5      |
| 1.3.2. Comparación con una cota .....                                  | 5      |
| 1.3.3. Comparación con un método exacto .....                          | 5      |
| 1.3.4. Comparación con otros métodos heurísticos .....                 | 6      |
| 1.3.5. Análisis del peor caso .....                                    | 6      |
| 1.4. Método heurístico constructivo del vecino más cercano.....        | 6      |
| 1.5. Algoritmos genéticos .....  | 8      |
| 1.5.1. Pseudocódigo del algoritmo genético.....                        | 15     |
| 1.5.2. Convergencia del algoritmo genético .....                       | 16     |
| 1.6. Cálculo de distancias geográficas .....                           | 16     |
| 1.6.1. Distancia euclidiana.....                                       | 17     |
| 1.6.2. Distancia manhattan.....  | 17     |
| 1.7. El problema del ruteo vehicular con ventanas de tiempos VRPTW .   | 18     |
| 1.7.1 consideraciones previas al modelo matemático del VRPTW .....     | 19     |
| 1.7.2 Modelo matemático del VRPTW.....                                 | 21     |
| CAPÍTULO II .....  | 25     |
| 2. MÉTODOS .....   | 25     |
| 2.1. Delimitación del área geográfica de estudio .....                 | 25     |
| 2.2. Descripción del tráfico vehicular en Quito y su problemática..... | 26     |
| 2.2.1. Velocidad de circulación vehicular en el DMQ.....               | 26     |

|  |    |
|--|----|
| 2.3. Ordenanzas y reglamentaciones vigentes sobre el transporte de mercancías en el DMQ .....  | 27 |
| 2.4. Políticas ambientales y de seguridad en el transporte de mercancías para el DMQ .....     | 28 |
| 2.5. Flota vehicular asignada a las operaciones de reparto.....                                | 30 |
| 2.6. Análisis de las especificaciones técnicas de la flota vehicular.....                      | 31 |
| 2.6.1. Desempeño de los vehículos de carga.....  | 32 |
| 2.6.2. Consumo de combustible del vehículo .....   | 33 |
| 2.7. Dimensiones y capacidades de los vehículos de reparto .....                               | 34 |
| 2.7.1. Capacidad de carga de los vehículos de reparto .....                                    | 34 |
| 2.7.2. Dimensiones de los camiones de carga .....  | 35 |
| 2.8. Tiempo de servicio a clientes .....   | 36 |
| 2.9. Geolocalización de los clientes.....  | 37 |
| 2.9.1. Clientes de la ruta norte .....   | 37 |
| 2.9.2. Clientes ruta de la ruta sur .....  | 38 |
| 2.10. Peso de las mercancías a distribuir .....  | 39 |
| 2.11. Ordenamiento de la carga .....   | 40 |
| 2.12. Ventanas de tiempo de los clientes .....   | 40 |
| CAPÍTULO III .....   | 43 |
| 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN .....   | 43 |
| 3.1. diseño del algoritmo genético .....   | 43 |
| 3.2. Arquitectura de la aplicación.....  | 49 |
| 3.3. Diagrama de la base de datos.....   | 52 |
| CAPÍTULO IV .....  | 55 |
| 4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS COMPUTACIONALES.....  | 55 |
| 4.1. Evaluación del algoritmo genético propuesto contra un modelo de programación entera ..... | 55 |
| 4.1.1. Resultados de la prueba.....  | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2. Evaluación del algoritmo genético propuesto contra ejemplos de distribución reales..... | 60 |
| 4.2.1. Resultados de las pruebas .....   | 62 |
| 4.3. Experimentos adicionales sobre la aplicación de algoritmos genéticos propuesta.....     | 67 |
| 4.3.1. Distribución por prioridades.....   | 69 |
| CAPÍTULO V.....  | 73 |
| 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....   | 73 |
| 5.1 Conclusiones .....   | 73 |
| 5.2 Recomendaciones.....   | 75 |
| BIBLIOGRAFÍA.....  | 78 |
| ANEXOS .....   | 83 |

## **CONTENIDO DE FIGURAS**

|  | Página |
|--|--------|
| Figura 1.1. Representación de la población en un algoritmo genético.....                     | 10     |
| Figura 1.2. Esquema general del algoritmo genético. ....                                     | 11     |
| Figura 1.3. Esquema del funcionamiento de un algoritmo genético básico [5].                  | 15     |
| Figura 2.1 Perímetro urbano del DMQ, y competencias territoriales del tránsito [9].....      | 25     |
| Figura 2.2 Velocidad promedio en la red vial principal del DMQ 2008 [13]. ....               | 26     |
| Figura 2.3 Rombo de seguridad para baterías de plomo-ácido [16] .....                        | 28     |
| Figura 2.4 Señalización de seguridad de la carga [17] .....                                  | 29     |
| Figura 2.5 Vehículos usados en las operaciones de distribución urbana.....                   | 31     |
| Figura 2.6 Curvas características del motor y de rendimiento de la flota vehicular [19]..... | 32     |
| Figura 2.7. Obtención de las coordenadas de los clientes.....                                | 37     |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.8. Geolocalización de clientes ruta norte .....  | 38 |
| Figura 2.9 Geolocalización de clientes ruta sur.....  | 39 |
| Figura 3.1. Arquitectura de la aplicación .....   | 49 |
| Figura 3.2. Asignación de clientes a la ruta .....  | 50 |
| Figura 3.3. Asignación de clientes a la ruta .....  | 51 |
| Figura 3.4. Asignación de parámetros del algoritmo genético. ....   | 51 |
| Figura 3.5. Asignación de parámetros del ruteo con ventanas de tiempo.....  | 52 |
| Figura 3.6. Diagrama de la base de datos .....  | 53 |
| Figura 4.1. Arcos del grafo dirigido y sus respectivas distancias en (mts) .....  | 57 |
| Figura 4.2. Resultado del modelo VRPTW de programación entera programado en GAMS.....   | 57 |
| Figura 4.3. Resultado del algoritmo genético para ruteo con ventanas de tiempo. ....  | 58 |
| Figura 4.4. Evaluación de la distancia total recorrida de las aplicaciones.....   | 59 |
| Figura 4.5. Evaluación del tiempo de ejecución de las aplicaciones.....   | 59 |
| Figura 4.6. Tiempos de ejecución de la metaheurística de ruteo con algoritmos genéticos aplicado a una mayor cantidad de nodos clientes. .... | 60 |
| Figura 4.7. Ruta real norte. ....   | 61 |
| Figura 4.8. Ruta real sur. ....   | 62 |
| Figura 4.9. Ruta propuesta con algoritmo genético para clientes ruta norte. ...   | 64 |
| Figura 4.10. Ruta propuesta con algoritmo genético para clientes ruta sur. ....   | 66 |
| Figura 4.11. Modificación del número de generaciones vs % de mejora en el ruteo de clientes.....  | 68 |
| Figura 4.12. Modificación del tamaño de población vs % de mejora en el ruteo de clientes.....   | 69 |

## CONTENIDO DE TABLAS

|  | Página |
|--|--------|
| Tabla 2.1 Especificaciones técnicas de interés de los vehículos de reparto [18].<br>.....                      | 31     |
| Tabla 2.2 Especificaciones del furgón de carga [21]......  | 34     |
| Tabla 2.3 Análisis de las dimensiones de los vehículos de reparto de acuerdo a la reglamentación vigente. .... | 36     |
| Tabla 2.4. Coordenadas de los clientes de la ruta norte. ....  | 38     |
| Tabla 2.5 Coordenadas de los clientes de la ruta sur .....   | 39     |
| Tabla 4.1 Grupo de clientes escogidos para prueba. ....  | 56     |
| Tabla 4.2 Resultados de la primera prueba con 6 nodos clientes.....  | 58     |
| Tabla 4.3 Resultados del ruteo para clientes ruta norte.....   | 64     |
| Tabla 4.4 Resultados del ruteo para clientes ruta sur. ....  | 67     |
| Tabla 4.5 Modificación del número de generaciones en el ruteo de clientes... ..                                | 67     |
| Tabla 4.6 Modificación del tamaño de población en el ruteo de clientes. ....                                   | 68     |
| Tabla 4.7 Clientes prioritarios de la ruta norte. ....   | 70     |
| Tabla 4.8 Clientes prioritarios de la ruta sur.....  | 70     |
| Tabla 4.9 Resultados del ruteo por prioridades para clientes ruta norte.....                                   | 71     |
| Tabla 4.9 Resultados del ruteo por prioridades para clientes ruta sur. ....                                    | 71     |

# GLOSARIO

## **Solapar**

Cubrir total o parcialmente un elemento con otro elemento.

## **Pseudocódigo**

Es un método frecuentemente usado en publicaciones científicas, libros y en la planificación del desarrollo de programas informáticos. Computacionalmente hablando es una descripción informal del principio operativo de un programa o un algoritmo, está diseñado para la fácil lectura y comprensión humana frente al código de programación, sin embargo el pseudocódigo no puede ser entendido por una computadora, ya que no incluye declaraciones de variables, código específico del sistema y algunas subrutinas.

## **Permutación aleatoria**

Si se parte de la base que una permutación es una variación de la disposición de los elementos de un conjunto, un método para generar una permutación aleatoria consiste en generar de manera sucesiva una permutación aleatoria de los elementos 1, 2, . . . , n comenzando con  $n = 1$ , luego  $n = 2$  y así sucesivamente. Una vez que se tiene la permutación de los  $n-1$  primeros elementos, para obtener la permutación aleatoria colocamos  $n$  en la posición final para obtener  $P_1, P_2, . . . , P_{n-1}, n$ ; e intercambiamos los elementos de la posición  $n$  con el elemento de una posición elegida al azar, donde la posición 1, posición 2, . . . , posición  $n$  sean igualmente probables.

## **Correspondencia biunívoca**

Se la llama también correspondencia de uno a uno, esta presenta cuando en dos conjuntos cada elemento del primer conjunto se corresponde con solo un elemento del segundo conjunto, y a su vez cada elemento del segundo conjunto se corresponde con solo un elemento del primer conjunto.

## **Coordenadas UTM**

Universal Transverse Mercator por sus siglas en inglés, es un sistema de coordenadas geográficas, en el cual el mundo está dividido en 60 zonas de igual tamaño (también llamadas "husos") de oeste a este, comenzando en el meridiano 180°. La posición se describe en kilómetros al este del principio de cada zona ("easting") y lejos del ecuador ("northing"). En el hemisferio Norte, el northing es la distancia al ecuador mientras que en el hemisferio sur es la distancia al Polo Sur. Para poder interpretar la posición globalmente, hay que saber en qué hemisferio y zona está localizado el punto de interés.

# ABREVIATURAS

## **JIT**

Just In Time por sus siglas en inglés, también se puede definir como la Programación de los suministros Justo A Tiempo o JAT. Es una filosofía popularizada por los japoneses para la programación de toda la cadena de suministros de materiales de manera que las operaciones o los clientes puedan contar con los materiales adecuados en el lugar adecuado y en el momento adecuado.

## **SCM**

Supply Chain Management por sus siglas en inglés o Administración de la Cadena de Suministro. “Es el manejo del producto y los flujos de servicio de la manera más eficiente y efectiva, incluyendo la integración y coordinación con otros miembros de los canales de flujo y con los proveedores del servicio para mejorar el desempeño de la cadena de suministros cuando sea practico hacerlo así” (Ballou, 2004).

## **DMQ**

Distrito Metropolitano de Quito. Es la jurisdicción comprendida por la capital del estado Ecuatoriano cuyo nombre es San Francisco de Quito y a sus localidades cercanas. El DMQ contiene a 32 parroquias urbanas y a 33 parroquias rurales y suburbanas.

## **BPP**

Bin Packing Problem por sus siglas en inglés o también llamado problema de la mochila, consiste en seleccionar la mayor cantidad de objetos a guardar en una mochila o contenedor sin que se exceda su capacidad. (Miguel et al, 2013)

## **MTOP**

Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Es la entidad ecuatoriana rectora del sistema nacional de transporte multimodal.

## **PBV**

Peso Bruto Vehicular por sus siglas: PBV o también conocido como Peso Bruto del Auto cuyas siglas son: PBA. Es el peso neto del vehículo más la capacidad de carga útil o de pasajeros, definida en kilogramos.

## **VRP**

Vehicle Routing Problem por sus siglas en inglés, también se lo puede definir como el Problema de Ruteo Vehicular. Su Objetivo es determinar las rutas óptimas para que una flota vehicular localizada inicialmente en uno o varios depósitos pueda atender toda la demanda de bienes o servicios de los clientes los cuales están dispersos geográficamente. Todos los clientes deberán ser visitados dentro de un periodo dado y usando una red vial existente.

## **CVRPTW**

Capacited Vehicle Routing Problem with Time Windows por sus siglas en inglés. Es una evolución del VRP que adicionalmente considera la limitación en capacidad de carga de la flota vehicular, CVRP o Capacitated Vehicle Routing Problem además incluye las restricciones de ventanas de tiempo dentro de las cuales los vehículos deben visitar a los clientes TW o Time Windows.

## **RPM**

Revoluciones Por Minuto. Es la velocidad angular a la que gira el cigüeñal del motor en un momento específico de su funcionamiento.

## **SKU**

Stock Keeping Unit por sus siglas en inglés, se puede interpretar como unidades de carga para temas de transportes de cargas, el proceso que las contiene es llamado unitarización de la carga, también se puede interpretar como la agrupación de uno o varios ítems que se movilizan como unidades indivisibles de carga, ejemplos comunes del proceso de unitarización de la carga son la paletización y la contenerización.

## **PL**

Programación Lineal básicamente consiste en resolver problemas modelándolos de forma que se maximice o minimice una función objetivo constituida por variables de decisión, los valores de dichas variables deben cumplir con ciertas restricciones formuladas a manera de ecuaciones o desigualdades, se debe también especificar las restricciones de signo para dichas variables (Winston, 2005).

## **PE**

Los problemas enteros son problemas de Programación Lineal en los cuales se requiere que alguna o todas las variables sean números enteros no negativos. (Winston, 2005).

## **Bit**

Es la abreviatura de dígito binario, representa al elemento de datos más pequeño que soporta o procesa una computadora, puede asumir valores de 1 o 0.

## **Byte**

Los bytes están compuestos de ocho bits, En C# los caracteres y sean estos dígitos, letras o símbolos están compuestos de dos bytes, según establece el conjunto de caracteres Unicode. De modo que cada carácter debe ser representador como patrón de 1 o 0 para que pueda ser procesado por una computadora



# **CAPÍTULO I**

## **1. MARCO TEÓRICO**

A continuación se hace un resumen de los fundamentos teóricos de optimización combinatoria que se utilizarán posteriormente para la realización del presente estudio.

### **1.1. HEURÍSTICA**

La palabra heurística proviene del término griego *Heuriskein*, el cual puede ser interpretado como: encontrar o descubrir algo, esta palabra ha tenido recientemente un auge en su utilización, debido a los recientes avances y desarrollos en el campo de la optimización combinatoria [1].

Podríamos definir a la optimización como el proceso de encontrar una mejor solución posible para un problema que se nos presente, estos problemas pueden ser representados matemáticamente como una función objetivo compuesta por variables de decisión a la cual se podría maximizar o minimizar de acuerdo al problema propuesto.

Es importante mencionar que actualmente se explota las capacidades computacionales para resolver problemas de optimización ya que esto nos permite realizar una mayor cantidad de cálculos paralelos de maximización o minimización de una función objetivo.

En optimización podemos encontrar problemas fáciles de resolver y problemas difíciles de resolver a los cuales se han denominado NP-hard ya que al tratar de resolver estos problemas tendrán tal grado de dificultad que no podríamos garantizar que se encuentre la mejor solución en un lapso moderado de tiempo incluso aprovechando al máximo las capacidades computacionales actuales, es por ello que las investigaciones en el campo de la investigación operativa han permitido desarrollar procedimientos eficientes que nos permitan encontrar “soluciones buenas” dentro de lapsos de tiempos moderados [1].

Dentro de la optimización podemos encontrar a los clásicos problemas de optimización combinatoria, los cuales son problemas que han sido estudiados ampliamente y exhaustivamente durante varios años sin embargo no se han logrado solucionar completamente hasta el momento, estos problemas están estructurados de la siguiente manera: Debemos encontrar el máximo o el mínimo de una función objetivo la cual puede tomar un conjunto finito de soluciones llamado  $S$ , para ello las variables de decisión deben ser discretas o contables, lo cual restringirá la cantidad de valores que pueda tomar la función objetivo, pese a eso siguen existiendo tantos valores que es difícil evaluar todas las posibles soluciones que pueda tomar la función objetivo para determinar la más óptima. Es ahí donde entran en escena los métodos heurísticos, ya que se especializan en brindar una “solución buena” de un problema en particular, en un tiempo moderado [1].

Entre los métodos heurísticos más conocidos tenemos a los métodos de descomposición, inductivos, de reducción, constructivos y de búsqueda local. Básicamente son los métodos con los cuales comenzó el desarrollo de la investigación operativa alrededor de los años setenta siendo probados y brindando buenos resultados en la última década [1].

Los dos últimos métodos nombrados son los que dieron paso a la creación de nuevos métodos más avanzados llamados “procedimientos metaheurísticos”, los cuales brindan mejores resultados que sus predecesores. Pero estos métodos no son lo último en el campo de la optimización combinatoria, ya que la combinación de los métodos metaheurísticos con algunos conceptos de la inteligencia artificial, la evolución biológica y la estadística ha creado nuevos “algoritmos híbridos”, de modo que si nos enfrentamos a un problema de optimización contamos con un abanico de opciones para diseñar un algoritmo que resuelva nuestro problema en particular [1].

Los métodos GRASP combinados con métodos Multi-Arranque dieron paso a los métodos de Búsqueda Tabú, el Templado Simulado, y a los métodos evolutivos comprendiendo a los Algoritmos Genéticos y a la Búsqueda

Dispersa. Todos estos métodos nombrados son considerados métodos metaheurísticos. [1].

Por lo anteriormente expuesto es importante medir la calidad del resultado arrojado por el método metaheurístico ya que no está garantizado que se logre encontrar la solución más óptima [1].

## **1.2. EL PROBLEMA DEL VENDEDOR VIAJERO TSP**

Es uno de los problemas más estudiados por la investigación operativa ya que fue uno de los primeros y es del tipo NP-hard o sea difícil de resolver, es por eso que se considera como una prueba obligatoria para validar cualquier nueva técnica para la resolución de problemas de programación lineal sobre todo con números enteros [1].

“Un vendedor necesita visitar  $n$  ciudades iniciando y finalizando en su ciudad de origen, si se conoce el costo de ir de una ciudad a otra, se busca determinar la ruta que debe seguir con el menor costo”.

Una de sus principales aplicaciones es la determinación de las rutas para vehículos lo cual lo hace aplicable en el presente estudio. Pero para tener un mejor concepto acerca de este problema primeramente veremos algunos conceptos matemáticos:

Sea un grafo  $G = (V, A, C)$  en donde  $V$  es el conjunto de Vértices,  $A$  es el conjunto de Aristas y  $C$  es la matriz de Costes en la cual  $c_{ij}$  es el coste o distancia de las aristas  $(i, j)$ .

Un camino es una sucesión de aristas de modo que el vértice final de cada arista coincide con el vértice inicial de la siguiente arista.

Se puede decir que un camino es simple si no utiliza el mismo vértice más de una vez.

Un ciclo es un camino en el cual se cumple que el vértice final del camino coincide con el vértice inicial del mismo.

Un subtour es un ciclo que no pasa por todos los vértices existentes en el grafo.

Se puede definir a un grafo como un conjunto de nodos unidos entre sí por aristas [2].

“Un tour o ciclo Hamiltoniano es un ciclo simple que pasa por todos los vértices del grafo” [1].

A continuación se presenta el modelo de programación lineal entera del problema del vendedor viajero, donde las variables de decisión binaria  $x_{ij}$  corresponden a 1 si el vendedor viaja de  $i$  a  $j$ , y 0 si no lo hace, la constante  $c_{ij}$  es el costo si se hace dicho viaje. Donde  $\partial(S)$  representa al conjunto de aristas que inciden con un vértice de  $S$  [3].

$$\text{MIN} \sum_{i < j} c_{ij} x_{ij}$$

El objetivo es tener un ciclo Hamiltoniano, para ello se busca eliminar los subtours mediante las siguientes restricciones:

s. a.:

$$\sum_{i < j} x_{ij} + \sum_{j < i} x_{ji} = 2, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{(i,j) \in \partial(S)} x_{ij} \geq 2, \quad \forall S \subseteq \{1, 2, \dots, n\} \quad 3 \leq |S| \leq [n/2]$$

Restricción binaria para la variable de decisión:

$$x_{ij} = 0, 1 \quad \forall i < j \quad [1].$$

Es importante mencionar que la cantidad posible de subitros se da en el orden de  $2^{n/2}$ , lo cual hace difícil resolver con un método exacto a este tipo de problemas, sobre todo si se trabaja con una gran cantidad de vértices, es ahí donde la heurística ofrece soluciones viables [1].

### **1.3. MÉTODOS PARA MEDIR LA CALIDAD DE UN ALGORITMO**

Un buen algoritmo debe ser realista en cuanto a las capacidades computacionales disponibles, que su solución se acerque al óptimo, y que tenga una baja probabilidad de arrojar una mala solución [1].

Para medir estas características se dispone de los siguientes métodos:

#### **1.3.1. COMPARACIÓN CON LA SOLUCIÓN ÓPTIMA**

Básicamente se mide la desviación porcentual entre la solución del algoritmo heurístico con el resultado de un método óptimo comprobado. Si denominamos  $Ch$  al costo computacional del algoritmo heurístico y  $C_{opt}$  al coste computacional de la solución óptima, la desviación porcentual vendría dada por la expresión:

$$\frac{Ch - C_{opt}}{C_{opt}} * 100 [1].$$

#### **1.3.2. COMPARACIÓN CON UNA COTA**

Se compara el valor de la solución proporcionada por el algoritmo heurístico con un valor deseado o cota que pueda tomar el problema, es decir con el valor más inferior buscado para problemas de minimización y análogamente para problemas de maximización. La calidad de este método radica en que tan cerca se encuentre este valor del óptimo. Este método se aplica cuando un método óptimo no esté disponible [1].

#### **1.3.3. COMPARACIÓN CON UN MÉTODO EXACTO**

En problemas grandes se puede establecer límites al tiempo máximo de ejecución de un método exacto, también se puede determinar un valor  $c$  entre la cota superior global y la cota inferior o igual que se produzca al saturar un

nodo en problemas de maximización, análogamente en problemas de minimización. El objetivo es asegurar que la solución proporcionada por el procedimiento no diste más de ese valor  $c$  con respecto al óptimo del problema. En ambos casos obtendremos un valor o cota con el cual comparar el resultado del algoritmo heurístico evaluado [1].

#### **1.3.4.COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS HEURÍSTICOS**

Se aplica mayormente a problemas difíciles NP-hard, consiste en comparar la solución frente a la solución de otros algoritmos heurísticos, sin embargo el resultado de esta prueba dependerá de que tan bueno sea dicho procedimiento usado como referencia [1].

#### **1.3.5.ANÁLISIS DEL PEOR CASO**

Consiste en analizar los ejemplos más desfavorables para el algoritmo y medir su desviación con respecto al óptimo, pero dichos resultados no suelen representar el comportamiento medio del algoritmo. Existen algoritmos que producen soluciones que no se alejan más de un porcentaje  $\varepsilon$  del óptimo en cualquier ejemplo y se los llama “Algoritmos  $\varepsilon$ -aproximados”, en ellos, si es un problema de minimización se tiene que cumplir:

$$\text{Para un } \varepsilon > 0 \text{ que: } Ch \leq (1 + \varepsilon) Copt \text{ [1].}$$

#### **1.4. MÉTODO HEURÍSTICO CONSTRUCTIVO DEL VECINO MÁS CERCANO**

Básicamente los métodos constructivos en cada iteración o paso añaden el elemento con mejor evaluación hasta completar una solución. El método heurístico del vecino más cercano es uno de los más sencillos para la solución del TSP ya que este trata de construir un ciclo Hamiltoniano de bajo coste o

distancia basándose en un vértice más cercano a un vértice dado. Su pseudocódigo se puede representar de la siguiente forma:

*“Iniciación*

*Seleccionar un vértice al azar.*

*Hacer  $t = j$  y  $W = V \setminus \{j\}$ .*

*Mientras ( $W \neq \emptyset$ )*

*Tomar  $j \in W / ct_j = \min\{ct_i / i \in W\}$*

*Conectar  $t$  a  $j$*

*Hacer  $W = W \setminus \{j\}$  y  $t = j$ ” [1].*

En este procedimiento el número de operaciones realizadas es  $O(n^2)$ . Si lo analizamos paso a paso se puede notar que comienza seleccionando las aristas de más bajo costo, sin embargo en las etapas finales del proceso quedarán vértices que conectan a las aristas de elevado coste lo cual se denomina como “miopía del procedimiento”. Entonces para reducirla y aumentar la velocidad del procedimiento se puede realizar algunas mejoras [1].

Una de las mejoras sugeridas a este procedimiento es la creación de un subgrafo comprendido por los  $k$  vecinos más cercanos y únicamente las aristas que lo unen con los  $k$  vértices más cercanos para formar un ciclo Hamiltoniano de bajo costo [1].

Otra mejora al procedimiento consiste en el modo de seleccionar el vértice  $j$  que se va a unir a  $t$  y por ende al tour parcial construido, ya que en lugar de examinar todos los vértices, se sugiere únicamente examinar los adyacentes a  $t$  en el subgrafo candidato [1].

“Cada vez que un vértice sea conectado al tour en construcción se sugiere también eliminar del subgrafo candidato las aristas incidentes en él” [1].

También se sugiere reinsertar los vértices que están quedando aislados, es decir: “si se considera un número  $s < k$ , cada vez que un vértice que no está en el tour se encuentre conectado solamente a  $s$  o menos aristas del subgrafo,

se puede decir que está siendo aislado, entonces se debe volverlo a insertar en el tour. Y el punto de inserción de dicho vértice será en el mejor de entre los  $k$  vértices más cercanos presentes en el tour” [1].

## **1.5. ALGORITMOS GENÉTICOS**

Son procedimientos metaheurísticos cuyo principio de funcionamiento está inspirado en la evolución de los seres vivos, dado que para sobrevivir en ambientes hostiles los individuos deben adquirir nuevas habilidades, las cuales serán transmitidas a las nuevas generaciones a nivel genético, más específicamente en sus cromosomas, creando así “mejores individuos”, adicionalmente este ciclo se cumple siempre y cuando los individuos más aptos se reproduzcan más frecuentemente que los otros, lo cual también se conoce como “selección natural” [1].

El proceso de formación del cromosoma del hijo no tiene memoria ya que solamente considera la información de sus progenitores, o sea de sus padres.

Se denomina recombinación al proceso al cruzamiento o reproducción de dos individuos ya que aquí se combinan los cromosomas de los progenitores para dar lugar al cromosoma del hijo, sin embargo también en ese punto se puede producir mutaciones que son alteraciones en la combinación cromosómica [1].

Básicamente los algoritmos genéticos establecen una relación entre las posibles soluciones de un problema y los individuos de una población natural codificando la información de cada solución en un vector binario al cual anteriormente llamamos cromosoma, para ello es necesario incluir algún mecanismo de selección de modo que los cromosomas con mayor “fitness” se reproduzcan más frecuentemente que otros.

Para la creación de un algoritmo genético es necesario establecer los siguientes puntos:

- i. **Representación cromosómica:** Puede hacerse mediante vectores binarios o cadenas de números entre 0 y 1, por ejemplo

(01000100001000100010) para un TSP sobre 5 ciudades y 20 aristas, la segunda opción es usar una configuración libre, por ejemplo (2,3,1,5,4) para el mismo TSP. Dentro del presente estudio se usará la segunda, dado que bajo dicha representación las rutas pueden entenderse más fácilmente y permite definir las operaciones posteriores de forma más estable [1] [4].

- ii. **La población inicial** se puede generar aleatoriamente o mediante la utilización de un método heurístico, sin embargo es necesario poseer una diversidad de tipos de individuos que representen a la mayor parte de la población para evitar caer en un óptimo local desde el principio [1].

Según lo descrito por Félix Carretero el 2010; Una diversidad de individuos de la población aceptable (también conocida como diversidad genética de la población), busca que los "buenos" individuos soluciones estén distribuidos por todo el espacio de búsqueda para así evitar que los individuos soluciones proporcionados por los algoritmos genéticos converjan en óptimos locales, y de ese modo se logre explorar todo el espacio de búsqueda, lo cual ha sido objeto de extensos estudios

Es importante mencionar que dentro de los métodos evolutivos a los cuales pertenecen los algoritmos genéticos, los operadores de variación: como el cruce sexual y mutación, en términos generales crean diversidad genética en la población, mientras que los operadores de selección elitista (los cuales escogen solo a los individuos más aptos) reducen dicha diversidad.

El problema de convergencia prematura en óptimos locales de un algoritmo genético por efecto de individuos más aptos que se reproducen tan abundantemente provocando que merme la diversidad de la población, es un problema común en poblaciones pequeñas de individuos. En dichos casos los investigadores han implementado diferentes métodos que controlan la fuerza

selectiva, de modo que no se daría tanta ventaja a los individuos más aptos, estos métodos son la selección escalada, por rango y por torneo.

Golberg y Richardson en 1987 introdujeron la idea de especies de organismos en el diseño de algoritmos genéticos creando el **método de fitness sharing** en la cual se modificaba la función objetivo de cada individuo de modo que los individuos más cercanos entre sí devalúen el valor de su función objetivo y por lo tanto se reduce su probabilidad de ser seleccionados como padres, con lo cual se aumentarían las posibilidades de los individuos más aislados para ser elegidos como padres

Los **métodos de selección de progenitores por scaling** se basan en la selección de los padres con una probabilidad proporcional a su valor de fitness, sin embargo también se encargan de suavizar las diferencias entre los valores de fitness cuando están muy próximos entre sí y cuando dichos valores están muy alejados, favoreciendo a los individuos más débiles cuando la presión selectiva sea alta, favoreciendo la exploración del espacio de búsqueda y de ese modo conservar la diversidad genética de la población en mayor medida.

Los mencionados métodos fitness sharing y scaling son los de mayor uso cuando se desea preservar la diversidad genética de la población, pero también existen otros métodos como: Crowding, Restarting, Restricted mating, e Isolation by distance.

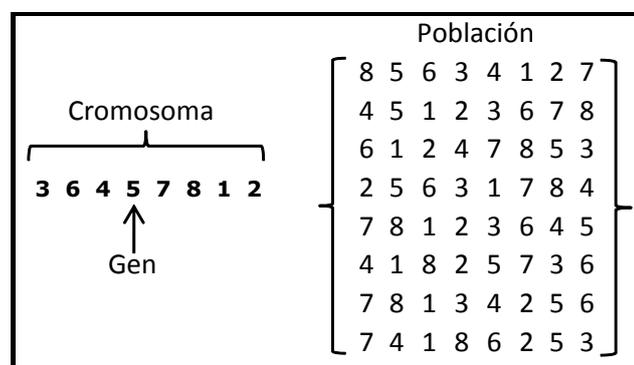


Figura 1.1. Representación de la población en un algoritmo genético.

Una vez obtenida la población inicial se inicia un **proceso evolutivo** (ver figura a continuación), en el cual cada vez se crean individuos “*más aptos*” en las nuevas generaciones a través de los operadores genéticos hasta obtener una media de aptitud deseada en ellos o hasta que se alcance una cantidad predefinida de generaciones.

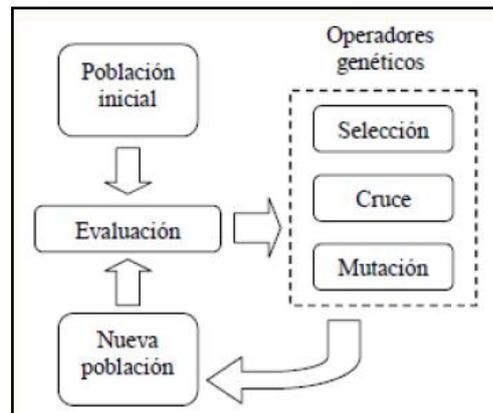


Figura 1.2. Esquema general del algoritmo genético.

- iii. **Evaluar la calidad de los cromosomas o aptitud**, dentro de este criterio se considera que a mayor aptitud, mejor la solución y mayor la probabilidad de que el cromosoma sobreviva y transmita sus características a su descendencia, para ello se utiliza la función llamada “calidad o fitness” la cual hace cumplir lo establecido en la función objetivo del problema, adicionalmente se puede agregar un factor de penalización para controlar la infactibilidad del valor de la función objetivo del cromosoma evaluado; es decir:

$$\text{Calidad} = \text{Valor Objetivo Normalizado} - \text{Penalización} * \text{Medida Infactibilidad} [1]$$

Otro enfoque de gran utilización para evaluar la calidad de los cromosomas es la penalización de la función objetivo consiste en dividir la misma para una cantidad llamada penalización, la cual representa la cantidad de restricciones que el individuo creado ha violado, incluso en la penalización se puede incluir el costo de reconstruir el individuo hacia otro que no viole ninguna restricción [4].

- iv. **La selección de los padres** puede realizarse mediante selección por torneo, ya que es uno de los procedimientos más utilizados, y consiste en escoger al azar un grupo de individuos de la población además se debe definir el tamaño del torneo y si luego de dicho torneo se hará o no un reemplazamiento de los individuos, es decir se debe formar un grupo de individuos cuyos integrantes se enfrentarán en un torneo para ver cuál de ellos es el mejor cumpliendo con la función objetivo, y se sigue realizando torneos hasta que el número de individuos seleccionados sea el mismo que el tamaño de la población, el tamaño de individuos en torneo puede ser de dos en dos sin embargo en ese caso será necesario utilizar una versión probabilística que permita que incluso los individuos “de mala calidad” sean elegidos, pese a ello dicho tamaño de individuos en torneo puede ser mayor.

**Pseudocódigo de la selección por torneo:**

1. Escoger tamaño de torneo  $q$  (generalmente  $q=2$ ).
2. Crear una permutación aleatoria de  $M$  enteros.
3. Comparar la adaptación de los individuos puestos en torneo y seleccionar entre ellos al mejor.
4. Si se acaba la permutación, generar una nueva permutación.
5. Repetir hasta que el número de individuos seleccionados sea el mismo que el tamaño de la población.

Es importante mencionar que los métodos de selección se denominan *dinámicos* si las probabilidades de selección varían de generación en generación, y *constantes* si las probabilidades de selección permanecen constantes, y adicionalmente se los puede llamar *métodos preservativos* si se logra asegurar que todos los individuos puedan ser seleccionados al menos una vez, mientras que si esto no se cumple se denominan *métodos extintivos* [4].

- v. **Las operaciones de cruzamiento** pueden hacerse mediante el llamado **operador de cruce basado en una correspondencia parcial (PMX)**, el cual consiste en seleccionar con probabilidad uniforme dos puntos de cortes en la ristra de uno de los padres y de manera similar con una parte de igual tamaño en la ristra del otro padre creándose una correspondencia biunívoca o correspondencia de uno a uno entre los puntos estas subristras de igual tamaño formadas, a continuación se procede a rellenar intercambiando los sobrantes de las ristas de ambos padres sin repetir puntos en la subristra que se va formado, si se da ese caso se debe tener en cuenta las correspondencias previamente formadas [4]. Por ejemplo, si tenemos los padres:

Padre 1: (1 2 3 4 5 6 7 8) y

Padre 2: (3 7 5 1 6 8 2 4)

En el primer paso se crean con probabilidad uniforme dos puntos de corte:

(1 2 3 | 4 5 6 | 7 8)

(3 7 5 | 1 6 8 | 2 4)

Luego se intercambian las posiciones de estas subristras y se forman las relaciones de correspondencia biunívocas con los puntos comprendidos dentro de las subristras formadas, o sea 4 con 1, 5 con 6 y 6 con 8.

Descendiente 1: (x x x | 1 6 8 | x x)

Descendiente 2: (x x x | 4 5 6 | x x)

A continuación se procede a rellenar las subristras de cada descendiente copiando los elementos de su padre original siempre y cuando no se repitan un punto en la subristra formada, caso contrario debemos consultar las correspondencias biunívocas formadas en el paso anterior que se va formando. Por ejemplo, en el caso del primer descendiente en su primera posición de la subristra deberíamos copiar el uno que es el primer punto del Padre 1, pero

como el 1 ya está contenido en su subristra, deberemos buscar una correspondencia del punto 1 resultando que es el 4, el segundo, tercero y séptimo elemento de la subristra que va formándose se copian directamente ya que no están en la subristra heredada inicialmente, y el octavo elemento no puede ser un 8 ya que ese punto ya consta en la subristra heredada, entonces se verifica las correspondencias del punto 8, recordando que el 8 tiene correspondencia con el 6, pero el 6 tampoco puede ser copiado ya que ya consta en la subristra formada, entonces recordamos que el 6 tiene correspondencia con el 5 y ese punto si puede ser copiado en nuestra ristra formada ya que no constaba previamente. Quedándonos el siguiente descendiente:

Descendiente 1: (4 2 3| 1 6 8|7 5)

Se procede de forma análoga para el otro descendiente:

Descendiente 2: (3 7 8|4 5 6|2 1) [4].

- vi. **Las operaciones de mutación** pueden hacerse mediante el operador de mutación basado en inversión simple (SIM) en el cual se escoge aleatoriamente un punto de la gira para quitarla de su posición original e insertarla en otro lugar seleccionado al azar [4]. Por ejemplo:

Se tiene inicialmente la ristra representante de una gira:

(1 2 3 4 5 6 7 8)

A continuación se selecciona aleatoriamente el punto 4 y se colocara aleatoriamente luego del punto 7, quedando como resultado la siguiente ristra o gira:

(1 2 3 5 6 7 4 8) [4].

A continuación se presenta un esquema del funcionamiento de un Algoritmo Genético básico con sus operaciones de i: **Inicialización**,  $f(X)$ : **Evaluación**,

?: **Condición de término**, Se: **Selección**, Cr: **Cruzamiento**, Mu: **Mutación**, Re: **Reemplazo**, X\*: **Mejor Solución** [5].

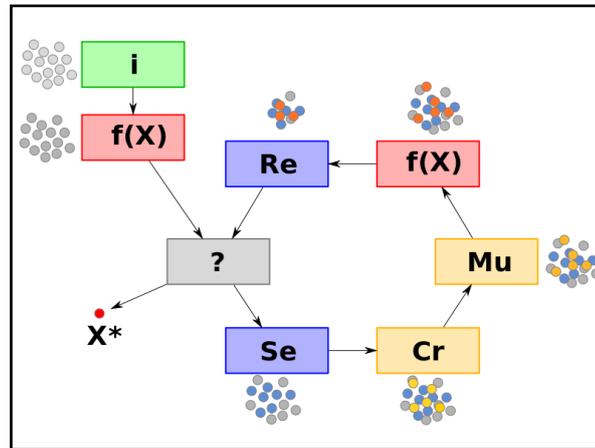


Figura 1.3. Esquema del funcionamiento de un algoritmo genético básico [5].

### 1.5.1. PSEUDOCÓDIGO DEL ALGORITMO GENÉTICO

A continuación se presenta el pseudocódigo del Algoritmo Genético propuesto por Michalewicz [6]:

“

1. **Generar soluciones:** Consiste en construir un conjunto de soluciones  $P$  con tamaño  $PopSize$  mediante generación aleatoria.
2. **Mejorar las soluciones:** Se debe Aplicar un método de búsqueda local a cada solución del conjunto  $P$ . (como por ejemplo el método heurístico del vecino más cercano).

Mientras (número de evaluaciones  $< MaxEval$ )

3. **Evaluación:** En este paso se evalúan las soluciones que comprenden el conjunto  $P$  y se actualiza dicho conjunto en caso de ser necesario, almacenando la mejor solución.
4. **Supervivencia:** Se debe calcular la probabilidad de supervivencia basándose en la calidad de las soluciones. Según esas probabilidades seleccionar aleatoriamente  $PopSize$  soluciones (con reemplazamiento) de  $P$ . De ese modo se crea el nuevo conjunto  $P$  formado por las soluciones seleccionadas (algunas pueden aparecer repetidas).

5. **Combinación:** *Primeramente se debe seleccionar una fracción  $p_c$  de soluciones del conjunto  $P$  para ser combinadas. La selección es aleatoria y equi-probable para todos los elementos de  $P$ . Luego dichos elementos seleccionados se emparejan al azar y, por cada pareja formada se generan dos descendientes que reemplazaran a los padres en  $P$ .*
6. **Mutación:** *Se selecciona un subconjunto  $p_m$  del conjunto de soluciones  $P$  para aplicar el operador de mutación. La solución resultante reemplaza a la original en  $P$ " [6].*

### **1.5.2. CONVERGENCIA DEL ALGORITMO GENÉTICO**

Los algoritmos genéticos operan con una determinada población en cada iteración o paso, pero al final del proceso debemos quedarnos con una población muy similar la cual se reducirá a un solo individuo en el conjunto solución, de modo que en una población de  $m$  vectores binarios se están procesando paralelamente  $O(m^3)$  [1].

En caso de vectores no binarios se exige que al cruzar dos vectores de la misma clase se obtenga un hijo de su misma clase que sus padres, con lo cual quedaría probada la convergencia del algoritmo. Sin embargo existen ocasiones en las cuales los Algoritmos genéticos se quedan muy alejados del óptimo global, entonces se evidencia la importancia de la evaluación final del resultado con los métodos anteriormente mencionados [1].

### **1.6. CÁLCULO DE DISTANCIAS GEOGRÁFICAS**

El cálculo de la distancia desde la base o centro de distribución hacia cada uno de los clientes  $d(ij)$  constituye una parte fundamental de los modelos de asignación-localización, partiendo de las coordenadas absolutas sobre el espacio geográfico  $XY$  se pueden obtener dichas distancias o también llamadas métricas, si se desea expresar estas métricas como función matemática se deben cumplir las siguientes condiciones [7]:

- i. Positividad: ( $d_{ij} \geq 0$ )
- ii. Identidad: Si  $d_{ij} = 0$ , entonces ambos puntos se ubican en el mismo lugar del espacio.
- iii. Simetría: ( $d_{ij} = d_{ji}$ ).
- iv. Desigualdad Triangular: ( $d_{ij} \leq d_{ik} + d_{kj}$ ).

A partir de estos conceptos se considerarán dos tipos de métricas:

### **1.6.1. DISTANCIA EUCLIDIANA**

Es básicamente la distancia en línea recta desde la base hacia los clientes [7], su desventaja es que no considera las restricciones de la infraestructura vial existente y no existen restricciones para transitar en cualquier sentido, por ello es que se usa frecuentemente en ruteo de barcos a aviones, y en transporte terrestre si la geografía lo permite, esta distancia puede calcularse mediante la fórmula pitagórica del cálculo de la hipotenusa de un triángulo:

$$d_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} [7].$$

### **1.6.2. DISTANCIA MANHATTAN**

Asume el desplazamiento del vehículo a través de una cuadrícula rectangular [7], lo cual es más adecuado para medir la distancia dentro de una infraestructura vial del tipo urbano, por ello es muy utilizada en problemas de transporte terrestre-urbano, esta distancia puede calcularse mediante la fórmula de la suma de las unidades de medida para ambos catetos:

$$d_{ij} = |X_i - X_j| + |Y_i - Y_j| [7].$$

## **1.7. EL PROBLEMA DEL RUTEO VEHICULAR CON VENTANAS DE TIEMPOS VRPTW**

El problema del ruteo vehicular o VRP es uno de los problemas más estudiados en optimización combinatoria de modo que para su tratamiento existen técnicas exactas y heurísticas cuyas ventajas y desventajas ya tratamos anteriormente, el VRP es resultante de la intersección de problema del agente viajero TSP y el problema del Bin Packing Problem BPP [8].

### **Enunciado del problema:**

“Encontrar un conjunto de rutas factibles de modo que, cada uno de los clientes sea atendido por una sola ruta y dentro de su respectiva ventana de tiempo, Y sobre todo que el costo acumulado de las rutas sea el menor posible”[8].

Para que una ruta sea factible deberá ser una red vial existente, la cual se transformará en un grafo completo en el cual entre cada par de vértices  $i$  y  $j$  se define un arco asociado a su distancia  $c_{ij}$ , del mismo modo también se puede asociar en el tiempo de viaje  $t_{ij}$ .

Los objetivos principales del problema de ruteo vehicular (VRP) son:

- Minimizar los costos totales de transporte mediante la reducción de la distancia total recorrida o tiempos de viaje y minimización de los costos fijos por el uso de los vehículos.
- Minimizar el número total de vehículos usados para atender a todos los clientes.
- Balanceo o asignación equitativa de rutas asignadas a vehículos para el tiempo de viaje y la carga del vehículo.
- Minimizar las penalizaciones por el cumplimiento parcial de las entregas a clientes, o aumentar el nivel de servicio hacia los clientes [8].

## **Ventanas de tiempo en el VRPTW**

Las ventanas de tiempo duras especifican al modelo que cada cliente debe ser obligatoriamente visitado en el intervalo de tiempo previamente especificado.

Las ventanas de tiempos suaves al igual que las anteriores especifican un tiempo en el cual el cliente debería ser visitado y una función de penalización para los casos en que el vehículo se adelante o retrase en la visita, estas penalizaciones deben estar acorde a la función objetivo [8].

### **1.7.1 CONSIDERACIONES PREVIAS AL MODELO MATEMÁTICO DEL VRPTW**

#### **Datos de entrada:**

Partimos asumiendo un escenario de múltiples depósitos.

Sea un *grafo dirigido*  $D = (U \cup V, A)$  con:

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  (depósitos)

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  (clientes)

$A = \{(w_i, w_j): w_i, w_j \in U \cup V, w_i \in V \vee w_j \in V\}$  (arcos entre  $i$  y  $j$ )

Los nodos en  $U$  representan depósitos con capacidades  $\kappa_1, \dots, \kappa_m$ . En donde  $k$  representan a los vehículos de la flota vehicular.

- Cada depósito  $u \in U$  contiene una flota homogénea de vehículos, cuyos costos (tiempos) de desplazamiento están dados por un vector  $c^u \in \mathbb{R}^{V \times V}$ .
- Los nodos en  $V$  representan clientes y tienen asociados tiempos de servicio  $\delta_v, \forall v \in V$ .
- Por cada cliente  $v \in V$  está asociada una ventana de tiempo  $[a_v, b_v]$  en la cual la visita a  $v$  debe empezar.

- La suma de los arcos entre  $i$  y  $j$  representan una gira completa  $W$ ,  $w \in W$ ,  $\wedge W \subset A$ .

**Formalización:**

**Costos de desplazamientos modificados**

$$\tilde{c}_{w\bar{w}}^u = \begin{cases} c_{w\bar{w}}^u + \delta_{\bar{w}} & \text{si } \bar{w} \in V \\ c_{w\bar{w}}^u & \text{caso contrario} \end{cases}$$

**Compatibilidad entre nodos clientes**

$$\exists u \in U: av + \tilde{c}_{w\bar{w}}^u \leq b\bar{v}.$$

$(v, \bar{v})$  es un par ordenado de clientes compatibles si algún vehículo puede visitar  $\bar{v}$  inmediatamente después de  $v$ .

**Tipos de arcos:**

Consideraremos los siguientes tipos de arcos:

$$\text{Salida: } A_S = \{(u, v): u \in U, v \in V\}$$

$$\text{Retorno: } A_R = \{(v, u): u \in U, v \in V\}$$

$$\text{Conexión: } A_C = \{(v, \bar{v}): v, \bar{v} \in V, (v, \bar{v}) \text{ su conexión es compatible}\}$$

**Rutas:**

$$r = (u, \bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_k, u); \text{ con } \bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_k \in V$$

Una ruta  $r$  es un circuito cerrado dirigido que contiene exactamente un nodo de  $u \in U$ .

**Rutas factibles:**

Se establece que una ruta es factible si cada nodo cliente se visita dentro de su respectiva ventana de tiempo:

$$a\bar{v}_j \leq \tilde{c}_{uv_1}^u + \sum_{s=1}^{j-1} \tilde{c}_{\bar{v}_s \bar{v}_s + 1}^u \leq b\bar{v}_j, \quad \forall j = 1, \dots, k.$$

**Costo o duración de las rutas:**

$$c(r) = \tilde{c}_{u\bar{v}_1}^u + \sum_{s=1}^{k-1} \tilde{c}_{\bar{v}_s \bar{v}_s + 1}^u + \tilde{c}_{\bar{v}_k}^u$$

**Variables de decisión:**

$$x_{w\bar{w}}^u = \begin{cases} 1, & \text{si } (w, \bar{w}) \text{ es usado en alguna de las rutas de } u \in U \\ 0, & \text{caso contrario.} \end{cases}$$

**Tiempos de visita a los clientes:**

$\forall v \in V: T_v \in \mathfrak{R}$ : se define una variable  $T_v$  que representa el tiempo en el cual el cliente  $v$  es visitado [8].

### 1.7.2 MODELO MATEMÁTICO DEL VRPTW

A continuación se explica brevemente un modelo matemático para la solución del VRP estudiando dentro de la materia de modelización avanzada [8]:

**Función objetivo:**

$$MIN \sum_{u \in U} \sum_{(w, \bar{w}) \in A} \tilde{c}_{w\bar{w}}^u x_{w\bar{w}}^u$$

El objetivo es minimizar el costo total de desplazamiento hacia todos los nodos clientes asignados a cada ruta.

**Restricciones:**

$$\sum_{u \in U} \sum_{(v,w) \in A} x_{vw}^u = 1, \quad \forall v \in V \quad (1)$$

Se asigna solamente una ruta para cada cliente.

$$\sum_{(v,w) \in A} x_{vw}^u = \sum_{(v,w) \in A} x_{vw}^u, \quad \forall v \in V, \forall u \in U \quad (2)$$

Todo lo que ingresa de un arco hacia cliente es igual a todo lo que sale de cliente hacia un arco, o conocido como “conservación de flujo”.

$$\sum_{(v,\bar{v}) \in W} x_{v\bar{v}}^u \leq |W| - 1, \quad \forall W \subseteq V, \quad \forall u \in U \quad (3)$$

Restricción de subtours: no pueden existir giras completas que no pasen por todos los clientes.

$$\sum_{(u,v) \in A} x_{uv}^{\tilde{u}} + \sum_{(v,u) \in A} x_{uv}^{\tilde{u}} \leq 0, \quad \forall u, \tilde{u} \in U, u \neq \tilde{u} \quad (4)$$

Para cada tour dirigido (viajando desde un depósito  $u$  hacia un cliente  $v$ ), partiendo originalmente desde un depósito  $\tilde{u}$ , al finalizar dicho tour se debe regresar al mismo depósito  $\tilde{u}$ .

$$\sum_{(u,v) \in A} x_{uv}^u \leq k_u, \quad \forall u \in U \quad (5)$$

El número de vehículos que salen desde un depósito  $u$  hacia un cliente  $v$  no debe ser mayor que la capacidad en número de vehículos soportados por dicho depósito  $u$ .

$$a_v \leq T_v \leq b_v, \quad \forall v \in V \quad (6)$$

Se ingresa un tiempo que transcurre desde la salida del vehículo del depósito hasta la visita al cliente  $T_v$  dentro de la ventana de tiempo de dicho cliente:  $[a_v, b_v]$  la cual debe ser respetada (Ventana de tiempo dura).

$$x_{v\bar{v}}^u (T_v + \tilde{c}_{v\bar{v}}^u - T_{\bar{v}}) = 0, \quad \forall (v, \bar{v}) \in A_c, \forall u \in U \quad (7)$$

Enlazar los tiempos de llegada de clientes compatibles  $(v\bar{v})$ , además elimina los subtours, esto quiere decir que el tiempo de llegada al siguiente nodo  $(T_{\bar{v}})$ , debe ser un tiempo mayor o igual al tiempo en el nodo predecesor  $(T_v)$  + el

arco predecesor traducido en tiempo  $\tilde{c}_{v\bar{v}}^u$ , esto ocurre si el vehículo  $k$  viaja de  $v$  hasta  $\bar{v}$ .

$$x_{uv}^u (\tilde{c}_{uv}^u - T_v) = 0, \forall (u, v) \in A_S, \forall u \in U \quad (8)$$

Si el cliente es visitado dentro de su ventana de tiempo la ruta es factible o sea existe una conexión entre el nodo o deposito  $u$  y cliente  $v$  ( $x_{uv}^u = 1$ ). En ese caso el arco predecesor traducido en tiempo  $\tilde{c}_{uv}^u$  debe ser igual al  $T_v$  (tiempo que se demora un vehículo en llegar hasta el cliente  $v$ ).

$$x_{w\bar{w}}^u \in \{0,1\}, \forall u \in U, \forall w, \bar{w} \in V \quad (9)$$

Asignación de un arco  $\bar{w}$  de un nodo compatible a la ruta; en el caso de que si se asigne a la ruta:  $x_{w\bar{w}}^u = 1$ , y cuando no se asigne a la ruta:  $x_{w\bar{w}}^u = 0$ .

$$T_v \in \mathfrak{R}, \forall v \in V \quad (10)$$

El valor del tiempo en el que el cliente es visitado por el vehículo debe pertenecer a los números reales [8].



## **CAPÍTULO II**

### **2. MÉTODOS**

#### **2.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO**

En el presente estudio se tomó en cuenta únicamente a los clientes localizados dentro del perímetro urbano del Distrito Metropolitano de Quito o DMQ, dicho perímetro se encontraba bajo el control de la Agencia Metropolitana de Tránsito AMT, por lo tanto se debía cumplir con sus leyes y ordenanzas al realizar las operaciones de distribución urbana. Ver Figura a continuación.

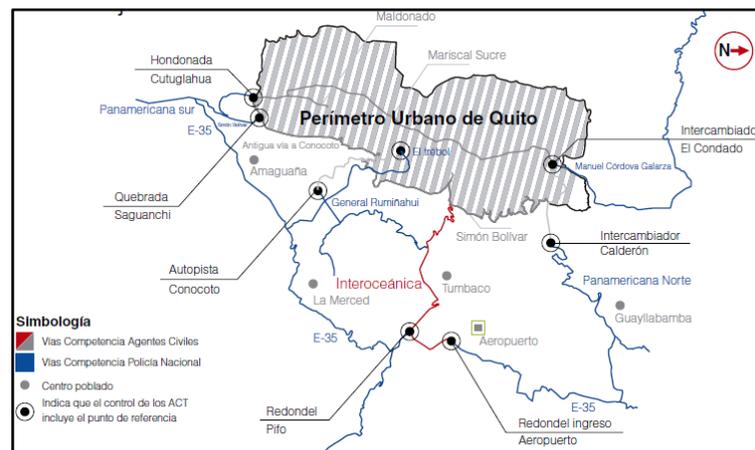


Figura 2.1 Perímetro urbano del DMQ, y competencias territoriales del tránsito [9]

El sector suburbano de San Antonio de Pichincha comprende también la mitad del mundo, Calacalí y Pomásqui [10]. Dicho sector suburbano no fue tomado en cuenta dentro del presente estudio, ya que la empresa tenía asignada una camioneta que distribuía de manera periódica los pedidos especiales en dicho sector. El mencionado vehículo trabajaba con una calendarización independiente, definida por los mismos clientes a los cuales atendía bajo la filosofía JITo just in time por sus siglas en inglés [11].

Tampoco se tomó en cuenta el sector suburbano de Guayllabamba, ya que la distribución de productos en dicha área se realizaba con transporte subcontratado.

## **2.2. DESCRIPCIÓN DEL TRÁFICO VEHICULAR EN QUITO Y SU PROBLEMÁTICA**

Los altos niveles de congestión en Quito fueron causados por el excesivo número de vehículos sobre su infraestructura vial y las deficiencias en las vías de acceso a la ciudad. Los cuales generaron la disminución de la velocidad de circulación y aumento de los tiempos de traslados de los habitantes sobretodo dentro del perímetro urbano del DMQ. Reduciendo la calidad de vida de sus habitantes, produciendo pérdidas de tiempo, económicas y consecuentemente la disminución de su capacidad productiva [12].

### **2.2.1. VELOCIDAD DE CIRCULACIÓN VEHICULAR EN EL DMQ**

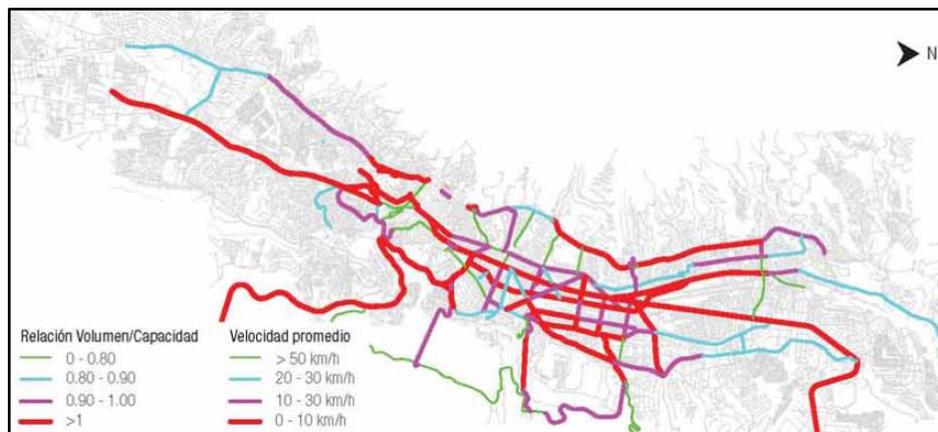


Figura 2.2 Velocidad promedio en la red vial principal del DMQ 2008 [13].

Es importante mencionar el acelerado crecimiento que fue experimentando el parque automotor del DMQ en número de autos por cada 1000 habitantes, pasando de 131 en el año 1998 hasta 192 en el año 2014. De ello se pudo

evidenciar un incremento en el poder adquisitivo de los habitantes, pero también produjo que la velocidad promedio a la que estos vehículos se trasladaban se reduzca de 19,7 km/h en el año 2008 a **14,1 km/h en el año 2014**, y por lo tanto también se incrementaron los tiempos de duración de los traslados de dichos habitantes [12].

La Ordenanza municipal de reglamentación para la circulación de vehículos de transporte de carga y transporte de productos químicos peligrosos en el DMQ [14], en su artículo 5 establecía que para los vehículos de Transporte Mediano de Carga CM, la velocidad máxima de circulación debía ser de 40 Km/h, y que la velocidad mínima de circulación debía ser determinada mediante señalizaciones en cada tramo de la infraestructura vial, y si no existía dicha señal se debía aplicar lo establecido en la Ley de tránsito y transporte terrestre[15]. La cual indicaba que estaba prohibido circular a velocidades reducidas que impidan el flujo normal de los otros vehículos, salvo que fuera necesario para conducir el vehículo con seguridad o en cumplimiento de otros reglamentos.

Tomando en cuenta lo anteriormente mencionado para el presente estudio se utilizó una velocidad de circulación promedio de 14,1 km/h dentro del perímetro urbano del DMQ para los vehículos de la flota vehicular.

### **2.3. ORDENANZAS Y REGLAMENTACIONES VIGENTES SOBRE EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS EN EL DMQ**

Los temas referentes al tránsito dentro del perímetro urbano del DMQ se encontraban bajo el control de la Agencia Metropolitana de Tránsito AMT, por lo tanto para realizar operaciones de transporte de mercancías dentro del DMQ se debía obedecer a los lineamientos establecidos en la Ordenanza Metropolitana 0117, la cual se encontraba vigente desde el año 2004[14].

Uno de los objetivos de la Ordenanza Metropolitana 0117 era el de “reducir la contaminación ambiental ocasionada por los vehículos a través de la

racionalización de los horarios de abastecimiento, reglamentar dimensiones, pesos, velocidades de circulación, mejorar la seguridad vial, establecer las rutas por las que debía circular este tipo de transportes y establecer lineamientos para el transporte de cargas peligrosas protegiendo a las personas y al medio ambiente” [14].

## **2.4. POLÍTICAS AMBIENTALES Y DE SEGURIDAD EN EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS PARA EL DMQ**

Según lo establecido en [14], las autopartes transportadas se catalogaban como Productos Peligrosos, ya que el producto principal que se trataba de baterías de Plomo-ácido para vehículos, las cuales contenían fundamentalmente plomo y ácido Sulfúrico, es decir elementos altamente tóxicos, corrosivos y que podían producir potencialmente una ignición si se unían sus bornes ya que estaban cargadas eléctricamente[16].

En el caso de transporte de cargas peligrosas la Ordenanza Metropolitana 0117 solicitaba seguir los lineamientos de la Norma INEN 2266, la cual solicita colocar el rombo de seguridad de la carga y las placas de advertencia en el contenedor de la carga peligrosa .Ver figuras a continuación.

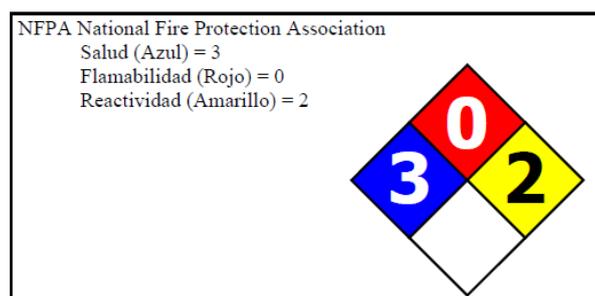


Figura 2.3 Rombo de seguridad para baterías de plomo-ácido [16]

| Rótulo de advertencia de peligro   | Clasificación  |
|--|--|
|  <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - BLANCO<br/>CON RAYAS ROJAS</p>                              | <p><b>CLASE 4</b><br/>Sólidos inflamables: material espontáneamente combustible y material que en contacto con el agua emite gases inflamables</p> |
|  <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - BLANCO</p>  | <p><b>CLASE 6</b><br/>Material venenoso y sustancias infecciosas</p>   |
|  <p>SÍMBOLO - NEGRO<br/>FONDO - MITAD SUPERIOR BLANCO,<br/>MITAD INFERIOR NEGRA Y LEYENDA BLANCO</p> | <p><b>CLASE 8</b><br/>Material corrosivo</p>   |

Figura 2.4 Señalización de seguridad de la carga [17]

Adicionalmente durante su recorrido los vehículos debían contar con los documentos relacionados a su carga como son la guía de embarque, hoja de seguridad de materiales peligrosos, tarjeta y plan de contingencia según lo establecido por la NORMA INEN 2266. (Ver anexos).

En [14] se establecía también que los vehículos debían contar con un medio de comunicación activo durante su recorrido, que el límite de velocidad máximo fuera de 40 km/h, que los contenedores de la carga debían ser tipo blindados para evitar derrames hacia el ambiente o habitantes en caso de un siniestro, estaba prohibido transportar alimentos, medicinas y animales conjuntamente con los materiales peligrosos. Si se llegará a presentar algún impacto ambiental durante el transporte de estos materiales peligrosos, el transportista debía asumir los costos necesarios para mitigarlo.

En caso de no poder cumplirse los puntos anteriormente mencionados se debía tramitar una autorización especial en la Empresa Metropolitana de servicios y administración del transporte o EMSAT.

## **2.5. FLOTA VEHICULAR ASIGNADA A LAS OPERACIONES DE REPARTO**

Para realizar las operaciones de reparto dentro del DMQ, la empresa contaba con una flota vehicular homogénea constituida por tres camiones carrozados simples marca Mitsubishi, modelo Canter-Fuso 5.5T con furgón cerrado para carga seca. Sin embargo uno de ellos debía ser apartado para las operaciones de distribución en zonas rurales y suburbanas del DMQ, por tanto para el presente estudio de Distribución urbana en el DMQ solamente se disponía con dos vehículos regularmente.

Para el reparto de pedidos especiales de clientes importantes bajo la filosofía just in time (JIT) la empresa dispuso exclusivamente una camioneta carrozada simple marca Chevrolet cuya capacidad de carga era de una tonelada la cual a su vez entregaba los pedidos de los clientes ubicados en el sector San Antonio de Pichincha también conocido como “La mitad del mundo”, pero este vehículo no fue tomado en cuenta dentro del presente estudio. Adicionalmente la empresa contaba con tres motocicletas asignadas principalmente a tareas de mensajería pero en ocasiones atípicas se las utilizaba también para la entrega de pedidos especiales fuera de tiempo o urgentes. Sin embargo tampoco se las tomó en cuenta para el presente estudio ya que se pretendía cubrir la totalidad de los pedidos mediante la adecuada planificación de las rutas de los camiones asignados al reparto urbano de autopartes en el DMQ.

## 2.6. ANÁLISIS DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA FLOTA VEHICULAR



Figura 2.5 Vehículos usados en las operaciones de distribución urbana

La flota vehicular asignada para las operaciones de distribución urbana estaba compuesta por tres vehículos con idénticas especificaciones técnicas (Ver tabla a continuación). Los datos de consumo de combustible fueron obtenidos mediante un análisis de las curvas características del motor y de rendimiento del vehículo.

| Fabricante: Mitsubishi                        |                                    |  |
|---|------------------------------------|--|
| Modelo: Fuso Canter 5.5T                      |                                    |  |
| Año de Fabricación: 2008                      |                                    |  |
| MOTOR   | DIMENSIONES                        | DESEMPEÑO                                    |
| Modelo: 4D34-2AT4                             | Capacidad máxima de carga: 4.1 Ton | Velocidad máxima: 100 km/h                   |
| Tipo: 4 cilindros en línea, turbo intercooler | Peso en vacío: 2280 kg             | Radio mínimo de giro: 6.0 m                  |
| Cilindraje: 3908 cc                           | Eje delantero: 2 llantas simple.   | Capacidad del tanque de combustible: 100 lts |
| Potencia: 134 hp@2900rpm                      | Eje trasero: 4 llantas.            |  |

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas de interés de los vehículos de reparto [18].

## 2.6.1. DESEMPEÑO DE LOS VEHÍCULOS DE CARGA

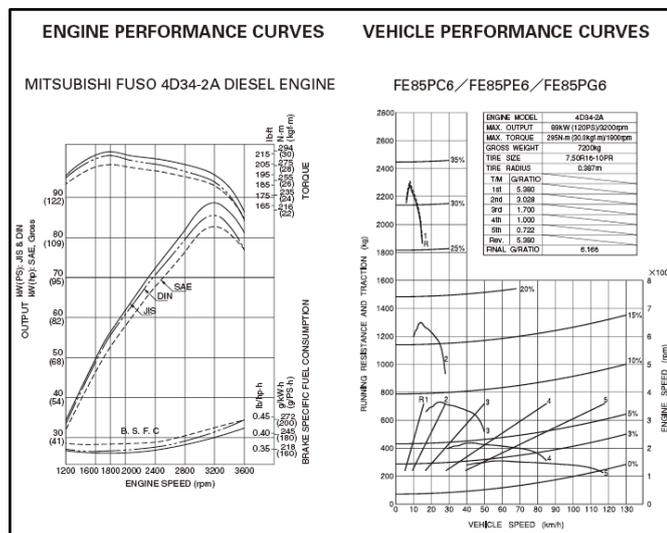


Figura 2.6 Curvas características del motor y de rendimiento de la flota vehicular [19].

Una vez analizadas las curvas características del motor del Mitsubishi Canter Fuso 5.5T funcionando a plena carga se pudo concluir que el campo de elasticidad o zona de máximo rendimiento del motor, estaba dentro del rango de las 1800 y 3200 RPM, por lo tanto se debía recomendar a los conductores de dichos vehículos que el cambio de marchas lo hagan dentro de este rango de revoluciones del Motor RPM, y de ser posible mantener el rango de revoluciones del motor cercano a los 1800 RPM, ya que en ese punto el motor tiene su menor consumo específico de combustible manteniendo un torque y una potencia adecuados dentro del perímetro urbano. Analizando la curva de utilización del motor se pudo notar que el vehículo utilizado contaba con una caja de cambios manuales con cinco relaciones de velocidad cortas de tipo montaña, al igual que su diferencial que era de tipo montaña, con lo cual el vehículo cargado era capaz de superar pendientes de hasta el 32%, lo cual era muy importante ya que la geografía de la infraestructura del DMQ exige en gran medida a los motores por su gran cantidad de pendientes y desniveles existentes lo cual se consideró más adelante.

Al tener el vehículo que circular con el vehículo cargado a una velocidad promedio de 14,1 km/h dentro el perímetro urbano del DMQ y con base a la

curva de utilización del motor, se pudo establecer que el régimen óptimo de utilización del motor estaría fluctuando entre 1800 y 3200RPM, si el conductor realizaba adecuadamente los cambios de marchas, el régimen promedio de revoluciones del motor estaría alrededor de las 2500 RPM con un consumo específico de combustible de 219g/kW.h.

## **2.6.2. CONSUMO DE COMBUSTIBLE DEL VEHÍCULO**

Se deseaba conocer el consumo promedio de combustible del vehículo dentro del perímetro urbano del DMQ, para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = 0,09 * C_e * \frac{P}{V} [20].$$

En donde:

C=consumo de combustible l/100km

C<sub>e</sub>=consumo específico g/kW.h

P=potencia CV

V=velocidad km/h

Anteriormente establecimos que el consumo específico de combustible (C<sub>e</sub>) para las condiciones de funcionamiento de nuestro vehículo analizado sería de 219 g/kW.ha un régimen motor de 2500 RPM, a ese régimen de motor la potencia era de 16 kW o también 21,75 CV según la curva característica de ese motor [19]. Se consideró una velocidad promedio de circulación del de 14 km/h dentro del DMQ aproximando a enteros [12]. Por tanto el consumo promedio de combustible calculado fue de 30,62 l/100km o también 12,34 km/gal con el camión cargado y bajo las condiciones expuestas. Considerando que la capacidad del tanque de combustible es 100 lts o de 26,42 gal, se pudo deducir que la autonomía máxima del camión era de 326,14 km por cada carga de combustible, la cual representaba la distancia máxima de recorrido para cada tour.

Es importante también mencionar que si se calcula el menor consumo del vehículo cargado mediante la misma ecuación [20], usando las curvas del motor y el vehículo circulando a la máxima velocidad permitida de 40 km/h, resultó un menor consumo de combustible de 10,72 lt/100km y una autonomía de 932 km por cada carga de combustible, sin embargo dado el congestionamiento vehicular en el DMQ eso no es posible, por ello es que se usó la velocidad promedio de circulación de 14.1 km/h con un consumo de combustible de 30,4 l/100km como se indicó anteriormente. Además se pudo notar como influía la congestión del tráfico vehicular en el aumento de los costos logísticos de la empresa.

## **2.7. DIMENSIONES Y CAPACIDADES DE LOS VEHÍCULOS DE REPARTO**

### **Dimensiones del furgón de carga**

|                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| Largo exterior del furgón:   | 5000mm               |
| Ancho exterior del furgón:   | 2300mm               |
| Altura exterior del furgón:  | 2300mm               |
| Peso del furgón vacío:       | 830 Kg               |
| Área interna del furgón:     | 12 m <sup>2</sup>    |
| Volumen interior del furgón: | 25,92 m <sup>3</sup> |

Tabla 2.2 Especificaciones del furgón de carga [21].

### **2.7.1. CAPACIDAD DE CARGA DE LOS VEHÍCULOS DE REPARTO**

En la tabla de especificaciones técnicas de interés de los vehículos de reparto vista anteriormente se pudo notar que el peso del camión en vacío es de 2280 kg, y el peso del furgón vacío es de 830 kg, sumado ambas cantidades se pudo obtener la Tara de dicho vehículo de carga de 3110 kg. También se tuvo que

considerar que la capacidad máxima de carga de dicho camión era de 4100 kg según las especificaciones del fabricante y que el Peso Bruto Vehicular permitido para Transporte Mediano de carga CM era de hasta 18000 kg según la ORDM 0117 y de hasta 10000 kg según el MTOP [22], por lo que no se debía exceder dichos pesos.

$$\text{PesoBrutoVehicular} = \text{Tara} + \text{Carga útil}$$

Reemplazando datos se pudo deducir que dichos vehículos podían transportar hasta 4100 kg de carga útil por cada viaje acumulando un Peso Bruto Vehicular de 7210 kg con lo cual se cumplía con lo señalado en las ordenanzas locales.

## 2.7.2. DIMENSIONES DE LOS CAMIONES DE CARGA

En la tabla a continuación se han detallado las dimensiones de los camiones usados en las operaciones de reparto, de manera acorde con las especificaciones del fabricante [23]. Además se comparó dichas dimensiones con los límites máximos permitidos por el MTOP para camiones de dos ejes medianos y 6 llantas [22] y también con la ordenanza local ORDM 0117 para vehículos de carga mediana y 6 llantas [14].

| Dimensión:  | Cantidad  | Límites máximos permitidos para camiones tipo 2DA por el MTOP [22]. | Límites máximos permitidos para transporte mediano de carga según ORDM 0117 [14]. |
|---|-----------|---|---|
| Largo del camión con furgón                                   | 6,65 m    | 7,50 m  | 12m   |
| Ancho del camión con furgón                                   | 2,30 m    | 2,60 m  | 2,6 m   |
| Altura del camión con furgón                                  | 3,08 m    | 3,50m   | 3,5 m   |
| Peso total del camión con toda su capacidad de carga (PBV)[h] | 7,210 Ton | 10 Ton  | 18 Ton  |
| Radio mínimo de giro llanta delantera interna                 | 7,03 m    | -   | 12,81m  |
| Radio mínimo de giro llanta trasera interna                   | 6,0 m     | -   | 8,66 m  |

|  |        |   |         |
|--|--------|---|---------|
| (radio mínimo de giro)                                       |        |   |         |
| Radio de giro Vuelo delantero externo (radio máximo de giro) | 9,12 m | - | 13,39 m |
| Pendiente máxima   | 32%    | - | 10%     |

Tabla 2.3 Análisis de las dimensiones de los vehículos de reparto de acuerdo a la reglamentación vigente.

Primeramente se analizó las dimensiones de los vehículos según los requerimientos para su circulación en carreteras Ecuatorianas [22], y la ordenanza local ORDM 0117[14], de lo cual se pudo notar que los vehículos se encuentran dentro de los rangos permisibles para su funcionamiento

En cuanto a los requerimientos de radio de giro, se pudo concluir que los vehículos analizados cumplían ampliamente con los requisitos de la ordenanza local ORDM-0117[14].

Adicionalmente la Ordenanza local solicitaba que los vehículos de Transporte Mediano de Carga CM sean capaces de superar pendientes de hasta 10% dada la geografía del DMQ, para lo cual el vehículo analizado cumplía ampliamente dicho requerimiento ya que era capaz de superar pendientes de hasta el 32% con carga [24].

## **2.8. TIEMPO DE SERVICIO A CLIENTES**

Dado que las operaciones de entrega del producto a cada cliente requieren de esfuerzo físico ya que implican estibas y selección, se consideró como tiempo promedio de servicio de 13 min para atender a cada cliente, dicho dato fue proporcionado por el jefe de distribución de dicha empresa y es el tiempo estándar que maneja dicha empresa luego de analizar sus registros históricos de entregas.

## **2.9. GEOLOCALIZACIÓN DE LOS CLIENTES**

Para obtener las coordenadas geográficas de latitud (x) y longitud (y) en grados decimales con la ayuda del software Google Earth Pro 7.1.2.2041 [25], como se indica en la figura a continuación, y luego se procedió a tabular dicha información para todos los clientes. Ver tabla más adelante.

Se debe también mencionar que los clientes se encontraban separados en dos áreas principales dentro del DMQ, la zona Norte comprendía la extensión de territorio desde la parroquia de Calderón hasta el centro Norte de Quito llegando hasta el sector de San Juan o los Túneles, a partir de donde comenzaba el Sector Sur extendiéndose hacia al sur de Quito llegando hasta la parroquia de Guamaní al extremo sur del DMQ.

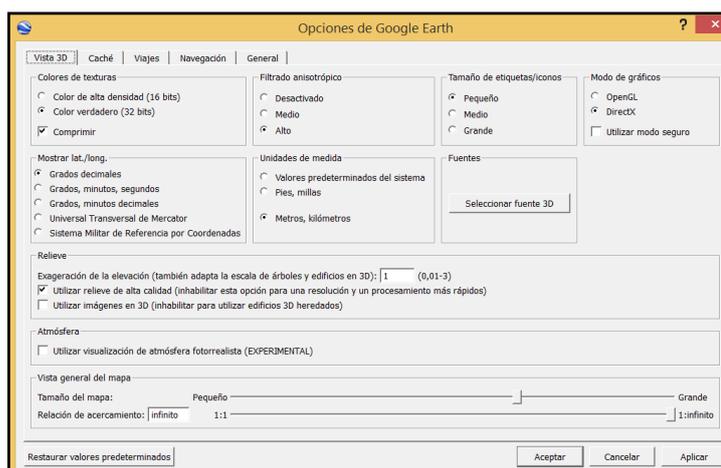


Figura 2.7. Obtención de las coordenadas de los clientes

### **2.9.1. CLIENTES DE LA RUTA NORTE**

A continuación se detalla la localización de cada uno de los 10 clientes de la ruta norte, o sea de los clientes ubicados en la zona norte del DMQ, el cliente 0 es la base en donde inicia y termina el recorrido. Para un mayor detalle ver anexo 9.

| CLIENTE: | Coordenadas |            |
|----------|-------------|------------|
|          | X LATITUD   | Y LONGITUD |
| 1 (BASE) | -0.128544   | -78.480709 |
| 2        | -0.102861   | -78.451637 |
| 3        | -0.109459   | -78.504374 |
| 4        | -0.140863   | -78.508909 |
| 5        | -0.159030   | -78.483367 |
| 6        | -0.190771   | -78.493173 |
| 7        | -0.191352   | -78.498630 |
| 8        | -0.156914   | -78.466478 |
| 9        | -0.210534   | -78.508489 |
| 10       | -0.209765   | -78.503539 |
| 11       | -0.216231   | -78.503026 |
| 12       | -0.180076   | -78.488984 |
| 13       | -0.196156   | -78.494811 |
| 14       | -0.159710   | -78.477727 |

Tabla 2.4. Coordenadas de los clientes de la ruta norte.

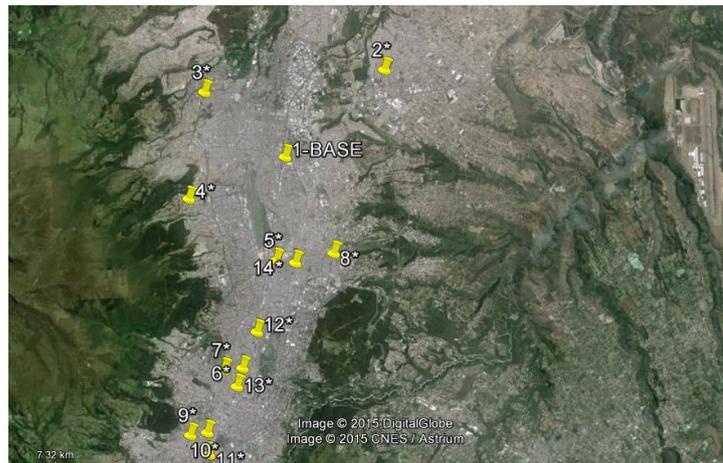


Figura 2.8. Geolocalización de clientes ruta norte

## 2.9.2. CLIENTES RUTA DE LA RUTA SUR

A continuación se detalla la localización de cada uno de los 10 clientes de la ruta sur, o sea de los clientes ubicados en la zona sur del DMQ, el cliente 0 es la base en donde inicia y termina el recorrido, (ver anexo 10).

| CLIENTE: | Coordenadas |            |
|----------|-------------|------------|
|          | X LATITUD   | Y LONGITUD |
| 1 (BASE) | -0.128544   | -78.480709 |
| 15       | -0.248273   | -78.526518 |
| 16       | -0.247734   | -78.530663 |
| 17       | -0.245199   | -78.532851 |
| 18       | -0.246363   | -78.535597 |
| 19       | -0.242293   | -78.532805 |
| 20       | -0.284000   | -78.536104 |
| 21       | -0.348362   | -78.549076 |
| 22       | -0.285290   | -78.536388 |
| 23       | -0.284501   | -78.536332 |

Tabla 2.5 Coordenadas de los clientes de la ruta sur

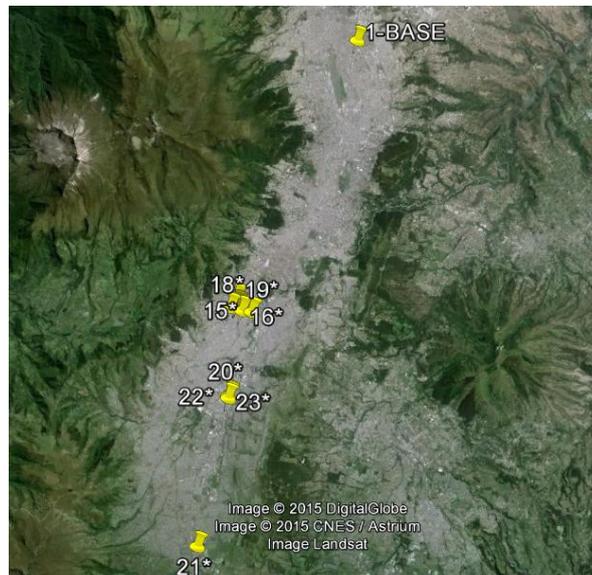


Figura 2.9 Geolocalización de clientes ruta sur

## 2.10. PESO DE LAS MERCANCÍAS A DISTRIBUIR

La mercadería que distribuye la empresa REPUESTOS. S.A. Consistía en autopartes, y en su mayor parte baterías automotrices cuyo peso promedio de cada SKU era de 17,97 kg, es importante mencionar que la superficie promedio que ocupa cada SKU en la superficie del furgón de carga del camión era de 0,23\*0,17 m o sea de 0,04 m<sup>2</sup>, sin embargo este parámetro no afectaba al modelo, ya que las baterías automotrices eran elementos pesados y rígidos que podían soportar un factor de apilamiento de hasta 3 filas por cada columna,

además si se considera que el área interna de carga del furgón era de 12 m<sup>2</sup>, se podrían colocar alrededor de 300 baterías en cada fila, si cada batería pesaba 17,97 kg, el peso total de la carga sería aproximadamente de 5391 kg, lo cual excedía la capacidad de carga útil del camión que era de 4100 kg en tan solo la primera fila de carga en el camión, por lo tanto no se tendría problemas en cuanto a falta de espacio de carga en el camión ya que el peso de una carga total de baterías en tan solo el primer nivel sobrepasaba la capacidad de carga útil del camión sin ocupar la totalidad de la superficie de carga. Lo cual implica que no había problemas en cuanto al solapamiento de la carga para el diseño del algoritmo. Por lo tanto en el modelo solo se consideró la cantidad de carga a entregar a cada cliente y la suma de las cargas individuales de todos los clientes no debía exceder la capacidad de carga del camión especificada anteriormente.

## **2.11. ORDENAMIENTO DE LA CARGA**

Con miras a minimizar el tiempo de servicio a cada uno de los clientes se debían evitar operaciones de carga y descarga durante la ruta de distribución urbana, dado que los vehículos implicados contaban con una sola puerta posterior para realizar las operaciones de carga y descarga, era muy importante determinar también la secuencia de carga de las mercancías en el camión relacionándola con la secuencia de los clientes a ser visitados tomando en cuenta la estructura LIFO o ultimas entradas primeras salidas. Para lo cual se podía aplicar la idea de que una vez obtenida la ruta planificada, esta se aplicaría también como plano de carga pero aplicando un orden inverso al orden de visita de los clientes tomando en cuenta la estructura LIFO en cuanto al manejo de la carga del camión.

## **2.12. VENTANAS DE TIEMPO DE LOS CLIENTES**

Con el objetivo de aumentar el nivel de los servicio hacia los clientes de la empresa, en el presente estudio se incluyó ventanas de tiempo duras para las

visitas a los clientes, dichas ventanas de tiempo consistían generalmente en el horario de funcionamiento normal para vehículos de carga mediana en el DMQ, es decir, la ventana de tiempo inferior era a las 09h30 y la ventana de tiempo superior era a las 15h30 para una jornada normal, pero se debía poner mayor rigidez a las ventanas de tiempo en los días en los que se aplicaba a un camión la reglamentación del pico y placa [26]

El motivo de establecer dichas ventanas de tiempo fue debido a que para los vehículos de carga mediana CM se han establecido horarios de circulación dentro de la red vial del DMQ [14], es decir para **redes de paso** o vías de ingreso y salida hacia áreas urbanas y perimetrales los vehículos de carga mediana CM pueden circular de 20h30 a 06h30 y de 09h30 a 15h30. Y de la misma manera en **redes de accesos** o vías que permiten la circulación entre los diferentes sectores del DMQ. Por último es de mencionar que en la **red de servicio local** o vías que permiten la circulación entre los distintos sectores de la ciudad y sectores residenciales, en dichas redes no había restricciones de circulación para los vehículos de carga mediana CM.

En caso de existir algún cliente ubicado en el sector del centro histórico de Quito las operaciones de carga y descarga para vehículos de carga mediana CM se deben hacerlas dentro de la ventana de tiempo de las 20h30 y las 06h30 de lunes a sábado y de 19h30 a 06h30 los días domingos [14].



---

## **CAPÍTULO III**

### **3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

Analizando lo descrito en la sección de métodos se decidió que para resolver el problema de la planificación de las rutas para atender a los clientes de la empresa REPUESTOS S.A. En el perímetro urbano de Quito, se debía aplicar un modelo de algoritmo genético cuya función objetivo se basa en el modelo VRPTW (vehicle routing problem with time windows) adicionando una restricción para limitar la capacidad de la carga en el vehículo.

Se implementó el algoritmo de ruteo bajo el lenguaje de programación C# incluido dentro del paquete Visual Studio 2012, la base de datos de los clientes se gestionó a través del programa Office Acces 2007. La implementación se realizó en un ordenador de especificaciones, Intel Core i5 CPU M480 @ 2.67GHz, 4.0GB RAM, Sistema operativo de 64 bits.

#### **3.1. DISEÑO DEL ALGORITMO GENÉTICO**

Para el presente estudio se buscaba solucionar el vehicle routing problema with time Windows para lo cual se implementó una variante del algoritmo genético propuesto por Michalewicz [6], hibridándolo con el *método heurístico del vecino más cercano*, para la mejora de las soluciones, el pseudocódigo de este algoritmo puede ser consultado en la sección 1.5.1. En las secciones 1.4 y 1.5 del presente ya se estudió acerca del funcionamiento del algoritmo a ser implementado, pero a continuación se dará un detalle de los puntos más importantes de la implementación:

- **Arquitectura genética:** La codificación elegida para representar a los cromosomas o individuos y que a su vez se relacionaba con la solución del problema [27], fue la de cadenas de números que corresponden a nodos-clientes a los cuales el camión debía llegar partiendo desde un nodo base inicial.

- **Tamaño de la población inicial:** se definió una población inicial de 50 individuos, dado que no era recomendable utilizar una población inicial con más de 100 individuos ya que se podía producir una convergencia prematura al óptimo [27].
- **Evaluación:** se estableció un método para evaluar la aptitud de cada individuo con base a lo establecido en la **función Objetivo**, determinando el costo o distancia total recorrida en dicha ruta o individuo.

```
public double EvaluarIndividuo(DataRow[] Individuo)
{
    double CostoTotal = 0;
    for (int i = 0; i < Individuo.Length - 1; i++)
    {
        CostoTotal += this.Costo(Individuo[i], Individuo[i + 1]);
    }
    //calculando el coste de los circuitos cerrados
    if (this.Circuito == 'C')
    {
        CostoTotal += this.Costo(Individuo[0], Individuo[Individuo.Length - 1]);
    }
    //calculando el coste de los circuitos abiertos
    if (this.Circuito == 'A')
    {
        CostoTotal += this.Costo(this.PuntoFinal, Individuo[Individuo.Length - 1]);
    }
    return CostoTotal;
}
```

Adicionalmente se creó otro método para penalizar a todos aquellos individuos o rutas que violen las restricciones de ventanas de tiempos.

- **Selección de los padres:** se aplicó el procedimiento de selección por torneo detallado en el punto 1.5, literal iv.

```
//metodo para crear parejas
private int[] CrearParejas(int Num)
{
    bool[] Flag = new bool[Num];
    int[] Parejas = new int[Num];
    int i = 0;
    bool Siga;
    while (true)
    {
        Siga = false;
        int Pos = new Random().Next(0, Num);
```

```
if (Flag[Pos] == false)
    {
        Parejas[i] = Pos;
        i++;
        Flag[Pos] = true;
    }
for (int j = 0; j < Num; j++)
{
if (Flag[j] == false) Siga = true;
}
if (!Siga) break;
}
return Parejas;
}

//Método Seleccionar
public void Seleccionar(DataRow[,] POP, DataRow[,] POPTemporal, double[] Objetivo,
double[] ObjetivoTemporal,
double[] ObjetivoVentanasTiempo, double[] ObjetivoVentanasTiempoTemporal)
{
int[] Parejas = this.CrearParejas(POPTemporal.GetLength(0));
for (int i = 1; i <= POP.GetLength(0); i++)
{
if (Rutear.EsVT)
    {
if (ObjetivoVentanasTiempoTemporal[Parejas[i]] <
ObjetivoVentanasTiempoTemporal[Parejas[i - 1]])
    {
this.IngresarIndividuo(POP, this.ExtraerIndividuo(POPTemporal, Parejas[i]), i -
1);
Objetivo[i - 1] = ObjetivoTemporal[Parejas[i]];
ObjetivoVentanasTiempo[i - 1] =
ObjetivoVentanasTiempoTemporal[Parejas[i]];
}
else
    {
this.IngresarIndividuo(POP, this.ExtraerIndividuo(POPTemporal, Parejas[i - 1]), i
- 1);
Objetivo[i - 1] = ObjetivoTemporal[Parejas[i - 1]];
ObjetivoVentanasTiempo[i - 1] =
ObjetivoVentanasTiempoTemporal[Parejas[i - 1]];
}
}
else
    {
if (ObjetivoTemporal[Parejas[i]] < ObjetivoTemporal[Parejas[i - 1]])
    {
this.IngresarIndividuo(POP, this.ExtraerIndividuo(POPTemporal, Parejas[i]), i -
1);
Objetivo[i - 1] = ObjetivoTemporal[Parejas[i]];
}
else
    {
this.IngresarIndividuo(POP, this.ExtraerIndividuo(POPTemporal, Parejas[i - 1]), i
- 1);
Objetivo[i - 1] = ObjetivoTemporal[Parejas[i - 1]];
}
}
}
}
}
```

- **Cruzamiento:** se lo hizo mediante el operador de cruce basado en una correspondencia parcial (PMX) tratado en el punto 1.5

```
public ArrayList Cruzar(DataRow[] Padre, DataRow[] Madre)
{
    int AleatorioPadre = new Random().Next(1, Padre.Length - 2);
    int AleatorioMadre = new Random().Next(1, Madre.Length - 2);

    DataRow[] Hijo, Hija;
    Hijo = new DataRow[Padre.Length];
    Hija = new DataRow[Madre.Length];

    DataRow[] SubPadre, SubMadre;
    SubPadre = new DataRow[3];
    SubMadre = new DataRow[3];
    for (int i = AleatorioPadre; i <= AleatorioPadre + 2; i++)
    {
        SubPadre[i - AleatorioPadre] = Padre[i];
    }
    for (int i = AleatorioMadre; i <= AleatorioMadre + 2; i++)
    {
        SubMadre[i - AleatorioMadre] = Madre[i];
    }

    //////////////////////////////////////

    for (int i = 0; i < AleatorioPadre; i++)
    {
        Hijo[i] = Padre[i];
    }
    int Paso = 0;
    for (int i = AleatorioPadre; i <= AleatorioPadre + 2; i++)
    {
        Hijo[i] = SubMadre[Paso];
        Paso++;
    }
    for (int i = AleatorioPadre + 3; i < Padre.Length; i++)
    {
        Hijo[i] = Padre[i];
    }
    ArrayList Poner = new ArrayList();
    for (int i = 0; i <= 2; i++)
    {
        if (!this.NodoEnSubIndividuo(SubPadre[i], SubMadre))
        {
            Poner.Add(SubPadre[i]);
        }
    }
    ArrayList EnVezDe = new ArrayList();
    for (int i = 0; i <= 2; i++)
    {
        if (!this.NodoEnSubIndividuo(SubMadre[i], SubPadre))
        {
            EnVezDe.Add(SubMadre[i]);
        }
    }
    for (int i = 0; i < Poner.Count; i++)
    {
```

```
DataRow Nuevo, Viejo;
    Nuevo = (DataRow)Poner[i];
    Viejo = (DataRow)EnVezDe[i];
this.ReemplazarNodo(Nuevo, Viejo, Hijo);
}

////////////////////////////////////

for (int i = 0; i < AleatorioMadre; i++)
{
    Hija[i] = Madre[i];
}
Paso = 0;
for (int i = AleatorioMadre; i <= AleatorioMadre + 2; i++)
{
    Hija[i] = SubPadre[Paso];
    Paso++;
}
for (int i = AleatorioMadre + 3; i < Madre.Length; i++)
{
    Hija[i] = Madre[i];
}
Poner = newArrayList();
for (int i = 0; i <= 2; i++)
{
    if (!this.NodoEnSubIndividuo(SubMadre[i], SubPadre))
    {
        Poner.Add(SubMadre[i]);
    }
}
EnVezDe = newArrayList();
for (int i = 0; i <= 2; i++)
{
    if (!this.NodoEnSubIndividuo(SubPadre[i], SubMadre))
    {
        EnVezDe.Add(SubPadre[i]);
    }
}
for (int i = 0; i < Poner.Count; i++)
{
    DataRow Nuevo, Viejo;
    Nuevo = (DataRow)Poner[i];
    Viejo = (DataRow)EnVezDe[i];
    this.ReemplazarNodo(Nuevo, Viejo, Hija);
}

ArrayList Kids = newArrayList(2);
    Kids.Add(Hijo);
    Kids.Add(Hija);
return Kids;
}
```

- **Mutación:** se aplicó el operador de mutación basado en inversión simple (SIM) detallado en el punto 1.5

```
publicvoid Mutar(DataRow[] Individuo)
{
int Aleatorio1, Aleatorio2;
```

```
        Aleatorio1 = newRandom().Next(1, Individuo.Length);
        Aleatorio2 = newRandom().Next(1, Individuo.Length);
DataRow Puente;
        Puente = Individuo[Aleatorio1];
        Individuo[Aleatorio1] = Individuo[Aleatorio2];
        Individuo[Aleatorio2] = Puente;
    }

publicvoid MutarVT(DataRow[] Individuo)
{
    int Aleatorio;
        Aleatorio = newRandom().Next(1, Individuo.Length - 1);
DataRow Puente;
        Puente = Individuo[Aleatorio];
        Individuo[Aleatorio] = Individuo[Aleatorio + 1];
        Individuo[Aleatorio + 1] = Puente;
    }
}
```

- **Coordenadas y distancias entre nodos:** Con la ayuda del software Google Earth, se pudo establecer las coordenadas geográficas de cada uno de los clientes con gran exactitud, pero para poder calcular con precisión las distancias entre los distintos nodos clientes estas se debieron convertir a coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), mediante el siguiente método [28]:

```
publicdouble[] ConvertirGEO2UTM(double Longitud, double Latitud)
{
    double[] XY = newdouble[2];
    constdouble a = 6378388;
    constdouble b = 6356911.94613;
    double c = (a * a) / b;
    double e = Math.Sqrt(a * a - b * b) / b;
    int Huso = (int)Math.Floor((Longitud / 6) + 31);
    int LambdaInicial = Huso * 6 - 183;
    double DeltaLambda = (Longitud - LambdaInicial) * Math.PI / 180;
    double A = Math.Cos((Latitud * Math.PI) / 180) * Math.Sin(DeltaLambda);
    double Epsilon = 0.5 * Math.Log((1 + A) / (1 - A), Math.E);
    double Eta = Math.Atan((Math.Tan((Latitud * Math.PI) / 180)) /
    Math.Cos(DeltaLambda)) - (Latitud * Math.PI) / 180;
    double v = (c * 0.9996) / Math.Sqrt((1 + e * e * Math.Pow(Math.Cos((Latitud *
    Math.PI) / 180), 2)));
    double si = e * e * 0.5 * Epsilon * Epsilon * Math.Pow(Math.Cos((Latitud *
    Math.PI) / 180), 2);
    double A1 = Math.Sin((2 * Latitud * Math.PI) / 180);
    double A2 = A1 * Math.Pow(Math.Cos((Latitud * Math.PI) / 180), 2);
    double J2 = ((Latitud * Math.PI) / 180) + 0.5 * A1;
    double J4 = 0.75 * J2 + 0.25 * A2;
    double J6 = (5 * J4 + A2 * Math.Pow(Math.Cos((Latitud * Math.PI) / 180), 2)) / 3;
    double Alfa = 0.75 * e * e;
    double Beta = (5 * Alfa * Alfa) / 3;
    double Gamma = (35 * Alfa * Alfa * Alfa) / 27;
    double B0 = 0.9996 * c * (((Latitud * Math.PI) / 180) - Alfa * J2 + Beta * J4 -
    Gamma * J6);
}
```

```
XY[0] = Epsilon * v * (1 + si / 3) + 500000;  
XY[1] = Eta * v * (1 + si) + B0 + 10000000;  
return XY;  
}
```

**Método para el cálculo de las distancias Geográficas:** Una vez obtenidas las coordenadas UTM se pudo calcular las distancias geográficas entre los nodos clientes utilizando las métricas Euclidiana y Manhattan (más aplicable en sectores con infraestructura vial terrestre) [28], para lo cual se implementó el siguiente método:

```
public double Costo(DataRow NodoA, DataRow NodoB)  
{  
    double[] PuntoA = this.ConvertirGE02UTM((double)NodoA["CliLongitud"],  
                                              (double)NodoA["CliLatitud"]);  
    double[] PuntoB = this.ConvertirGE02UTM((double)NodoB["CliLongitud"],  
                                              (double)NodoB["CliLatitud"]);  
    if (this.Metrica == "E")//EUCLIDIANA  
    {  
        return Math.Sqrt(Math.Pow(PuntoA[0] - PuntoB[0], 2) + Math.Pow(PuntoA[1] -  
        PuntoB[1], 2));  
    }  
    if (this.Metrica == "M")//MANHATAN  
    {  
        return (double)(Math.Abs(PuntoA[0] - PuntoB[0]) + Math.Abs(PuntoA[1] -  
        PuntoB[1]));  
    }  
    return 0;  
}
```

### 3.2. ARQUITECTURA DE LA APLICACIÓN

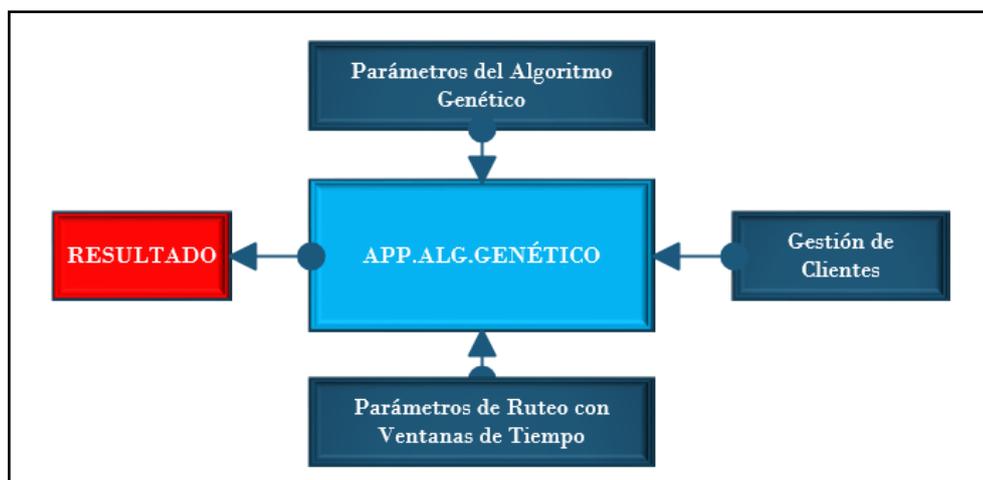


Figura 3.1. Arquitectura de la aplicación

Se diseñó una aplicación de fácil uso para el usuario en la cual se deben ingresar los datos dentro de los distintos formularios, como se describe a continuación:

- **APP.ALG.GENÉTICO:** En dicho formulario se debe escoger la zona geográfica de los clientes, ya sea Norte o Sur, luego seleccionar cada uno de los clientes para asignarlos a la ruta, dentro de dicho formulario también se debe elegir la métrica a emplear para el cálculo de las distancias geográficas y el modo o tipo de circuito a emplear, ya sea “circuito abierto” en el cual se debe definir un punto inicial y un punto final de la ruta, o sea “circuito cerrado” en el cual se debe definir un solo punto que será el inicio y fin de la ruta como en el caso del travelling salesman problem. Este formulario extrae la información de la base de datos de los clientes la cual se explicará más adelante, adicionalmente se incluyó una restricción para comprobar la carga de los clientes asignados a la ruta de modo que estos no excedan la carga del camión de 4100 kg, en caso de que se exceda la capacidad de carga del camión se ha deshabilitado la función de ruteo o de buscar la ruta más óptima.

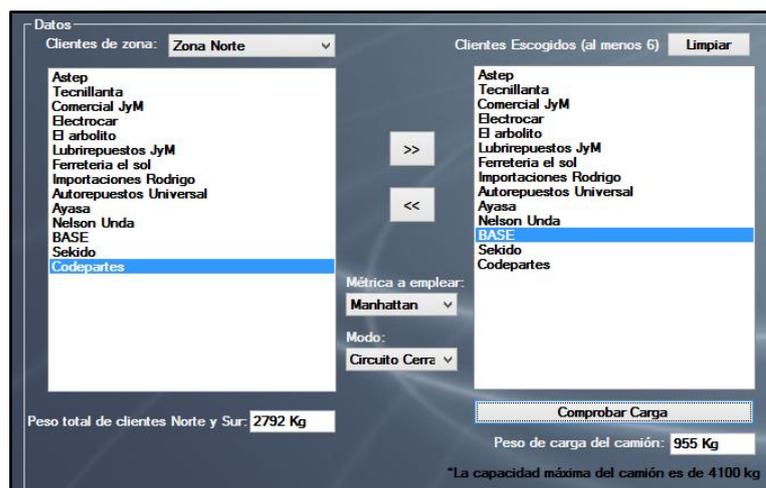


Figura 3.2. Asignación de clientes a la ruta

- **Gestión de Clientes:** Es dicho formulario se puede visualizar y modificar los atributos de los clientes almacenados en la base de datos incluso crear nuevos clientes, los atributos de los clientes son: Id del cliente, dirección, latitud, longitud, zona geográfica, peso de la carga del cliente, ventanas de tiempo del cliente y tiempo de servicio, mediante una conexión con la base de datos de los clientes.

Datos del cliente

Cliente: Astep

Dirección: Av. Pulida y Jorge Piedra

X Latitud: -0.140863 Y Longitud: -78.508909

Zona: NORTE Peso (Kg): 36

Ventana del tiempo para el cliente

Límite Inferior 09:30

Límite Superior 15:30

Tiempo Servicio (min) 13

Operación MODIFICAR

Aceptar

Atras

Figura 3.3. Asignación de clientes a la ruta

- **Parámetros del algoritmo genético:** En dicho formulario se definen el tamaño de la población y el número de generaciones con los que opera el algoritmo genético del presente estudio, o sea sus criterios de parada.

Criterios de parada Algoritmo Genético:

Tamaño Población (al menos 50) 240

Número Generaciones (al menos 10) 80

Figura 3.4. Asignación de parámetros del algoritmo genético.

- **Parámetros del ruteo con ventanas de tiempo:** En dicho formulario se definen la hora y minutos en los cuales comienza la ruta o parte el camión hacia los clientes, además la velocidad del camión y el nivel de servicio sobre los clientes, es decir 100% significa que el camión debe llegar a atender a todos los clientes dentro de las ventanas de tiempos predeterminadas, caso contrario se establece una penalización a la ruta.

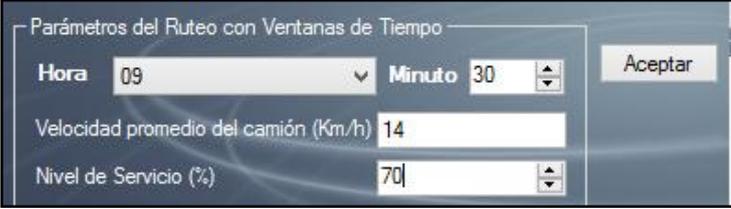


Figura 3.5. Asignación de parámetros del ruteo con ventanas de tiempo.

- **Resultado:** En dicho formulario se muestra la secuencia de los clientes más óptima que el camión repartidor debe visitar, minimizando la distancia total por medio de la función objetivo del algoritmo genético y tomando en cuenta las restricciones por ventanas de tiempos de cada cliente, adicionalmente se ha implementado un cronómetro que mide el tiempo de ejecución del método del algoritmo.

### **3.3. DIAGRAMA DE LA BASE DE DATOS**

Dentro de una base de datos realizada en Office Acces 2007 se ingresaron los datos de los distintos clientes tomados de una muestra correspondiente a las rutas de un día determinado de la empresa REPUESTOS S.A. Y clasificados por zona, los datos de cada cliente son:

CliId: identificación única de cada cliente.

CliDsc: nombre o descripción del cliente.

CliDir: detalle de la dirección del cliente.

CliLatitud: latitud de la localización del cliente en coordenadas geográficas.

CliLongitud: longitud de la localización del cliente en coordenadas geográficas.

CliLI: ventana inferior de tiempo del cliente.

CliLS: ventana de tiempo superior del cliente.

CliTS: tiempo de servicio hacia los clientes.

CliZona: zona de ubicación del cliente en Quito, puede ser norte o Sur.

CliPeso: peso de la mercadería a ser entregada al cliente.

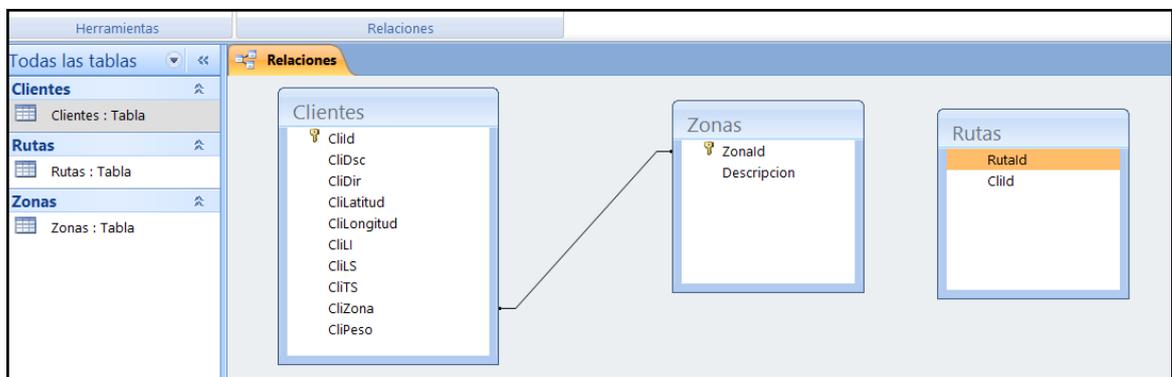


Figura 3.6. Diagrama de la base de datos



---

## **CAPÍTULO IV**

### **4. EXPERIMENTOS Y RESULTADOS COMPUTACIONALES**

Como se mencionó en la sección de marco teórico, la solución del problema TSP o travelling salesman problem se encuentra clasificada como difícil de resolver o “NP-hard” por su alto costo computacional, por ejemplo si tenemos un conjunto de  $n$  ciudades con sus respectivas distancias, la cantidad  $Q$  de posibles combinaciones de tours que se pueden formar está dada por  $Q = (n - 1)!$ , se calcula la distancia total para cada tour y se elige el que tenga la menor; además el tiempo de ejecución está dado por:  $f(n) = (n)!$ . Por ejemplo para el caso de  $n=6$ , tendremos 120 posibles tours y un tiempo de ejecución computacional factible en el orden de varios segundos, ya que se logran exhibir todos los tours posibles, pero si se aumenta a  $n=50$ , el número de tours posibles es  $49! = (6.0828186e+62)$ , un número tan grande de posibilidades que no se lograría resolver ni en varios meses incluso con los computadores de última tecnología [29]. Sin embargo como ya se trató anteriormente la fortaleza de los procedimientos heurísticos de algoritmos genéticos radica en el tiempo de ejecución ya que con ellos se puede llegar a obtener una buena solución dentro de un tiempo de ejecución aceptable para problemas con grandes cantidades de nodos clientes.

#### **4.1. EVALUACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PROPUESTO CONTRA UN MODELO DE PROGRAMACIÓN ENTERA**

Se realizó la evaluación del algoritmo genético propuesto contra un modelo matemático de programación entera programado en GAMS y que fue tratado en el punto 2.7 del presente estudio, al cual se agregó las variables de tiempo de servicio a los clientes y la velocidad del camión, además los arcos entre clientes. Para la primera evaluación se utilizaron solamente 6 nodos clientes

por la razón expuesta en el literal anterior y se evalúa el tiempo de ejecución y los resultados obtenidos.

| CLIENTE:      | Ventana de tiempo inferior | Ventana de tiempo superior | DIRECCION DE ENTREGA: | Coordenadas                            |            | CARGA [kg]  |      |
|---------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|--|------------|-------------|------|
|               |                            |                            |                       | X LATITUD                              | Y LONGITUD |             |      |
| BASE          | 1                          | 9:30                       | 15:30                 | Av. Galo Plaza Lasso y Manuel Zambrano | -0.128544° | -78.480709° | 1    |
| Sekido        | 2                          | 9:30                       | 15:30                 | Av. Neptalí Godoy, sector Carapungo    | -0.102861° | -78.451637° | 100  |
| Codepartes    | 3                          | 9:30                       | 15:30                 | Av. Occidental N70-297 Y Peripa        | -0.109459° | -78.504374° | 100  |
| Astep         | 4                          | 9:30                       | 15:30                 | Av. Pulida y Jorge Piedra              | -0.140863° | -78.508909° | 1200 |
| Tecnillanta   | 5                          | 9:30                       | 15:30                 | Av. Amazonas y el Inca                 | -0.159030° | -78.483367° | 500  |
| Comercial JyM | 6                          | 9:30                       | 15:30                 | Av. 10 de Agosto y Murgeón             | -0.190771° | -78.493173° | 100  |

Tabla 4.1 Grupo de clientes escogidos para prueba.

Debido a la programación del modelo de programación entera VRPTW implementado en GAMS, se utilizó en los dos modelos la métrica Euclidiana para medir las distancias entre nodos clientes. El modelo del VRPTW implementado en GAMS utilizaba grafos dirigidos para la construcción de los arcos como se explicó anteriormente, por lo tanto la cantidad de arcos posibles para la ruta estaba dada por la expresión  $Q_{max} = n(n - 1)$  [30]. Dado que se tenía 6 nodos clientes se tendrían 30 arcos para el grafo dirigido, cuyas distancias entre nodos clientes o arcos se midieron con la ayuda del software Google Earth Pro. La ruta debía iniciar y terminar en el nodo base con el camión saliendo a las 09:30 y respetando las ventanas de tiempo de cada cliente las cuales comenzaban de 09:30 hasta 15:30 como se indicó anteriormente. El tiempo de servicio para cada cliente definido fue de 13 minutos y se buscaba dar un nivel de servicio hacia los clientes del 100%.

|          |          |
|----------|----------|
| d1.v2.d1 | 4305.68  |
| d1.v3.d1 | 3375.50  |
| d1.v4.d1 | 3422.03  |
| d1.v5.d1 | 3383.44  |
| d1.v6.d1 | 7019.24  |
| v2.d1.d1 | 4305.68  |
| v2.v3.d1 | 5915.80  |
| v2.v4.d1 | 7635.77  |
| v2.v5.d1 | 7145.13  |
| v2.v6.d1 | 10763.78 |
| v3.d1.d1 | 3375.50  |
| v3.v2.d1 | 5915.80  |
| v3.v4.d1 | 3509.03  |
| v3.v5.d1 | 5959.68  |
| v3.v6.d1 | 9077.02  |
| v4.d1.d1 | 3422.03  |
| v4.v2.d1 | 7635.77  |
| v4.v3.d1 | 3509.03  |
| v4.v5.d1 | 3481.32  |
| v4.v6.d1 | 5790.04  |
| v5.d1.d1 | 3383.44  |
| v5.v2.d1 | 7145.13  |
| v5.v3.d1 | 5959.68  |
| v5.v4.d1 | 3481.32  |
| v5.v6.d1 | 3675.68  |
| v6.d1.d1 | 7019.24  |
| v6.v2.d1 | 10763.78 |
| v6.v3.d1 | 9077.02  |
| v6.v4.d1 | 5790.04  |
| v6.v5.d1 | 3675.68  |

Figura 4.1. Arcos del grafo dirigido y sus respectivas distancias en (mts)

En las figuras siguientes se muestra las pantallas de resultado de los dos modelos a ser evaluados.

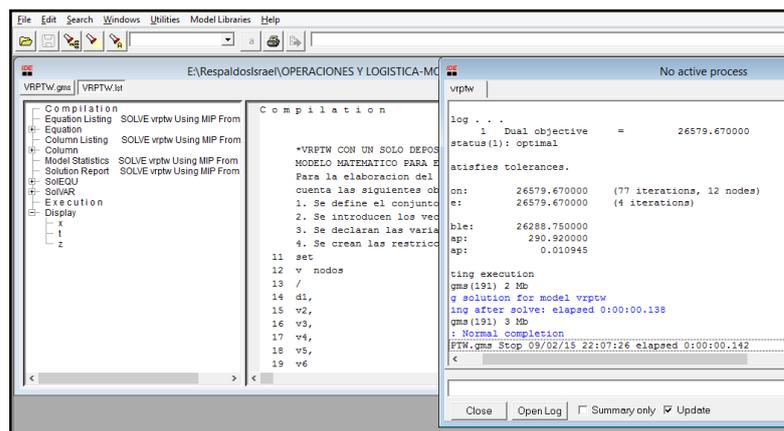


Figura 4.2. Resultado del modelo VRPTW de programación entera programado en GAMS.

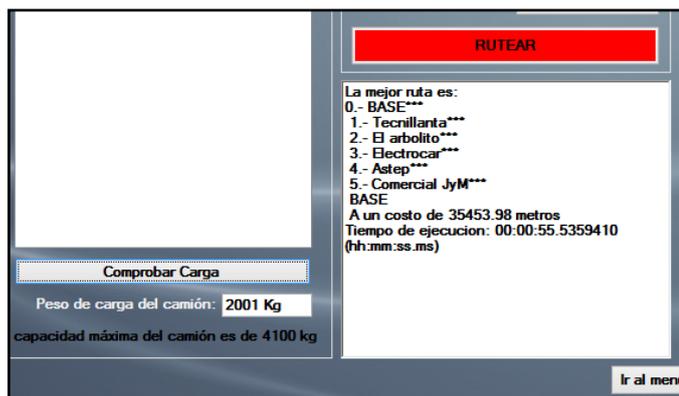


Figura 4.3. Resultado del algoritmo genético para ruteo con ventanas de tiempo.

### 4.1.1. RESULTADOS DE LA PRUEBA

Se ejecutaron 5 corridas con el grupo de 6 nodos clientes y los mismos parámetros mencionados, para ambas aplicaciones se encontraron soluciones factibles en cuanto a las restricciones de ventanas de tiempo; se obtuvieron los siguientes datos:

|                 | META HEURÍSTICA DE RUTEO CON ALGORITMO GENÉTICO Y VENTANAS DE TIEMPO |                           | MODELO DE PROGRAMACION ENTERA VRPTW PROGRAMADO EN GAMS |                           |
|-----------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
|                 | Distancia Total Recorrida por el camión (mts)                        | Tiempo de ejecución (seg) | Distancia Total Recorrida por el camión (mts)          | Tiempo de ejecución (seg) |
| Primera Corrida | 27816.81   | 55.33                     | 26579.67   | 1.42                      |
| Segunda Corrida | 27816.81   | 54.47                     | 26579.67   | 0.12                      |
| Tercera Corrida | 27816.81   | 55.15                     | 26579.67   | 0.12                      |
| Cuarta Corrida  | 33695.63   | 54.84                     | 26579.67   | 0.12                      |
| Quinta Corrida  | 29128.38   | 55.11                     | 26579.67   | 0.12                      |

Tabla 4.2 Resultados de la primera prueba con 6 nodos clientes.

Con respecto a la distancia total recorrida se pudo notar una disminución en la distancia total recorrida de aproximadamente 9.14% aplicando el modelo de Programación entera y si se compara con la distancia total recorrida de la metaheurística de ruteo con Algoritmos genéticos.

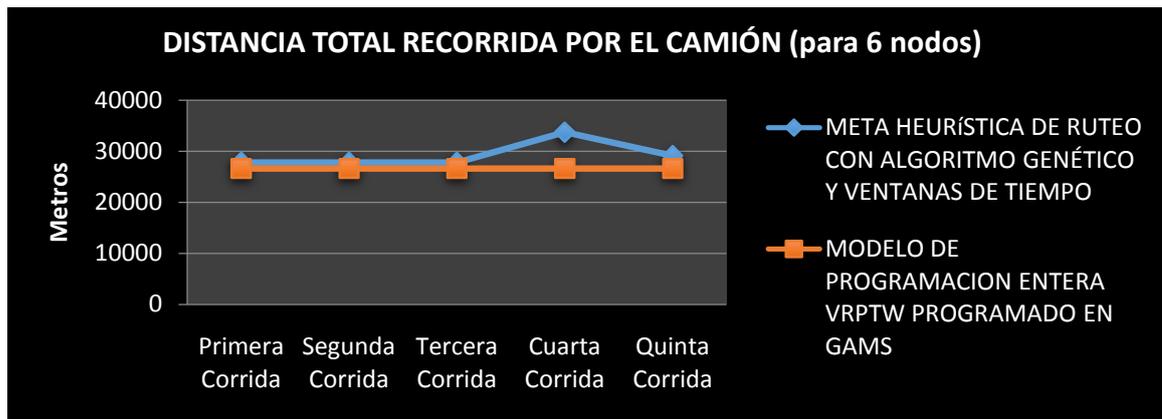


Figura 4.4. Evaluación de la distancia total recorrida de las aplicaciones.

En cuanto al tiempo de ejecución se pudo notar un mejor desempeño del modelo de programación entera mejorando a la metaheurística de ruteo con Algoritmos genéticos aproximadamente en 99%, pero como ya se mencionó anteriormente si se aumenta el número de nodos este problema sería infactible en términos de tiempo de ejecución aplicando el problema de programación entera, y en este aspecto solo la metaheurística fue factible en términos de tiempo de ejecución como se demostró en los siguientes experimentos.

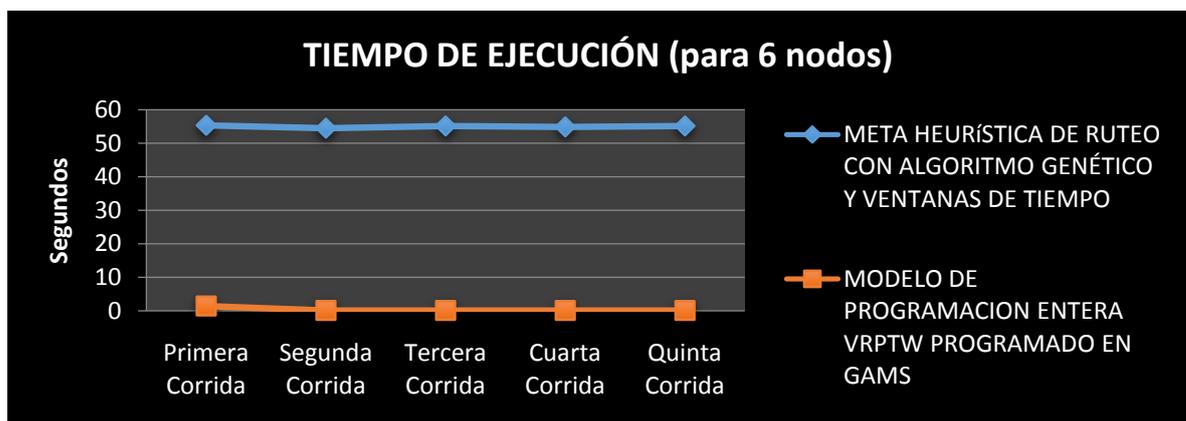


Figura 4.5. Evaluación del tiempo de ejecución de las aplicaciones.

A continuación se registraron los tiempos de ejecución de la aplicación de algoritmos genéticos propuesta incrementando la cantidad de nodos clientes para observar la variación en sus tiempos de ejecución, los criterios de parada fueron dados considerando un tamaño de población de 50 individuos [4], y el

número de generaciones era de 10 [31]. Los clientes fueron tomados de una base de datos reales de 24 nodos clientes, es decir se midieron los tiempos de ejecución de la aplicación con algoritmos genéticos para 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 24 nodos clientes.

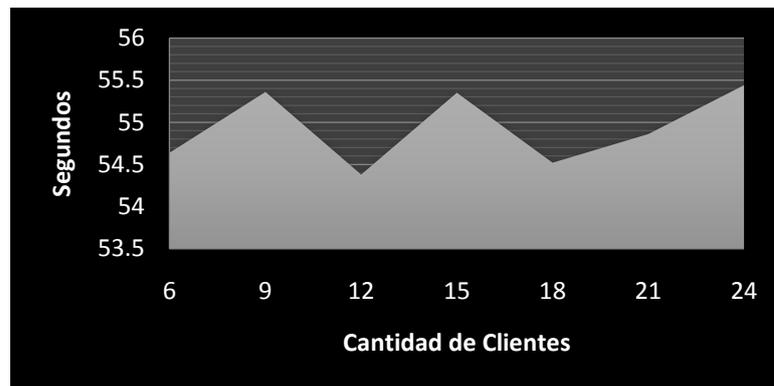


Figura 4.6. Tiempos de ejecución de la metaheurística de ruteo con algoritmos genéticos aplicado a una mayor cantidad de nodos clientes.

Analizando los datos obtenidos se pudo notar una media constante en el tiempo de ejecución del algoritmo propuesto debido a los criterios de parada definidos en los parámetros del algoritmo genético, y en general se pudo comprobar la consistencia de la aplicación desarrollada. Con lo cual en los siguientes apartados se evaluó el algoritmo genético con los 14 nodos clientes reales de la ruta Norte y 10 nodos clientes de la ruta Sur, sin necesidad de evaluar dichos resultados contra el modelo de programación entera ya que no sería factible en cuanto al tiempo de ejecución (el tiempo de ejecución del modelo de programación entera con 14 nodos clientes es de  $13! = 6227020800$ ) [29].

## **4.2. EVALUACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PROPUESTO CONTRA EJEMPLOS DE DISTRIBUCIÓN REALES**

Se procedió a evaluar el resultado de la metaheurística de ruteo con algoritmos genéticos contra las secuencias de rutas reales de reparto o distribuciones realizadas anteriormente en una jornada de trabajo por la empresa

REPUESTOS S.A. En la ciudad de Quito, con el objetivo de poder identificar posibilidades de mejora. En la sección de anexos se adjuntó un detalle de las rutas realizadas por el camión de dicha empresa.

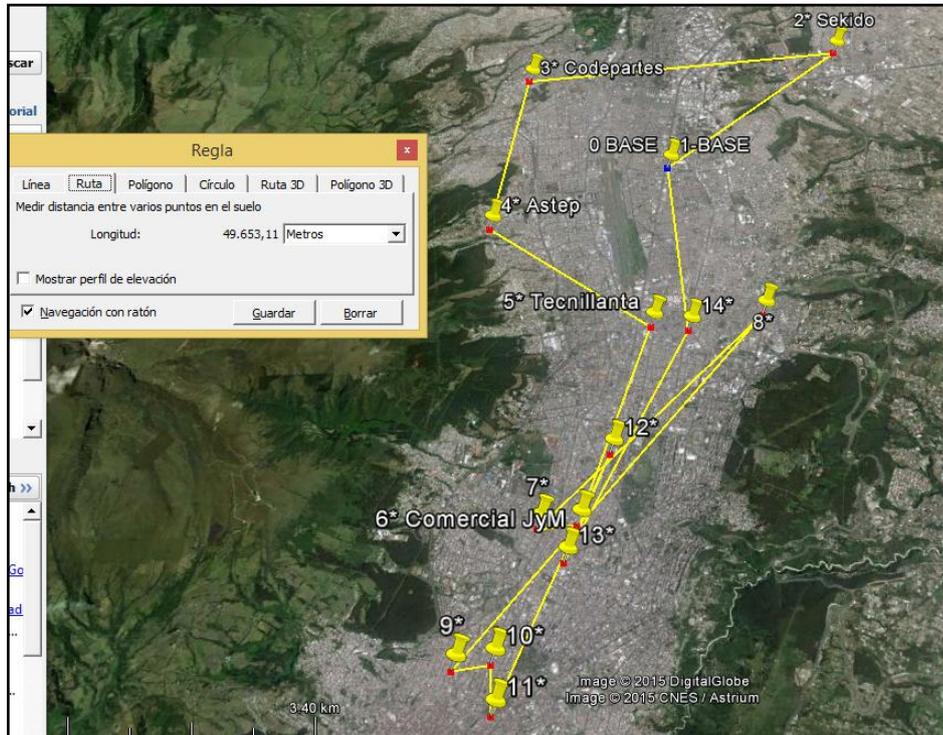


Figura 4.7. Ruta real norte.

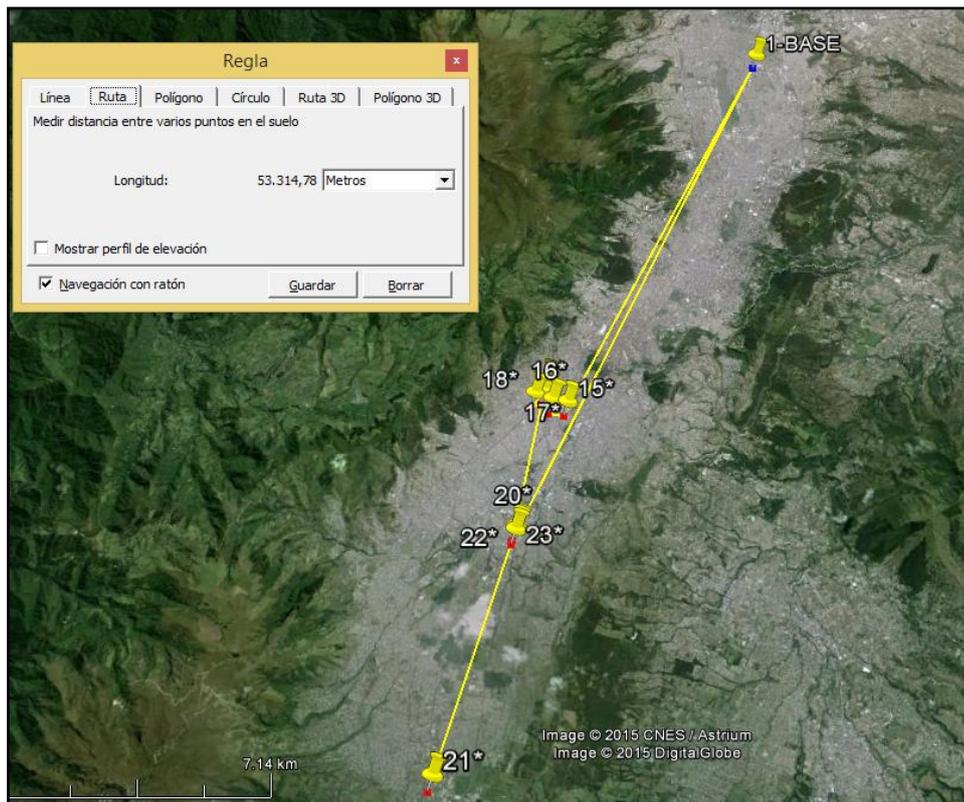


Figura 4.8. Ruta real sur.

#### 4.2.1. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Se realizaron los experimentos de 5 corridas del algoritmo genético para evaluar las distancias totales recorridas por el camión en las rutas para los 14 nodos clientes de la ruta Norte y del mismo modo para los 10 nodos clientes de la ruta Sur, además se registraron las horas planificadas de salida y llegada del camión a la base en las dos rutas. De entre dichas 5 corridas ejecutadas con la aplicación propuesta, se eligió la mejor de entre ellas. En todos los casos se aplicó la métrica de medición Euclidiana, la ventana de tiempo para todos los clientes era de 09:30 al igual que la hora de inicio de la ruta y se extendía hasta 15:30, la velocidad del camión era de 14 km/h y se buscaba un nivel de servicio del 100% ventana dura, es decir que se debía atender a todos los clientes asignados a la ruta. Los parámetros del algoritmo genético para definir su criterio de parada fueron dados considerando un tamaño de población de 50 individuos, y el número de generaciones era de 10. Finalmente se compararon

dichos resultados propuestos por la aplicación de algoritmos genéticos contra las rutas reales registradas por la empresa REPUESTOS S.A.

## **RUTEO DE CLIENTES DE LA RUTA NORTE**

La mejor ruta es:

- 0.- BASE \*\*\***
- 1.- Codepartes \*\*\***
- 2.- Astep \*\*\***
- 3.- Tecnillanta \*\*\***
- 4.- Nelson Unda \*\*\***
- 5.- El arbolito \*\*\***
- 6.- Autorepuestos Universal \*\*\***
- 7.- Comercial JyM \*\*\***
- 8.- Electrocar \*\*\***
- 9.- Ayasa \*\*\***
- 10.- Lubrirepuestos JyM \*\*\***
- 11.- Ferreteria el sol \*\*\***
- 12.- Importaciones Rodrigo \*\*\***
- 13.- Sekido \*\*\***

### **BASE**

\*\*\*\*\*

i. costo de los arcos  $j$  hasta  $j+1$ :

- 3377.4.- 0.- BASE;
- 3510.96.- 1.- Codepartes;
- 3483.4.- 2.- Astep;
- 632.71.- 3.- Tecnillanta;
- 1290.63.- 4.- Nelson Unda;
- 3584.9.- 5.- El arbolito;
- 1271.95.- 6.- Autorepuestos Universal;
- 611.22.- 7.- Comercial JyM;
- 680.77.- 8.- Electrocar;

2202.63.- 9.- Ayasa;

557.88.- 10.- Lubrirepuestos JyM;

717.66.- 11.- Ferreteria el sol;

13787.54.- 12.- Importaciones Rodrigo;

4308.26.- 13.- Sekido;

\*\*\*\*\*

A un costo de 40017.91 metros

Tiempo de ejecución: 00:00:54.8885583 (hh:mm:ss.ms)

\*\*\*\*\*

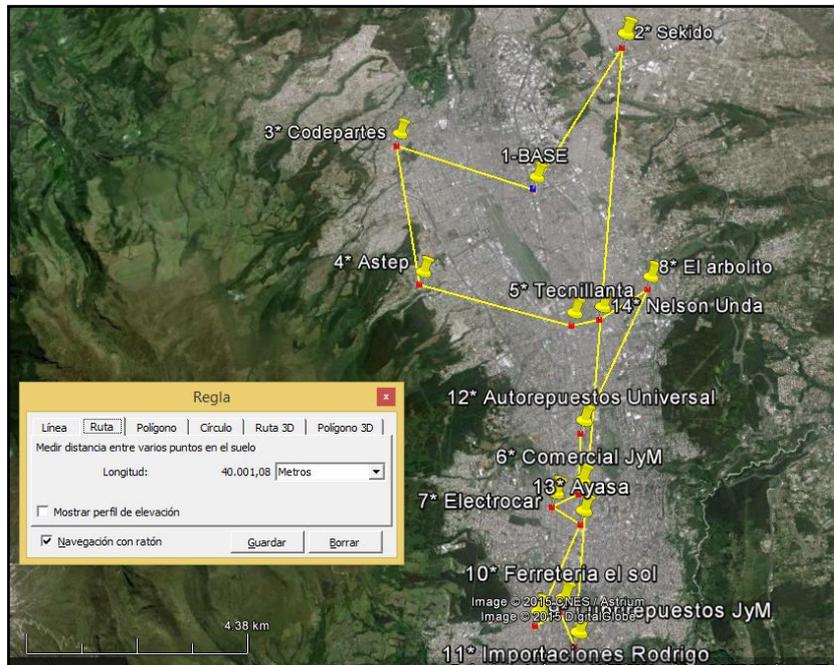


Figura 4.9. Ruta propuesta con algoritmo genético para clientes ruta norte.

| <b>RUTA NORTE</b>   | <b>Distancia Total Recorrida por el camión (mts)</b> | <b>Hora de salida</b> | <b>Hora de llegada</b> | <b>Tiempo de ejecución (seg)</b> |
|---|--|-----------------------|------------------------|----------------------------------|
| <b>META HEURÍSTICA DE RUTEO CON ALGORITMO GENÉTICO Y VENTANAS DE TIEMPO</b> | 40017.91   | 9:30                  | 15:10                  | 54.88                            |
| <b>RUTA REAL</b>  | 49653.11   | 9:30                  | 15:00                  |                                  |

Tabla 4.3 Resultados del ruteo para clientes ruta norte.

Luego de la ejecución de la aplicación propuesta, esta fue comprada con la ruta real para los clientes de la ruta Norte y se notó un ahorro de 9635.2 mts

ruteando lo cual representaba un ahorro de 41 minutos para que el camión cumpla la totalidad de la ruta circulando a 14 km/h dentro del perímetro urbano de la ciudad de Quito, es decir una mejora de aproximadamente 19,4%.

## **RUTEO DE CLIENTES DE LA RUTA SUR**

La mejor ruta es:

**0.- BASE \*\*\***

**1.- Muñoz Live \*\*\***

**2.- Amada Correa \*\*\***

**3.- Elsa Morales \*\*\***

**4.- Juan Carlos Palacios \*\*\***

**5.- Multiencendido \*\*\***

**6.- Autorepuestos km11 \*\*\***

**7.- Llantera del sur \*\*\***

**8.- Romero Solis \*\*\***

**9.- Luis Vergara \*\*\***

**BASE**

\*\*\*\*\*

i. costo de los arcos j hasta j+1:

13858.17.- 0.- BASE;

321.54.- 1.- Muñoz Live;

331.86.- 2.- Amada Correa;

570.11.- 3.- Elsa Morales;

465.52.- 4.- Juan Carlos Palacios;

4094.31.- 5.- Multiencendido;

60.97.- 6.- Autorepuestos km11;

87.51.- 7.- Llantera del sur;

7119.55.- 8.- Romero Solis;

ii. costo desde el punto cero hasta el nodo:

0.- 0.- BASE;

13858.17.- 1.- Muñoz Live;

- 14152.88.- 2.- Amada Correa;
- 14397.6.- 3.- Elsa Morales;
- 14312.62.- 4.- Juan Carlos Palacios;
- 14195.19.- 5.- Multiencendido;
- 18272.4.- 6.- Autorepuestos km11;
- 18333.14.- 7.- Llantera del sur;
- 18417.42.- 8.- Romero Solis;
- 25484.11.- 9.- Luis Vergara;

\*\*\*\*\*

A un costo de 52393.67 metros

Tiempo de ejecución: 00:00:54.8205526 (hh:mm:ss.ms)

\*\*\*\*\*

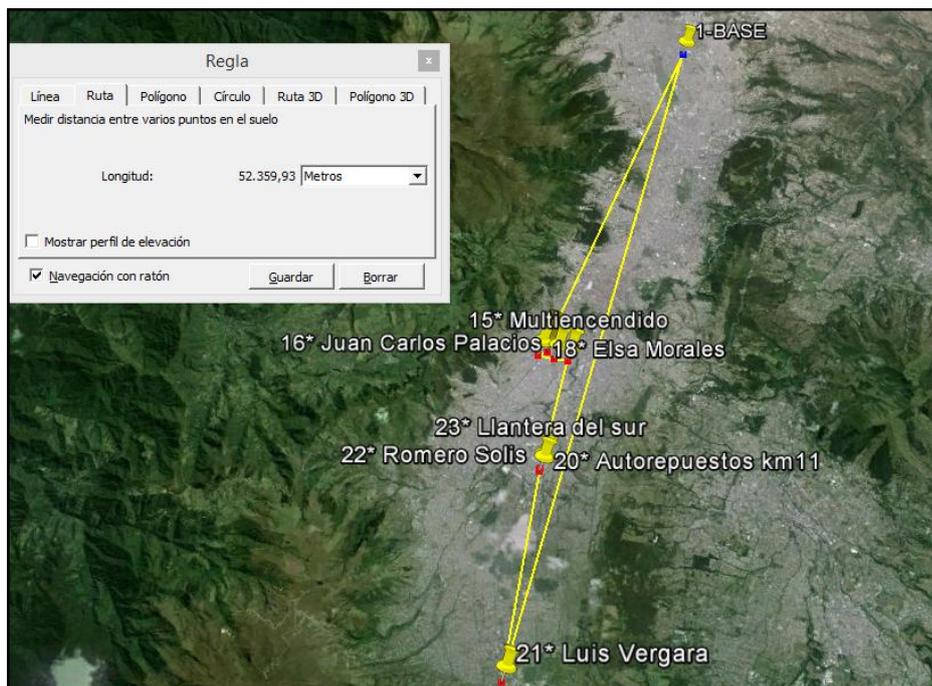


Figura 4.10. Ruta propuesta con algoritmo genético para clientes ruta sur.

| <b>RUTA SUR</b>  | Distancia Total Recorrida por el camión (mts) | Hora de salida | Hora de llegada | Tiempo de ejecución (seg) |
|--|---|----------------|-----------------|---------------------------|
| META HEURÍSTICA DE RUTEO CON ALGORITMO GENÉTICO Y VENTANAS DE TIEMPO | 52393.67                                      | 9:30           | 16:04           | 54.82                     |
| RUTA REAL  | 53314.78                                      | 9:30           | 16:03           |                           |

Tabla 4.4 Resultados del ruteo para clientes ruta sur.

Aplicando la metaheurística de algoritmos genéticos y comparando la distancia total recorrida por el camión contra la distancia real recorrida se obtuvo un ahorro de 921.11 mts, lo cual representaba un 2% de mejora con respecto a la ruta real.

### 4.3. EXPERIMENTOS ADICIONALES SOBRE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS PROPUESTA

A continuación se realizaron varios experimentos para determinar como la modificación en los criterios de parada del algoritmo genético, es decir como el número de generaciones y el tamaño de población influían sobre el resultado final de la aplicación propuesta y con los mismos nodos clientes de la ruta Norte y Sur.

| <b>RUTA NORTE</b><br>Tamaño de la población:50 |   |                           |             | <b>RUTA SUR</b><br>Tamaño de la población:50 |   |                           |             |
|--|---|---------------------------|-------------|--|---|---------------------------|-------------|
| Número de Generaciones                         | Distancia Total Recorrida por el camión (mts) | Tiempo de ejecución (min) | % de Mejora | Número de Generaciones                       | Distancia Total Recorrida por el camión (mts) | Tiempo de ejecución (min) | % de Mejora |
| RUTA REAL:                                     | 49653.11                                      | -                         | 0           | RUTA REAL:                                   | 53314.78                                      | -                         | 0           |
| 10   | 40017.91                                      | 0.9                       | 19.4        | 10   | 52393.67                                      | 0.9                       | 1.7         |
| 50   | 40022.73                                      | 4.6                       | 19.4        | 50   | 52393.67                                      | 4.6                       | 1.7         |
| 80   | 39765.96                                      | 7.3                       | 19.9        | 80   | 52420.79                                      | 7.4                       | 1.7         |
| 240  | 39765.96                                      | 22.0                      | 19.9        | 240  | 52393.67                                      | 22.0                      | 1.7         |

Tabla 4.5 Modificación del número de generaciones en el ruteo de clientes.

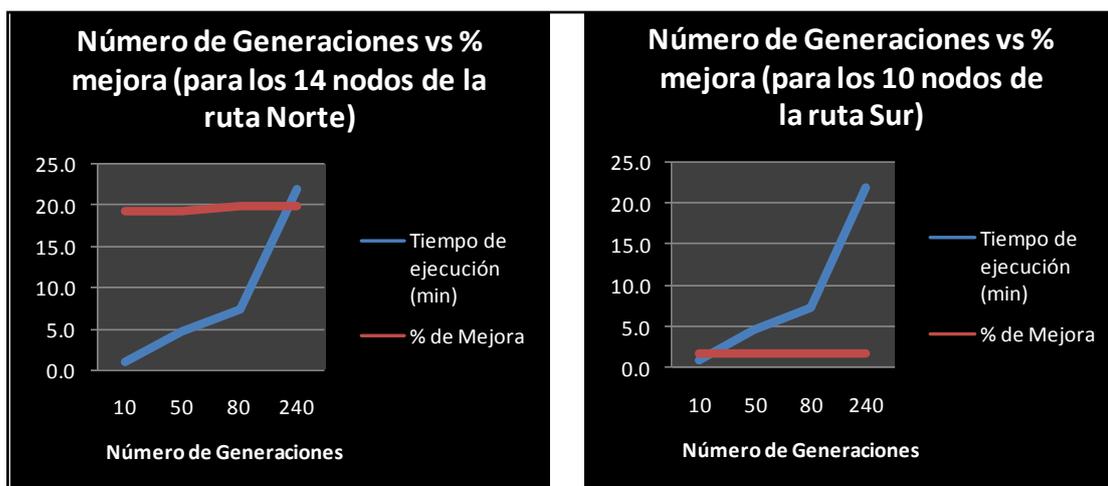


Figura 4.11. Modificación del número de generaciones vs % de mejora en el ruteo de clientes.

Se pudo notar una ligera mejora en el resultado de la aplicación al aumentar el número de generaciones de 10 a 80, sin embargo el tiempo de ejecución aumentó considerablemente, lo cual sugiere que previamente se deberá analizar la relación costo beneficio al momento de aumentar el número de generaciones. En el siguiente experimento se fijó el criterio de parada del algoritmo genético 80 generaciones y se analizó de forma similar como la modificación en el tamaño de la población inicial del algoritmo genético influía sobre el resultado final de la aplicación propuesta, los resultados se indican a continuación:

| RUTA NORTE<br>Número de Generaciones: 80 |   |                                 |                           |             | RUTA SUR<br>Número de Generaciones: 80 |   |                                 |                           |             |
|--|---|---------------------------------|---------------------------|-------------|--|---|---------------------------------|---------------------------|-------------|
| Tamaño de la población                   | Distancia Total Recorrida por el camión (mts) | Tiempo de ejecución (h:min:seg) | Tiempo de ejecución (min) | % de Mejora | Tamaño de la población                 | Distancia Total Recorrida por el camión (mts) | Tiempo de ejecución (h:min:seg) | Tiempo de ejecución (min) | % de Mejora |
| RUTA REAL:                               | 49653.11                                      | -                               | -                         | 0           | RUTA REAL:                             | 53314.78                                      | -                               | -                         | 0           |
| 10                                       | -   | -                               | -                         | -           | 10                                     | -   | -                               | -                         | -           |
| 50                                       | 45636.11                                      | 0:07:20                         | 7.3                       | 8.1         | 50                                     | 52512.48                                      | 0:07:20                         | 7.3                       | 1.5         |
| 80                                       | 42291.92                                      | 0:12:13                         | 12.2                      | 14.8        | 80                                     | 52393.67                                      | 0:12:11                         | 12.2                      | 1.7         |
| 240                                      | 40938.78                                      | 0:27:29                         | 27.5                      | 17.6        | 240                                    | 52512.48                                      | 0:26:31                         | 26.5                      | 1.5         |

Tabla 4.6 Modificación del tamaño de población en el ruteo de clientes.

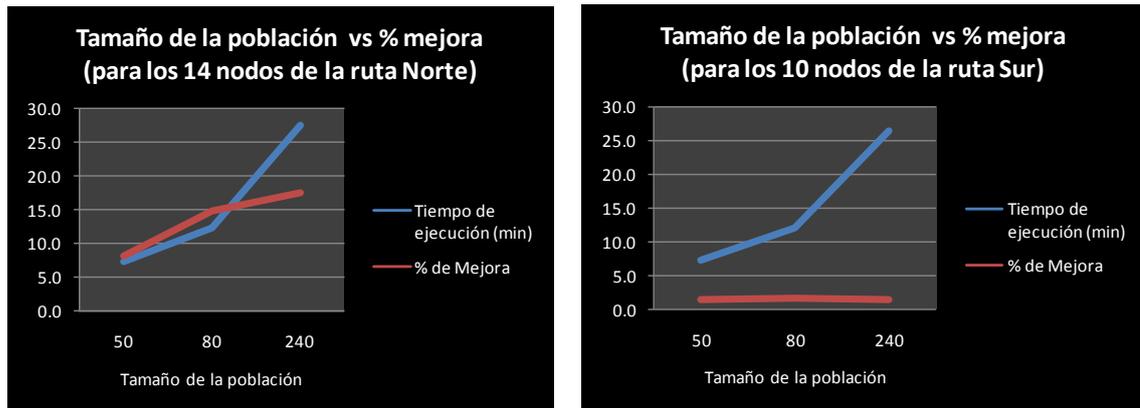


Figura 4.12. Modificación del tamaño de población vs % de mejora en el ruteo de clientes.

En dicho experimento se pudo observar que al aumentar el tamaño de la población a más de 50 individuos si se produjeron mejoras en la función objetivo comparando con la ruta real, pero al igual que el experimento anterior el tiempo de ejecución aumentó considerablemente, por lo cual se eligió un tamaño de población de 50 por tener una buena relación de costo en tiempo de ejecución contra beneficios en mejoras.

### **4.3.1. DISTRIBUCIÓN POR PRIORIDADES**

Se realizó una prueba modificando las ventanas de tiempo de los clientes priorizando de entre ellos a los que tengan mayor volumen de producto por entregar, para que su horario de servicio sea por la mañana (ventana de tiempo de 09:30 hasta 12:00) y los demás clientes con menor volumen de producto por entregar tengan un horario de servicio normal (ventana de tiempo de 09:30 hasta 15:30). Se utilizó como criterios de parada un tamaño de población de 50 individuos y 80 generaciones, se utilizó nuevamente la métrica de distancias Euclidiana para poder comparar los datos con los anteriormente obtenidos. Ni en la ruta Norte ni en la ruta Sur se excedió la capacidad del camión. Se consideró como clientes prioritarios a aquellos cuyo peso de mercancía a distribuir supere los 100 kg. A continuación se indica como quedan las ventanas de tiempos de los clientes por prioridades:

| BATERIAS/CARTONES | CLIENTE:                       | VENTANA DE TIEMPO INFERIOR | VENTANA DE TIEMPO SUPERIOR | CARGA [kg] |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|
|                   | <b>BASE</b>                    | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>1</b>   |
| 14                | Ayasa                          | 9:30                       | 12:00                      | 252        |
| 9                 | Codepartes                     | 9:30                       | 12:00                      | 162        |
| 7                 | Nelson Unda                    | 9:30                       | 12:00                      | 126        |
| 6                 | Tecnillanta                    | 9:30                       | 12:00                      | 108        |
| <b>4</b>          | <b>Autorepuestos Universal</b> | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>72</b>  |
| <b>3</b>          | <b>Sekido</b>                  | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>54</b>  |
| <b>2</b>          | <b>Astep</b>                   | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>36</b>  |
| <b>2</b>          | <b>El arbolito</b>             | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>36</b>  |
| <b>2</b>          | <b>Lubrirepuestos JyM</b>      | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>36</b>  |
| <b>1</b>          | <b>Comercial JyM</b>           | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |
| <b>1</b>          | <b>Electrocar</b>              | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |
| <b>1</b>          | <b>Ferreteria el sol</b>       | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |
| <b>1</b>          | <b>Importaciones Rodrigo</b>   | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |

Tabla 4.7 Clientes prioritarios de la ruta norte.

| BATERIAS/CARTONES | CLIENTE:                    | VENTANA DE TIEMPO INFERIOR | VENTANA DE TIEMPO SUPERIOR | CARGA [kg] |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|
|                   | <b>BASE</b>                 | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>1</b>   |
| 84                | Multiencendido              | 9:30                       | 0.5                        | 1512       |
| 5                 | <b>Amada Correa</b>         | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>90</b>  |
| 4                 | <b>Elsa Morales</b>         | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>72</b>  |
| 3                 | <b>Muñoz Live</b>           | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>54</b>  |
| 2                 | <b>Romero Solís</b>         | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>36</b>  |
| 1                 | <b>Juan Carlos Palacios</b> | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |
| 1                 | <b>Autorepuestos km11</b>   | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |
| 1                 | <b>Luis Vergara</b>         | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |
| 1                 | <b>Llantera del sur</b>     | <b>9:30</b>                | <b>15:30</b>               | <b>18</b>  |

Tabla 4.8 Clientes prioritarios de la ruta sur.

## RESULTADO DE RUTEO POR PRIORIDADES RUTA NORTE

| RUTA NORTE   | Distancia Total Recorrida por el camión (mts) | Hora de salida | Hora de llegada | Tiempo de ejecución (hh:mm:seg) |
|--|---|----------------|-----------------|---------------------------------|
| META HEURÍSTICA DE RUTEO CON ALGORITMO GENÉTICO Y VENTANAS | 39765.96                                      | 9:30           | 15:09           | 0:07:21                         |
| RUTA REAL  | 49653.11                                      | 9:30           | 15:00           |                                 |

Tabla 4.9 Resultados del ruteo por prioridades para clientes ruta norte.

Realizando el ruteo por prioridades en la ruta norte se pudo observar resultados muy similares que el ruteo con ventanas de tiempos fijas para todos los nodos clientes (tabla 4.3) con una ligera mejora de un minuto en la hora de finalización de la ruta, e igualmente una mejora de aproximadamente 20% con respecto a la ruta real.

### RESULTADO DE RUTEO POR PRIORIDADES RUTA SUR

| <b>RUTA SUR</b>   | <b>Distancia Total Recorrida por el camión (mts)</b> | <b>Hora de salida</b> | <b>Hora de llegada</b> | <b>Tiempo de ejecución (hh:mm:seg)</b> |
|---|--|-----------------------|------------------------|--|
| <b>META HEURÍSTICA DE RUTEO CON ALGORITMO GENÉTICO Y VENTANAS</b> | <b>52445.82</b>                                      | <b>9:30</b>           | <b>16:04</b>           | <b>0:07:20</b>                         |
| <b>RUTA REAL</b>  | <b>53314.78</b>                                      | <b>9:30</b>           | <b>16:03</b>           |  |

Tabla 4.9 Resultados del ruteo por prioridades para clientes ruta sur.

Realizando el ruteo por prioridades en la ruta sur se pudo observar resultados similares que el ruteo con ventanas de tiempos fijas para todos los nodos clientes (tabla 4.4) con la misma hora de finalización de la ruta, e igualmente una mejora de aproximadamente 2% con respecto a la ruta real.



## **CAPÍTULO V**

### **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

La implementación de meta heurísticas de algoritmos genéticos hibridados con la heurística del vecino más cercano es posible y brinda buenas soluciones resolviendo el problema del VRPTW como quedó demostrado en el presente estudio.

La implementación de una metaheurística con algoritmos genéticos para resolver el problema del ruteo vehicular con ventanas de tiempo en una empresa comercializadora de autopartes en Quito es posible y luego de las evaluaciones a las que se la sometió a la aplicación propuesta en la presente se demostró que las soluciones brindadas por la misma en cuanto a la secuenciación de las rutas ofrecieron mejoras aproximadamente en 20% comparando con la secuenciación empírica que se realizaba en la empresa estudiada y en cortos tiempos de ejecución, lo cual representaría grandes ahorros en costos logísticos y optimización de la distribución de autopartes para la empresa estudiada si esta llega a implementar un sistema de ruteo vehicular similar el expuesto en la presente y deja de confiar en el ruteo empírico.

La evaluación de la metaheurística con algoritmos genéticos contra un modelo de programación entera del VRPTW programado en GAMS demostró un mejor resultado del modelo de programación entera en aproximadamente un 9% si se evalúa la función objetivo de distancia total recorrida por el camión, sin embargo la implementación del modelo de programación entera fue más complicada en cuanto a la construcción de los grafos dirigidos para los arcos entre clientes y la medición de cada uno de ellos, lo cual hace que sea difícil de implementar en una empresa real ya que la cantidad de nodos clientes en dichas empresas oscilan entre 20 o más para un día normal de trabajo, lo cual

como se indicó anteriormente eleva el tiempo de elaboración del modelo matemático y el costo computacional sería muy alto, mientras que la principal ventaja de la metaheurística con algoritmos genéticos radica en el corto tiempo de ejecución ya que en todas las ejecuciones con hasta 24 clientes el tiempo de ejecución no sobrepasó el minuto, brindando “buenas soluciones” en todos los casos sin necesidad de ser la solución más óptima pero sin alejarse demasiado de ésta, y siendo mejor que el ruteo empírico que actualmente se realiza en la empresa estudiada como fue comprobado. Lo cual hace totalmente posible la implementación del modelo propuesto en una empresa de distribución de autopartes real.

En la ruta Sur se pudo notar que con la metaheurística genética propuesta en este estudio no se alcanzó a cumplir con la ventana de tiempo superior lo cual evidenció una mala repartición de las distancias geográficas de los clientes que tiene actualmente la empresa, al tráfico en Quito y a las grandes distancias que el camión debía recorrer, en estos casos se debería considerar transmitir clientes excedentes de la ruta sur hacia el camión de la ruta norte el cual si alcanzó a cumplir su ruta y tuvo un tiempo sobrante, lo cual evidencia la importancia en la planificación previa de las rutas y zonas de transporte y el rediseño de la red de distribución para la empresa REPUESTOS S.A. Lo cual constituye una posibilidad de mejora para dicha empresa.

La infraestructura o red vial disponible de la ciudad de Quito por su geografía y su tráfico son temas complejos que se pueden abordar aplicando modelos matemáticos y/o metaheurísticas que consideren las ventanas de tiempo y zonificación geográfica de los nodos, sin embargo mientras la cantidad de estos nodos vaya aumentando los problemas de secuenciación de rutas vehiculares se irán haciendo más difíciles de resolver incluso con metaheurísticas híbridas de algoritmos genéticos.

Las respuestas arrojadas por la aplicación se pueden mejorar aumentando el tamaño de la población y el número de generaciones en los parámetros del algoritmo genético pero aumentarían el tiempo de ejecución y el costo computacional.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Para un correcto funcionamiento de las operaciones de distribución urbana se deberá verificar el cumplimiento de todas las ordenanzas locales ORDM 0117 e INEN-2266 como se estudió en los primeros capítulos del presente estudio, es decir se debe asegurar que los vehículos cumplan con todas las reglamentaciones, ordenanzas locales y de seguridad, así como dar la respectiva importancia al mantenimiento preventivo de las unidades vehiculares para evitar retrasos y bajos niveles de servicio hacia los clientes y a su vez reducir costos logísticos

Se recomienda a la empresa realizar reuniones entre las áreas de logística y comercialización para que acuerden el rediseño de la red de distribución, ya que actualmente las distancias totales de traslados y cantidad de clientes están sobrecargadas en la zona Sur si se la compara con la zona Norte.

Si se llega a implementar una aplicación como la expuesta en la presente, un punto crítico y que deberán tratar entre las áreas de logística, sistemas y comercial es el ingreso de los clientes a la base de datos o en el ERP para que esta sea una base de datos confiables y exacta sobre todo en cuanto a la precisión de la localización de los clientes geográficamente y definir adicionalmente un administrador de la misma que la supervise constantemente.

Se podría seguir trabajando la aplicación desarrollada para que esta considere los costos logísticos que ahorra a la empresa por ejemplo en el consumo de combustible, mantenimiento de las vehiculares, autonomía del camión, etc.

Dar la respectiva importancia a los desarrollos expuestos por la Investigación de Operaciones para la optimización de los procesos dentro de un centro de

distribución, ya que estos ofrecen mayores oportunidades de mejora que los conocimientos empíricos de una sola persona como se demostró en el presente estudio.



---

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Martí, R. (2003). Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria. *Matemáticas*, 1(1), 3-62.
- [2] Comellas, F., Ozón, J., Cortés, A., Abril, J., & Vaquer, M. (1999). Sistemas multiagente para la asignación de frecuencias en redes celulares. IX Jornadas de I+ D en Telecomunicaciones, UPC, Barcelona. ISBN, 84(7653), 730.
- [3] Winston, W. L. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*. Thomson.
- [4] Moujahid, A., Inza, I., & Larrañaga, P. (2008). Tema 2. Algoritmos Genéticos. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial Universidad del País Vasco
- [5] J. H. Holland. University of Michigan Press, Ann Arbor. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*.
- [6] Michalewicz, Z. (1996), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Ed. Springer Verlag.
- [7] Buzai, G. D., & Baxendale, C. A. (2008). Modelos de localización-asignación aplicados a servicios públicos urbanos: Análisis espacial de escuelas EGB en la ciudad de Luján. *Revista Universitaria de Geografía*, 17(1), 233-254.
- [8] Delgado, E. (2012). *Modelos avanzados en logística y transporte*. Manuscrito no publicado, Escuela Superior politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- [9] Agencia Metropolitana de Tránsito (2014). Plano general de control. Recuperado el 2 de diciembre del 2014, de <http://www.agenciatransito.quito.gob.ec/index.php/servicios/transito-mdq/plano-general-de-control.html>

- [10] Demoraes, F (2005). Movilidad, elementos esenciales y riesgos en el distrito metropolitano de Quito. Colección Quito Metropolitano.
- [11] Ballou, R. (2004). Logística. Administración de la cadena de suministro. 5ta edición. Pearson Educación, México, 2004.
- [12] Municipio del Distrito Metropolitano de Quito (2014). Diagnóstico de la movilidad en el distrito metropolitano de quito para el plan metropolitano de desarrollo territorial (PMOT). Recuperado el 22 de diciembre del 2014, de <http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/pdf/diagnosticomovilidad.pdf>
- [13] Empresa Municipal de Movilidad y Obras Públicas (2009). Plan maestro de movilidad 2009 – 2025. Recuperado el 22 de diciembre del 2011, de [https://www.flacso.org.ec/biblio/shared/biblio\\_view.php?bibid=118765&tab=opa](https://www.flacso.org.ec/biblio/shared/biblio_view.php?bibid=118765&tab=opa)
- [14] Concejo Metropolitano de Quito (2004). Ordenanza de reglamentación para la circulación de vehículos de transporte de carga y transporte de productos químicos peligrosos en el distrito metropolitano de Quito. Recuperado el 2 de diciembre del 2014, de [http://www7.quito.gob.ec/mdmq\\_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS%20A%C3%91OS%20ANTERIORES/ORDM-117%20-%20TRANSPORTE%20DE%20CARGA%20DE%20PRODUCTOS%20QUIMICOS%20-%20REGLAMENTACION.pdf](http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS%20A%C3%91OS%20ANTERIORES/ORDM-117%20-%20TRANSPORTE%20DE%20CARGA%20DE%20PRODUCTOS%20QUIMICOS%20-%20REGLAMENTACION.pdf)
- [15] Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (2014). Reglamento a la ley de tránsito y transporte terrestre. Recuperado el 7 de Diciembre del 2014, de <http://www.soatecuador.info/documentos/regleytransitoweb.pdf>
- [16] TECNOVA. (2013) Material Safety Data Sheet. (Versión 3.1). Informe del departamento de seguridad industrial, Tecnova, Guayaquil, Ecuador
- [17] Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2000). Transporte, almacenamiento y manejo de productos químicos peligrosos. Requisitos.

(Norma técnica ecuatoriana obligatoria INEN 2266 primera edición).  
Subcomité técnico: de sustancias químicas de uso peligroso, Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

- [18] Corporación Automotriz S.A. (2013) Catálogo online Fuso Canter. Recuperado el 3 de Diciembre del 2013, de <http://corasa.com.ec/wp-content/uploads/2013/09/Fuso-Canter-5.5.pdf>
- [19] MITSUBISHI FUSO TRUCK OF AMERICA. (2010). Canter basic specifications. (Vol.1). NJ, USA: MITSUBISHI FUSO TRUCK OF AMERICA, INC.
- [20] Instituto para la diversificación y ahorro de la energía. (2011). Consumo de energía y emisiones al medio ambiente en el transporte por carretera. IDAE - Dirección General de Transporte Terrestre del Ministerio de Fomento, (Ed. 2011), 17-45.
- [21] Isuzuauto (2014). Recuperado de, <http://www.isuzuautocom.com/uploadimg/vehiculos/docs/60.pdf>
- [22] Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (2012). Comunicado a los señores generadores de carga, encargados de control de transporte terrestre tránsito y seguridad vial. Cuadro demostrativo de peso bruto vehicular y longitudes máximas permisibles, págs. 3-4.
- [23] Mitsubishi Fuso (2013). Ficha técnica Canter. Recuperado el 3 de diciembre del 2013, de <http://www.mitsubishi-fuso.com.ve/Productos-Actuales.aspx#dimensiones>
- [24] MITSUBISHI FUSO TRUCK OF AMERICA. (2010). Canter basic specifications. (Vol.1). NJ, USA: MITSUBISHI FUSO TRUCK OF AMERICA, INC.
- [25] Google Inc. (2014). Google Earth Pro (version 7.1.2.2041) [software de cómputo]. Mountain View, CA, Estados Unidos: Google.

- [26] Agencia Metropolitana de Tránsito (2015). Controles y fiscalización Pico y Placa. Recuperado el 2 de febrero de 2015, de <http://www.agenciatransito.quito.gob.ec/index.php/servicios/pico-y-placa.html>
- [27] Medina, J. R., & Yepes, V. (2000). Optimización de redes de distribución con algoritmos genéticos. In Actas del IV Congreso de Ingeniería del Transporte (Vol. 1, pp. 205-213).
- [28] Ruiz, C. (2014). Desarrollo de un sistema de información dss para el ruteo de vehículos.
- [29] Velarde, J. G., & Mercado, R. R. (1999). Investigación de operaciones en acción: Aplicación del TSP en problemas de manufactura y logística. *Ingenierías*, 2(4), 18-23.
- [30] Meza, O., & Ortega, M. (2006). *Grafos y Algoritmos*.
- [31] VALENCIA, E. (1997, August). Optimización mediante algoritmos genéticos. In *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* (Vol. 109, No. 2, pp. 83-92).

### **Bibliografía complementaria**

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación*. México: Editorial Mc Graw Hill.
- Day, R. A. (2005). *Cómo escribir y publicar trabajos científicos* (Vol. 598). Pan American Health Org.
- Hillier et al. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*, 9na edición. McGraw Hill.
- Joyanes, L. (2008). *Fundamentos de la programación. Algoritmos y Estructura de Datos*, 4ta Edición. Madrid: McGraw-Hill.

- 
- Chopra, S. et al. (2008). Administración de la cadena de suministro, 3ra edición. Pearson Educación.
  - Martín C (2011). Scatter Search y la optimización funcional. Matemática, volumen 9, (2), 13-20
  - Miguel, F., Frutos, M., & Tohmé, F. (2013). MODELADO DEL BPP/CVRPTW Y SU RESOLUCIÓN A TRAVÉS DE UNA META-HEURÍSTICA EVOLUTIVA.
  - Ocaña R. et al. (2012). Diseño de un modelo matemático para resolver problemas de ruteo vehicular capacitado con ventanas de tiempo, con la aplicación del algoritmo de Clarke & Wright. Caso de estudio: Empresa de servicios de Courier de la ciudad de Guayaquil. Guayaquil: Escuela Superior politécnica del Litoral.
  - Peña, A et al. (2005). Algoritmos genéticos. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
  - Carretero López, F. (2010). Optimización global con algoritmos genéticos.
  - Goldberg, D. E., & Richardson, J. (1987, July). Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization. In Genetic algorithms and their applications: Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms (pp. 41-49). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
  - Sánchez, M. et al. (2013). Congestión Vehicular en Quito. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
  - Miguel, F., Frutos, M., y Tohmé, F. MODELADO DEL BPP / CVRPTW Y SU RESOLUCIÓN A TRAVÉS DE UNA META-Heurística EVOLUTIVA.
  - Sitio Web “Microsoft Developer Network” (MSDN). ONLINE. <http://msdn.microsoft.com>
  - Rosenthal, R. E. (2004). GAMS--a user's guide.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1: MODELO DE DOCUMENTO DE EMBARQUE SEGÚN NORMA INEN 2266**

|   |                                    |  |
|---|------------------------------------|--|
| <b>NOMBRE DE LA EMPRESA:</b><br><b>NOMBRE DEL RESPONSABLE:</b><br><b>DIRECCIÓN:</b><br><b>TELÉFONO:</b>   |                                    |  |
| <b>NOMBRES DEL CONDUCTOR Y DEL AUXILIAR:</b><br><b>TIPO Y No. DE LICENCIA:</b><br><b>No. DE PLACA:</b><br><b>VEHÍCULO: MARCA:..... VIN: .....</b> |                                    |  |
| <b>LUGAR DE SALIDA</b>  |                                    | <b>LUGAR DE DESTINO</b>  |
| <b>NOMBRE DEL DESTINATARIO:</b><br><b>DIRECCIÓN:</b><br><b>TELÉFONO:</b>  |                                    |  |
| <b>NOMBRE DEL PRODUCTO</b>  |                                    | <b>NÚMERO DE LAS NACIONES UNIDAS (NU) DEL PRODUCTO: (ver Norma INEN-2266 ANEXO J).</b> |
| <b>CANTIDAD:</b>  | <b>EMBALAJE:</b>                   | <b>PESO (kg):</b>  |
| <b>NOMBRE Y FIRMA DEL EXPEDIDOR:</b><br><br>_____   | <b>LUGAR Y FECHA:</b><br><br>_____ |  |

**ANEXO 2: MODELO DE HOJA DE SEGURIDAD DE MATERIALES PELIGROSOS SEGÚN NORMA INEN 2266**

|                             |
|-----------------------------|
| <b>NOMBRE DE LA EMPRESA</b> |
|-----------------------------|

|                        |
|------------------------|
| <b>NIVEL DE RIESGO</b> |
| SALUD:                 |
| INFLAMABILIDAD:        |
| REACTIVIDAD:           |

|   |
|---|
| <b>HOJA DE SEGURIDAD DE MATERIALES - MSDS</b>   |
| 1. IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL<br>NOMBRE COMERCIAL:<br>NOMBRE QUÍMICO:<br>USO:<br>SINÓNIMOS:<br>NOMBRE FABRICANTE:<br>DIRECCIÓN FABRICANTE:<br>NOMBRE DISTRIBUIDOR:<br>DIRECCIÓN DISTRIBUIDOR:<br>FORMULA QUÍMICA<br>NUMERO CAS*: |

|                         |
|-------------------------|
| <b>MSDS * No.</b>       |
| TELÉFONO DE EMERGENCIA: |

\* MSDS: (Material Safety Data Sheet):

\* CAS: (Chemical Abstract Service): CÓDIGO DEL PRODUCTO Hojas de seguridad de materiales HHH

| 2. INGREDIENTES PELIGROSOS |   |           |                                   |          |  |
|----------------------------|---|-----------|-----------------------------------|----------|--|
| SUSTANCIA                  | % | NÚM. CAS* | LÍMITES DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL |          |  |
|                            |   |           | TLV*                              | TLV-TWA* |  |
|                            |   |           |                                   |          |  |

\* TLV: (Threshold Limit Values) Valor umbral límite

TLV-TWD: (Tire Weighted Average): Valor límite promedio ponderado en el tiempo

|   |
|---|
| <b>3. PROPIEDADES FÍSICAS</b>   |
| ESTADO FÍSICO:  |
| APARIENCIA Y COLOR:   |
| TEMPERATURA DE FUSIÓN (°C):   |
| TEMPERATURA DE EBULLICIÓN (°C) (RANGO)  |
| SOLUBILIDAD EN AGUA:  |
| OLOR_:  |
| % DE VOLÁTILES POR VOLUMEN:   |
| PRESIÓN DE VAPOR A 20°C (mm de Hg):   |
| DENSIDAD DE VAPOR: <input type="checkbox"/> MÁS PESADO QUE EL AIRE <input type="checkbox"/> MÁS LIVIANO QUE EL AIRE |
| TASA DE EVAPORACIÓN: <input type="checkbox"/> MÁS RÁPIDO <input type="checkbox"/> MÁS LENTO QUE EL BUTIL ACETATO    |
| DENSIDAD RELATIVA:  |
| pH:   |

\* Para mayor detalle ver Apéndice Y de la NORMA INEN 2266 (Continúa...)

| <b>4. RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN</b>   |                            |   |
|--|----------------------------|---|
| ¿ES INFLAMABLE?:<br><input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO  | PUNTO<br>INFLAMACIÓN (°C): | TEMPERATURA<br>AUTO IGNICIÓN (°C):            |
| LIM. SUPERIOR<br>INFLAMABILIDAD (%)  |                            | LIM. INFERIOR<br>INFLAMABILIDAD (%):          |
| MEDIOS DE EXTINCIÓN<br>RECOMENDADOS:<br><input type="checkbox"/> CO2 <input type="checkbox"/> POLVO QUÍMICO SECO <input type="checkbox"/> AGUA PULVERIZADA<br><input type="checkbox"/> ESPUMA <input type="checkbox"/> OTROS <input type="checkbox"/> NO APLICABLE |                            |   |
| PROCEDIMIENTOS ESPECIALES PARA COMBATIR INCENDIOS:   |                            |   |
| EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL RECOMENDADO:   |                            |   |
| PRODUCTOS PELIGROSOS POR DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA:   |                            |   |
| <b>5. RIESGOS PARA LA SALUD</b>  |                            |   |
| <input type="checkbox"/> INHALACIÓN  |                            | <input type="checkbox"/> CONTACTO CON LA PIEL |
| <input type="checkbox"/> CONTACTO CON LOS OJOS   |                            | <input type="checkbox"/> INGESTIÓN            |
| INHALACIÓN:  |                            |   |
| CONTACTO CON LA PIEL:  |                            |   |
| CONTACTO CON LOS OJOS:   |                            |   |
| INGESTIÓN:   |                            |   |
| OTROS: (CARCINOGENESIS, MUTAGENESIS, TERATOGENESIS, ETC.)  |                            |   |
| SOBREEXPOSICIÓN REPETIDA:  |                            |   |
| PROCEDIMIENTOS DE PRIMEROS AUXILIOS  |                            |   |
| INHALACIÓN:  |                            |   |
| CONTACTO CON LA PIEL:  |                            |   |
| CONTACTO CON LOS OJOS:   |                            |   |
| INGESTIÓN:   |                            |   |
| INFORMACIÓN PARA EL MÉDICO:  |                            |   |

Continúa...

| 6. RIESGOS AMBIENTALES                    |  |
|---|--|
| BIODEGRADABILIDAD/PERSISTENCIA:           |  |
| BIOTOXICIDAD:                             |  |
| COMPORTAMIENTO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO: |  |

| 7. ESTABILIDAD                                   |  |
|--|--|
| ESTABILIDAD:                                     | <input type="checkbox"/> ESTABLE <input type="checkbox"/> NESTABLE     |
| CONDICIONES QUE SE DEBE EVITAR:                  |  |
| INCOMPATIBILIDAD:                                |  |
| PRODUCTOS PELIGROSOS POR DESCOMPOSICIÓN QUÍMICA: |  |
| POLIMERIZACIÓN PELIGROSA:                        | <input type="checkbox"/> OCURRIRÁ <input type="checkbox"/> NO OCURRIRÁ |
| CONDICIONES QUE SE DEBE EVITAR                   |  |

| 8. PROCEDIMIENTOS EN CASO DE ESCAPE ACCIDENTAL |  |
|--|--|
| PASOS A SEGUIR EN CASO DE FUGA O DERRAME:      |  |
| EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL QUE DEBE USARSE: |  |
| MÉTODOS DE ELIMINACIÓN DE DESECHOS:            |  |

| 9. MÉTODOS DE CONTROL DE HIGIENE INDUSTRIAL Y PROTECCIÓN PERSONAL |  |
|---|--|
| CONTROLES DE INGENIERÍA:  |  |
| VENTILACIÓN LOCAL:  |  |
| VENTILACIÓN POR DILUCIÓN:   |  |
| PROTECCIÓN RESPIRATORIA:  |  |
| PROTECCIÓN DE LOS OJOS:   |  |
| PROTECCIÓN DE LAS MANOS:  |  |
| OTROS EQUIPOS DE PROTECCIÓN:                                      |  |

| 10. PRECAUCIONES ESPECIALES |  |
|-----------------------------|--|
| MANEJO:                     |  |
| ALMACENAMIENTO:             |  |
| OTRAS PRECAUCIONES:         |  |

| 11. INFORMACIÓN SOBRE TOXICIDAD |  |
|---------------------------------|--|
| DATOS AGUDOS O CRÍTICOS:        |  |
| DÉRMICA:                        |  |
| ORAL:                           |  |
| IRRITACIÓN DE LOS OJOS:         |  |
| IRRITACIÓN DE LA PIEL:          |  |
| SENSIBILIZACIÓN DE LA PIEL:     |  |

Continúa...

|   |
|---|
| <b>12. INFORMACIÓN SOBRE EL TRANSPORTE</b>                        |
| INFORMACIÓN SOBRE INCIDENTES: (Guía de emergencia de transporte): |
| NUMERO DE IDENTIFICACIÓN DOT*: UN _____                           |

ETIQUETA SEGÚN DOT\*:

\* DOT: (US Department of Transportation) = Departamento de transporte de los Estados Unidos.

|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| <b>13. RESPONSABILIDAD</b> |              |
| ELABORADO POR: _____       | FECHA: _____ |
| REVISADO POR: _____        | FECHA: _____ |
| CANCELA: _____             |              |

**ANEXO 3 MODELO DE TARJETA DE EMERGENCIA SEGÚN INEN-2266**

|   |          |
|---|----------|
| <b>NOMBRE DE LA EMPRESA</b>                       |          |
| <b>TARJETA DE EMERGENCIA</b>                      |          |
| NOMBRE COMERCIAL DEL MATERIAL:                    | MSDS*No. |
| DESCRIPCIÓN:                                      |          |
| RIESGOS DEL PRODUCTO EN CASO DE DERRAMES O FUEGO: |          |
| PROTECCIÓN BÁSICA RECOMENDADA                     |          |

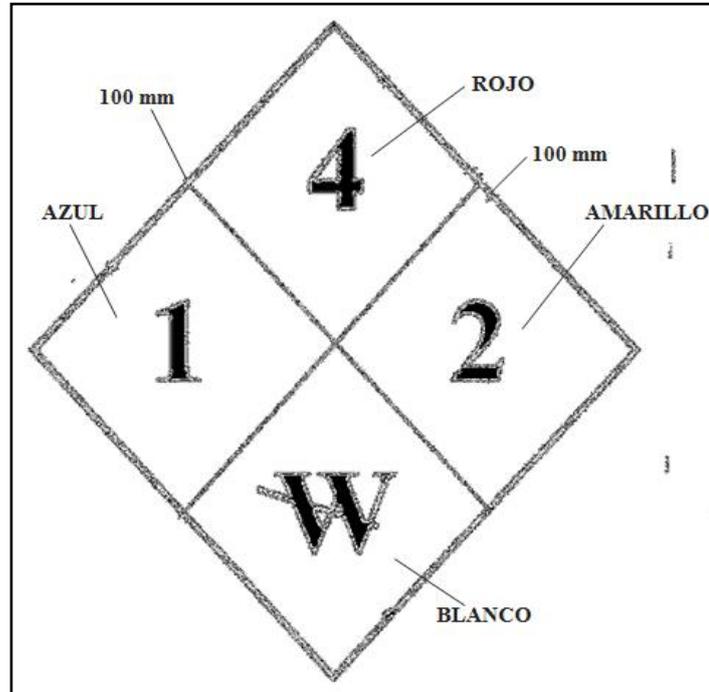
| <b>EN CASO DE ACCIDENTE</b> |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| <b>SI OCURRE ESTO</b>       | <b>HAGA LO SIGUIENTE</b> |
| DERRAMES O FUGAS            |                          |
| FUEGO                       |                          |
| EXPOSICIÓN                  |                          |

ELABORADO POR: \_\_\_\_\_ FECHA: \_\_\_\_\_

**MSDS DE:**

\* Para mayor detalle Ver Apéndice Y de Norma INEN-2266.

**ANEXO4 – MODELO DE RÓTULO DE RIESGO ROMBO DE IDENTIFICACIÓN SEGÚN INEN-2266**



NOTA: Las etiquetas para los envases:

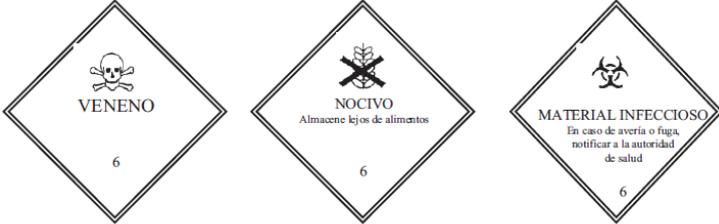
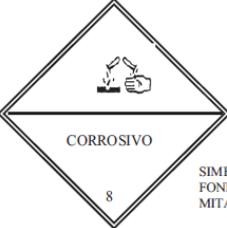
- No deben ser menores a los 100mm por 100mm
- El rombo está dividido en 4 zonas a las cuales les corresponde un color y un número
- El color indica el tipo de riesgo existente con las sustancias y el número indica el nivel de riesgo.

**COLORES PARA LOS RÓTULOS DE PELIGRO Y SÍMBOLOS DE SEGURIDAD – REFERENCIA PANTONE**

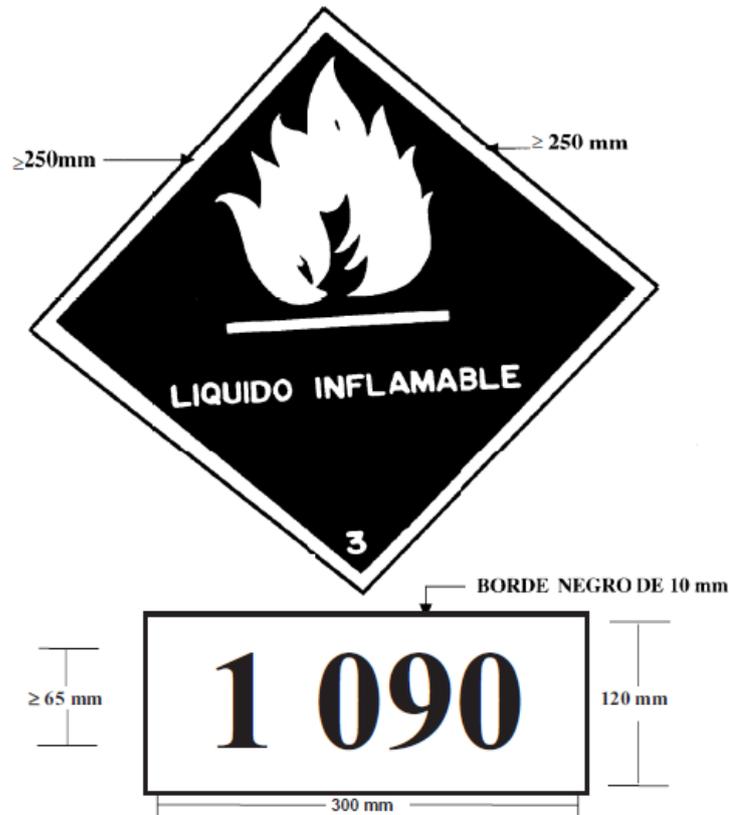
| COLOR        | BÁSICO    |
|--------------|-----------|
| ANARANJADO   | 152       |
| AMARILLO     | 109       |
| BLANCO       | W         |
| NEGRO        | NEGRO0419 |
| ROSA INTENSO | 198       |
| VERDE        | 361       |
| ROJO         | 485       |
| AZUL         | 299       |

**ANEXO5 – SÍMBOLOS GRÁFICOS O DISEÑOS DE LAS ETIQUETAS SEGÚN INEN-2266**

| Rótulo de advertencia de peligro   | Clasificación  |
|--|--|
|  <p>EXPLOSIVO<br/>1</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - ANARANJADO</p>   | <p><b>CLASE 1</b><br/>Explosivos</p>   |
|  <p>GAS VENENOSO<br/>2</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - BLANCO</p>  <p>GAS INFLAMABLE<br/>2</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - BLANCO<br/>FONDO - ROJO</p>  <p>GAS COMPRIMIDO NO INFLAMABLE<br/>2</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - BLANCO<br/>FONDO - VERDE</p>  | <p><b>CLASE 2</b><br/>Gases comprimidos, licuados o disueltos bajo presión</p>   |
|  <p>LIQUIDO INFLAMABLE<br/>3</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - BLANCO<br/>FONDO - ROJO</p>   | <p><b>CLASE 3</b><br/>Líquidos inflamables</p>   |
|  <p>SOLIDO INFLAMABLE<br/>4</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - BLANCO<br/>CON RAYAS ROJAS</p>  <p>COMBUSTIBLE ESPONTANEO<br/>4</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO MIDAD SUPERIOR BLANCO<br/>MITAD INFERIOR ROJO</p>  <p>PELIGROSO CUANDO ESTA HUMEDO<br/>4</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA- BLANCO<br/>FONDO - AZUL</p> | <p><b>CLASE 4</b><br/>Sólidos inflamables: material espontáneamente combustible y material que en contacto con el agua emite gases inflamables</p> |
|  <p>AGENTE OXIDANTE<br/>5.1</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - AMARILLO</p>  <p>PEROXIDO ORGANUICO<br/>5.2</p> <p>SÍMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - AMARILLO</p>   | <p><b>CLASE 5</b><br/>Oxidantes y peróxidos Orgánicos</p>  |

| Rótulo de advertencia de peligro  | Clasificación   |
|---|---|
|  <p>SIMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - BLANCO</p> <p>SIMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - BLANCO</p> <p>SIMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>FONDO - BLANCO</p>  | <p><b>CLASE 6</b><br/><b>Material venenoso y sustancias infecciosas</b></p> |
|  <p>SIMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>NUMERO ROMANO - ROJO<br/>FONDO - BLANCO</p> <p>SIMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>NUMERO ROMANO - ROJO<br/>FONDO - MITAD SUPERIOR AMARILLO,<br/>MITAD INFERIOR BLANCO</p> <p>SIMBOLO Y LEYENDA - NEGRO<br/>NUMERO ROMANO - ROJO<br/>FONDO - MITAD SUPERIOR AMARILLO,<br/>MITAD INFERIOR BLANCO</p> | <p><b>CLASE 7</b><br/><b>Material radiactivo</b></p>                        |
|  <p>SIMBOLO - NEGRO<br/>FONDO - MITAD SUPERIOR BLANCO,<br/>MITAD INFERIOR NEGRA Y LEYENDA BLANCO</p>  | <p><b>CLASE 8</b><br/><b>Material corrosivo</b></p>                         |
|  <p>FONDO - MITAD SUPERIOR BLANCO CON RAYAS NEGRAS,<br/>MITAD INFERIOR BLANCO Y LEYENDA NEGRA</p>  | <p><b>CLASE 9</b><br/><b>Material peligroso Misceláneo</b></p>              |

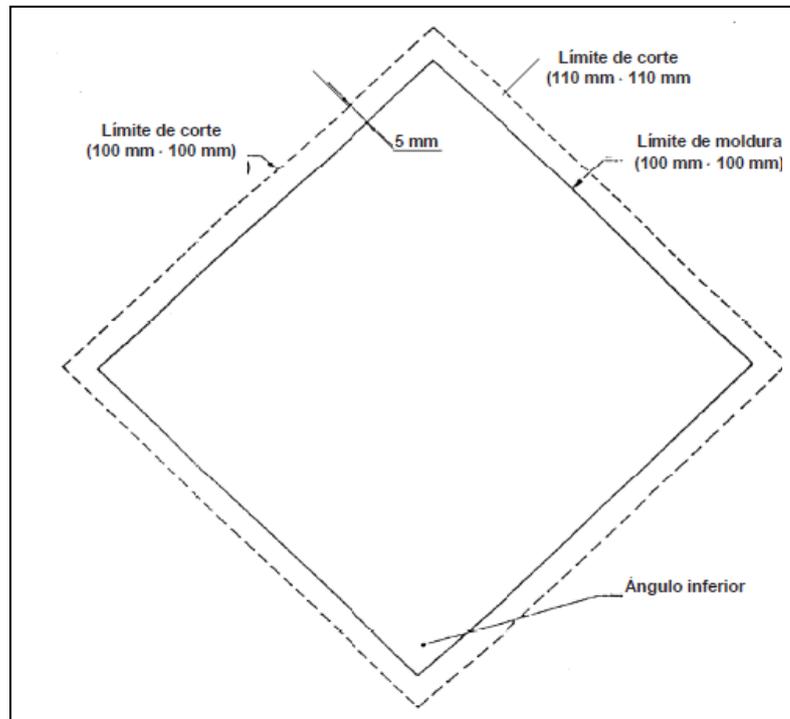
**ANEXO6 – MODELO DE CARTELES PARA LAS UNIDADES DE TRANSPORTE CON NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN SEGÚN INEN-2266**



**NOTA:** Los rótulos para las unidades de transporte:

- Los rombos no deben ser menores a los 250mm por 250mm para el límite de corte, con un margen interno de 12,5 mm.
- Las placas rectangulares anaranjadas no deben ser menores a los 300mm de largo por 120mm de ancho y los dígitos negros de Naciones Unidas no deben tener un alto menor a 65mm.

## **ANEXO7 – MODELO DE RÓTULOS DE PELIGRO PARA ENVASES SEGÚN INEN-2266**



NOTA:

Las etiquetas para los envases:

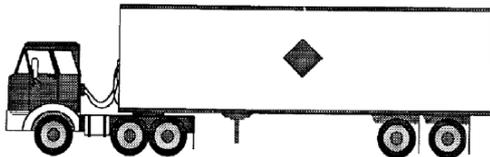
No deben ser menores a los 100mm por 100mm, para el límite de moldura

No deben ser menores a los 110mm por 110mm, para el límite de corte.

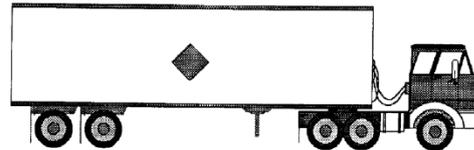
## **ANEXO8 - UBICACIÓN DE LOS CARTELES EN LAS UNIDADES DE TRANSPORTE SEGÚN INEN-2266**

### **8.1 En unidades de un remolque**

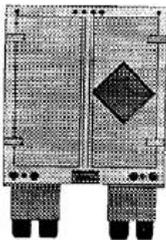
Lado izquierdo



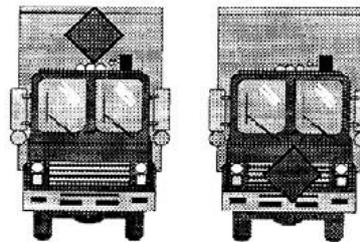
Lado derecho



Parte trasera

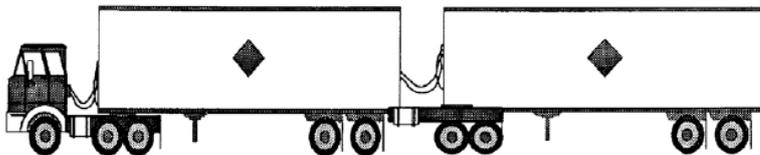


Parte delantera

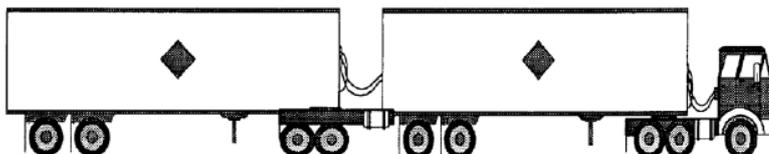


### **8.2 En unidades de doble remolque**

Lado izquierdo

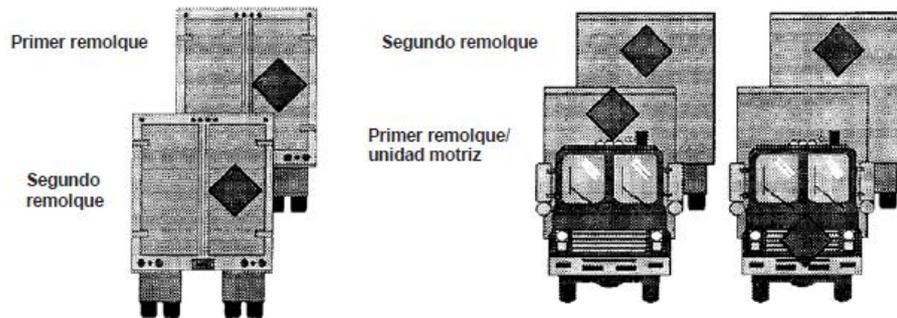


Lado derecho



Parte trasera

Parte delantera



## ANEXO 9: HOJA DE RUTA NORTE

HOJA DE RUTA Nº:001

RUTA: NORTE

RESPONSABLES TRANSPOR \_\_\_

FECHA: 29/01/2015

HORA DE SALIDA:

9:38

| CANTIDAD  |           | CLIENTE:                | FACTURA: | HORA LLEGADA: | HORA SALIDA: | DIRECCION DE ENTREGA:                        | Coordenadas |             | CARGA [kg] | OBSERVACIONES: |
|-----------|-----------|-------------------------|----------|---------------|--------------|--|-------------|-------------|------------|----------------|
| BATERIAS: | CARTONES: |                         |          |               |              |  | X LATITUD   | Y LONGITUD  |            |                |
|           |           | BASE                    | 1        |               | 9:38         | Av. Galo Plaza Lasso y Manuel Zambrano       | -0.128544°  | -78.480709° | 1          |                |
|           | 3         | Sekido                  | 2        | 10:03         |              | Av. Neptalí Godoy, sector Carapungo          | -0.102861°  | -78.451637° | 54         |                |
|           | 9         | Codepartes              | 3        | 10:31         |              | Av. Occidental N70-297 Y Peripa              | -0.109459°  | -78.504374° | 162        |                |
|           | 2         | Astep                   | 4        | 10:53         |              | Av. Pulida y Jorge Piedra                    | -0.140863°  | -78.508909° | 36         |                |
|           | 3         | Tecnillanta             | 5        | 11:20         |              | Av. Amazonas y el Inca                       | -0.159030°  | -78.483367° | 54         |                |
| 3         |           | Tecnillanta             | 5        | 11:20         |              | Av. Amazonas y el Inca                       | -0.159030°  | -78.483367° | 54         |                |
|           | 1         | Comercial JyM           | 6        | 11:34         |              | Av. 10 de Agosto y Murgeón                   | -0.190771°  | -78.493173° | 18         |                |
| 1         |           | Electrocar              | 7        | 11:50         |              | Av. Las Casas y Ruiz de Castilla             | -0.191352°  | -78.498630° | 18         |                |
|           | 2         | El arbolito             | 8        | 12:00         |              | Av. Eloy Alfaro N47-108 y De los Mortiños    | -0.156914°  | -78.466478° | 36         |                |
| 2         |           | Lubrirepuestos JyM      | 9        | 12:20         |              | Av. Habana y Canadá, sector San Juan         | -0.210534°  | -78.508489° | 36         |                |
|           | 1         | Ferreteria el sol       | 10       | 12:43         |              | Av. America y Buenos Aires                   | -0.209765°  | -78.503539° | 18         |                |
|           | 1         | Importaciones Rodrigo   | 11       | 12:49         |              | Alado del consejo provincial, Sector Alameda | -0.216231°  | -78.503026° | 18         |                |
| 4         |           | Autorepuestos Universal | 12       | 13:12         |              | Av. 10 de Agosto N35-72 y Juan Pablo Sanz    | -0.180076°  | -78.488984° | 72         |                |
|           | 14        | Ayasa                   | 13       | 13:59         |              | Avs.Orellana E2-30 y 10 de Agosto            | -0.196156°  | -78.494811° | 252        |                |
| 2         |           | Nelson Unda             | 14       | 14:22         |              | Av. 6 de diciembre y Shyris                  | -0.159710°  | -78.477727° | 36         |                |
| 5         |           | Nelson Unda             | 14       | 14:22         |              | Av. 6 de diciembre y Shyris                  | -0.159710°  | -78.477727° | 90         |                |

Retorno a la base: 15:00

**ANEXO 10: HOJA DE RUTA SUR**

HOJA DE RUTA N°:002

RUTA: SUR

RESPONSABLES TRANSPORTE: \_\_

FECHA: 29/01/2015

HORA DE SALIDA:

9:30

| CANTIDAD  |           | CLIENTE:             | FACTURA: | HORA LLEGADA: | HORA SALIDA: | TIEMPO DE SERVICIO: | DIRECCION:  | Coordenadas |             | CARGA [kg] | OBSERVACIONES:                         |
|-----------|-----------|----------------------|----------|---------------|--------------|---------------------|---|-------------|-------------|------------|--|
| BATERIAS: | CARTONES: |                      |          |               |              |                     |   | X LATITUD   | Y LONGITUD  |            |  |
|           |           | BASE                 | 1        |               | 9:30         |                     | Av. Galo Plaza Lasso y Manuel Zambrano            | -0.128544°  | -78.480709° |            | 1                                      |
|           | 4         | Multiencendido       | 15       | 10:05         | 11:55        | 1:50                | Av. Alonso de Angulo y Lauro Guerrero             | -0.248273°  | -78.526518° |            | 72                                     |
|           | 4         | Multiencendido       |          | 10:05         | 11:55        | 1:50                |   |             |             |            | 72                                     |
|           | 43        | Multiencendido       |          | 10:05         | 11:55        | 1:50                |   |             |             |            | 774                                    |
|           | 13        | Multiencendido       |          | 10:05         | 11:55        | 1:50                |   |             |             |            | 234                                    |
|           | 8         | Multiencendido       |          | 10:05         | 11:55        | 1:50                |   |             |             |            | 144                                    |
|           | 11        | Multiencendido       |          | 10:05         | 11:55        | 1:50                |   |             |             |            | 198                                    |
|           | 1         | Multiencendido       |          | 10:05         | 11:55        | 1:50                |   |             |             |            | 18                                     |
|           | 1         | Juan Carlos Palacios | 16       | 12:00         | 12:05        | 0:05                | Av. Hugo Ortiz y Francisco Ballesteros            | -0.247734°  | -78.530663° |            | 18                                     |
| 3         | 1         | Amada Correa         | 17       | 12:15         | 12:22        | 0:07                | Av. Mariscal Sucre y JJ Canelos                   | -0.245199°  | -78.532851° |            | 72                                     |
| 4         |           | Elsa Morales         | 18       | 12:26         | 12:28        | 0:02                | Av. Balsapamba y Chilibulo                        | -0.246363°  | -78.535597° |            | 72                                     |
| 3         |           | Muñoz Live           | 19       | 12:30         | 12:33        | 0:03                | Av. Mariscal Sucre e Illesscas                    | -0.242293°  | -78.532805° |            | 54                                     |
|           | 1         | Amada Correa         | 17       | 13:00         | 13:03        | 0:03                | Av. Mariscal Sucre y JJ Canelos                   | -0.245199°  | -78.532851° |            | 18 se olvido entregar caja (exhibidor) |
|           | 1         | Autorepuestos km11   | 20       | 13:05         | 13:06        | 0:01                | Av. Maldonado 6495 frente a Mandiesec             | -0.284000°  | -78.536104° |            | 18                                     |
|           | 1         | Luis Vergara         | 21       | 13:12         | 13:15        | 0:03                | Av. Maldonado, sector Guamaní                     | -0.348362°  | -78.549076° |            | 18                                     |
|           | 2         | Romero Solis         | 22       | 13:30         | 13:53        | 0:23                | Av. Maldonado 8618 alado de la revision vehicular | -0.285290°  | -78.536388° |            | 36                                     |
|           | 1         | Llantera del sur     | 23       | 14:00         | 14:02        | 0:02                | Av. Maldonado 9614, alado del TÍA                 | -0.284501°  | -78.536332° |            | 18                                     |

Retorno a la base: 16:03