UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSE DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNA SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS ABIERTO (OVRP), IMPLEMENTANDO LA HEURISTICA DEL VECINO MÁS CERCANO

LUIS ERNESTO RAMÍREZ RODRÍGUEZ
CÓDIGO: 20092017012

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN Y LOGÍSTICA

Bogotá D.C., 20 junio de 2016

UNA SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE RUTEO DE VEHÍCULOS ABIERTO (OVRP), IMPLEMENTANDO LA HEURISTICA DEL VECINO MÁS CERCANO

LUIS ERNESTO RAMÍREZ RODRÍGUEZ
CÓDIGO: 20092017012

Trabajo presentado como requisito para optar por el título de:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN Y LOGÍSTICA

Director:

JOSÉ ANTONIO MESA REYES
Magister en Ingeniería Industrial

Codirectores:

JOHN JAIRO RAMIREZ RODRIGUEZ
Magister en Ingeniería Industrial

CESAR AUGUSTO RAMIREZ RODRIGUEZ
Ingeniero de Alimentos

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN Y LOGÍSTICA

Bogotá D.C., 20 junio de 2016

Tabla de contenido

1 Introducción 4

2 Planteamiento del problema 5

3 Justificación 6

4 Objetivos 7

4.1 Objetivo general: 7

4.2 Objetivos Específicos: 7

5 Metodología. 8

6 Alcance 10

6.1 Exclusiones: 10

7 Marco teórico 11

7.1 El Problema de Ruteo de Vehículos VRP 12

7.1.1 Las siguientes son algunas de las variantes del VRP: 13

7.1.2 Métodos de solución: 14

7.2 El problema de ruteo de vehículos abierto OVRP 16

7.3 Heurística del vecino más cercano 18

8 Ejemplo de solución al Problema de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP utilizando la heurística del Vecino Más Cercano: 20

9 Pseudocódigo – Método de solución del Vecino más cercano: 25

10 Manual de usuario del aplicativo 27

11 Resultados computacionales por instancias 31

12 Análisis comparativo del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado con algunos de los softwares disponibles en Colombia para el diseño de rutas de distribución. 33

13 Conclusiones 44

14 Recomendaciones 46

15 Apéndices 48

15.1 Apéndice A. Código de la heurística del vecino más cercano..... 48

15.2 Apéndice B. Desarrollo del Test realizado con 50 puntos (incluido el depósito) en el aplicativo propuesto. 52

15.2.1 Coordenadas geográficas: 52

15.2.2 Parámetros de entrada: 53

15.2.3 Matriz de distancias generada con el aplicativo propuesto. 54

15.2.4 Resultado arrojado por la heurística del vecino más cercano al problema de ruteo de vehículos abierto 55

15.2.5 Listado con el orden de entrega por ruta, arrojado por el aplicativo propuesto. 55

15.2.6 Grafica de rutas 59

16 Bibliografía 60

Lista de figuras

Figura 1. Mapa Conceptual VRP 11

Figura 2. VRP 13

Figura 3 VRP Vs OVRP 17

Figura 4 Vecino más Cercano. 19

Figura 5. Inclusión primer cliente - Ruta1 21

Figura 6. Inclusión segundo cliente - Ruta 1 21

Figura 7. Inclusión del tercer cliente - Ruta 1 22

Figura 8. Inclusión primer cliente - Ruta 2 22

Figura 9. Inclusión segundo cliente - Ruta 2 23

Figura 10. Inclusión primer cliente - Ruta 3 24

Figura 11. Inclusión segundo cliente - Ruta 3 24

Figura 12. Paso 1. Botón Borrar 28

Figura 13. Paso 2. Ingreso de Coordenadas Geográficas X y Y 28

Figura 14. Paso 3. Registro de Parámetros a tener en cuenta en la generación de rutas 29

Figura 15. Paso 4. Botón Generar Rutas 29

Figura 16. Paso 5. Generación de Rutas 30

Figura 17.Paso 5. Mensaje de generación de rutas finalizado 30

Figura 18. Paso 5. Listado de rutas..... 31

Figura 19. Distancias entre dos puntos. 46

Figura 20. Total, vehículos requeridos 55

Figura 21. Listado de entrega..... 55

Figura 22. Grafica de rutas..... 59

Lista de tablas

Tabla 1. Variante del VRP 13

Tabla 2. Resultados De Test Al Aplicativo..... 32

Tabla 3. Plataforma computacional requerida 34

Tabla 4. Tamaño máximo de los problemas que resuelve el sistema 35

Tabla 5. Desempeño computacional 36

Tabla 6. Funciones de ruteo..... 37

Tabla 7. Funciones de ruteo..... 38

Tabla 8. Capacidad de los algoritmos 39

Tabla 9. Ventanas de tiempo y disponibilidad como plataforma que provee.... 40

Tabla 10. Características del software 41

Tabla 11. Uso del software y capacidad del SIG..... 42

Tabla 12. Información general..... 43

Tabla 13. Coordenadas geográficas (Test 50 puntos) 52

Tabla 14. Matriz de distancias..... 54

1 Introducción

Para las PYMES (Pequeñas y Medianas Empresa), que deben diseñar rutas de distribución para cumplir con las entregas de producto a sus clientes en un periodo de tiempo determinado, existen en el mercado diferentes tipos de software especializados en el ruteo de vehículos que les permitirían suplir esta necesidad, sin embargo los costos de inversión pueden ser muy altos, estos costos pueden incluir el costo de la licencia, el costo de implementación, el costo de equipos especializados, el costo de mantenimiento y el costo de aprendizaje o contratación de personal especializado, por tal razón se hace necesario una solución de bajo costo de inversión.

Unas de las restricciones que debe tener en cuenta algunas de las PYMES para el diseño de rutas de distribución, es que los vehículos contratados para efectuar las entregas no están obligados a regresar al depósito o punto de partida, debido al limitado periodo de tiempo que tienen las PYMES para cumplir con todas las entregas a sus clientes, por esta razón en este tipo de casos de diseño de rutas en el tiempo total de ruta no se tiene en cuenta el tiempo de regreso a planta una vez el vehículo termina de hacer las entregas a unos clientes asignados. Este tipo de problemas ha sido modelado por algunos autores como un Problema de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP (por sus siglas en inglés Open Vehicle Routing Problem) (Emmanouil E. Zachariadis, 2010). El Problema de Ruteo de Vehículo Abierto es una variante del Problema de Ruteo de Vehículos VRP y tiene como característica diferenciadora que los vehículos una vez finalizadas las entregas correspondientes no están obligados a regresar al punto de partida o depósito. Los problemas VRP son considerados de difícil solución mediante el uso de métodos exactos que evalúan todas las posibles soluciones para luego elegir la de menor costo, en este proceso de evaluar las diferentes combinaciones de solución se demanda una gran cantidad de tiempo computacional, sobre todo cuando se quiere diseñar rutas con instancias grandes, lo que ha obligado a hacer uso de otros métodos de solución como lo son las heurísticas, estos métodos de solución proporcionan una solución factible, en un tiempo computacional razonable. Una de estas heurísticas es conocida como el método de solución del Vecino más cercano, este algoritmo genera rutas uniendo puntos de manera secuencial, teniendo en cuenta como criterio de decisión la incorporación del punto con menor distancia iniciando desde el depósito.

Se determinó que la metodología a utilizar en el desarrollo de este trabajo de grado es del tipo aplicativa, cuya finalidad es hacer uso de un conocimiento para solucionar un problema concreto.

Como resultado de este trabajo se implementación de la heurística del Vecino más cercano como método de solución para el problema de OVRP en el lenguaje de programación de Visual Basic de Excel. Este aplicativo proporciona una solución

factible en un tiempo computacional razonable, determinando la cantidad de rutas necesarias para efectuar la entrega de bienes a una cantidad determinada de clientes.

En la última parte de este documento se deja el apéndice A con el código desarrollado en Visual Basic de Excel bajo la lógica del algoritmo del Vecino más cercano para solucionar casos de distribución que se asemejan a un problema de ruteo de vehículos abierto y un apéndice B donde se muestra el resultado del aplicativo diseñando rutas de entrega para 50 clientes.

2 Planteamiento del problema

De manera general las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES) deben elaborar rutas para la entrega de sus productos. En medio de este diseño se encuentra que es tan importante el diseño de la ruta, como el tiempo de diseño de la misma, el cual permite tomar decisiones logísticas posteriores a tiempo y de esta manera cumplir con los compromisos de entrega adquiridos. En este sentido el mercado ofrece diferentes tipos de software especializados en el ruteo de vehículos que permiten suplir esta necesidad, sin embargo los costos de inversión pueden ser altos (entre los US$ 10.000 y US$60.000) (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007) superando el ahorro que este pueda generar, dentro de los costos podemos encontrar: costo de la licencia, costo de implementación, costo de equipos especializados, costo de mantenimiento y costo de aprendizaje o contratación de personal especializado (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007), ante esta situación algunas PYMES pueden tomar la decisión de diseñar rutas de entrega de forma manual, apoyándose con personal con experiencia, con mapas o con el agrupando direcciones por cercanía (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007), Entre las desventajas que se pueden encontrar son: El diseño de rutas de forma manual pude ser mayor que si se hiciera apoyándose con una herramienta informática especializada, se corre el riesgo de crear rutas con desplazamientos extensos, incumplimiento con los tiempos de entrega y el incremento en la ejecución del presupuesto destinado.

Por las anteriores razones se hace necesario presentar una alternativa de solución para el ruteo de vehículos a un bajo costo de inversión, en la que se pueda determinar el número de rutas (equivalente a la cantidad de vehículos) necesarias que las PYMES efectúen la distribución de productos a nivel geográfico en una ciudad como Bogotá, cumpliendo con los compromisos de entrega adquiridos con sus clientes.

La alternativa que se pretende presentar con el desarrollo de este trabajo de grado responde a la siguiente pregunta ¿Cuántos vehículos se requieren para realizar las entregas, a un bajo costo de operación, entendido como el costo que se deriva por la distancia recorrida?, para los casos en donde las empresas no tienen una flota

de vehículos propia o la flota de vehículos es insuficiente para satisfacer el total de entrega de productos a sus clientes geográficamente dispersos, en estos casos los vehículos contratados no están obligados a regresar al depósito o punto de abastecimiento después de que hayan cumplido con efectuar el total de las entregas asignadas. Este caso se describe como un problema de ruteo de vehículos abierto (OVRP) (Emmanouil E. Zachariadis, 2010), teniendo en cuenta las siguientes restricciones: i. Se tiene un solo depósito. ii. Partiendo del depósito se debe visitar cada punto de entrega exactamente una vez. iii. Existe una misma promesa de horario de entrega[1] para todos los clientes que limita la disponibilidad de tiempo máximo de ruta (tiempo que trascurre desde que el vehículo sale de la planta hasta que hace la última entrega asignada antes de la hora acordada con el cliente). iv. El vehículo inmediatamente después de visitar su último punto de entrega asignado no tiene que regresar al depósito[2].

3 Justificación

En este trabajo de grado se propone una alternativa de solución para las PYMES (Pequeñas y Medianas Empresas) que deben diseñar rutas de distribución con el fin de garantizar la entrega de sus productos y para su diseño deben tener en cuenta las siguientes restricciones: **i**. Se tiene un solo depósito. **ii**. Partiendo del depósito se debe visitar cada punto de entrega exactamente una vez. **iii**. Existe una misma promesa de horario de entrega para todos los clientes que limita la disponibilidad de tiempo máximo de ruta. **iv**. El vehículo inmediatamente después de visitar su último punto de entrega asignado no tiene que regresar al depósito. Este problema algunos autores lo han modelado como el Problema de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP (por sus siglas en inglés Open Vehicle Routing Problem), como Zachariadis et al. (Emmanouil E. Zachariadis, 2010), (Aksen, Özyurt, & Aras, 2007), (Letchford, Lysgaard, & Eglese, 2006). El OVRP es una variante del Problema de Ruteo de Vehículos VRP.

Para la solución de este problema existen en el mercado diferentes tipos de software especializados en el ruteo de vehículos que les permitirían suplir esta necesidad (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007), sin embargo los costos de inversión pueden ser muy altos por tal razón se hace necesario una alternativa de solución de bajo costo de inversión que le permita a las empresas PYMES tomar decisiones logísticas posteriores a tiempo y de esta manera cumplir con los compromisos de entrega adquiridos.

---

[1] Es la hora fin de ruta, en la cual todos los vehículos deben finalizar sus entregas, por ejemplo, toda la entrega de las rutas se debe hacer antes de las 8 a.m. porque después de esta hora los clientes ya no reciben por que deben dedicarse a otras actividades cotidianas.

[2] Esto a razón de que se contrata el vehículo con la capacidad de carga suficiente para efectuar las entregas en un tiempo determinado.

Los problemas VRP son considerados de difícil solución por medio del uso de métodos exactos (Daneshzand, 2011), puesto que demandan demasiado tiempo computacional para obtener la solución óptima (evaluando todas las soluciones posibles para luego elegir la solución óptima de menor costo), sobre todo si trabaja con instancias grandes (cantidad de puntos de entrega). Esto ha hecho que se recurra a solucionar este tipo de problemas con métodos heurísticos que proporcionan soluciones cercanas a la óptima en un tiempo computacional razonable (Calviño Martínez , 2011). Debido a esto se ha elegido para su implementación la heurística del *Vecino más Cercano* (Dhahri, Zidi, & Ghedira, 2012) como método de solución al problema de ruteo de vehículos abierto OVRP, este método proporciona una solución práctica que cumple con la función objetivo del problema de ruteo, minimizar el costo total de distancia recorrida.

La implementación de la heurística del *Vecino más cercano* se desarrollará en el lenguaje de programación de *Visual Basic de Excel*, con la finalidad de determinar la cantidad de rutas necesarias para efectuar la entrega de una determinada cantidad de puntos, teniendo en cuenta las restricciones anteriormente descritas.

Académicamente, este trabajo permite aplicar los conocimientos adquiridos en la Especialización en Ingeniería de Producción y Logística, específicamente en el área de Logística Industrial y Métodos Cuantitativos para la Producción y Logística.

4 Objetivos

4.1 Objetivo general:

Presentar una alternativa de solución de ruteo de vehículos para las pequeñas y medianas empresas (PYMES), que deben diseñar su distribución como un caso que se ajusta al problema de ruteo de vehículo abierto (OVRP), a partir de la estructuración de la heurística del *Vecino más cercano* en Visual Basic.

4.2 Objetivos Específicos:

1. Hacer una revisión de lectura sobre el Problema de Ruteo de Vehículos Abierto *(Open Vehicle Routing Problem OVRP)*, como soporte teórico para el desarrollo de la alternativa de solución, consultando fuentes de información secundaria.

2. Hacer una revisión de lectura sobre el método de solución *Heurística del Vecino más cercano,* como soporte teórico para el desarrollo de la alternativa de solución, consultando fuentes de información secundaria.

3. Diseñar y estructurar aplicativo con el algoritmo de la heurística del Vecino más cercano en Visual Basic de Excel, como un método de solución para los casos de diseño de rutas de distribución ajustado a un planteamiento de OVRP.

4. Presentar los resultados computacionales del aplicativo para diferentes instancias[3].

5. Elaborar un manual con la información necesaria para que el usuario pueda utilizar el aplicativo.

6. Realizar análisis comparativo del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado con algunos de los softwares disponibles en Colombia para el diseño de rutas de distribución.

5 Metodología.

El tipo de investigación que se realizara en este trabajo es *Aplicada*, cuya finalidad es obtener conocimiento útil para resolver un problema concreto.

La metodología aplicada que se tendrá en cuenta para el cumplimiento de los objetivos específicos propuestos es la siguiente:

1. Para el primer objetivo específico de hacer una revisión de lectura sobre el Problema de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP, en este objetivo se busca responder a las preguntas ¿En qué consiste el OVRP?, para la recolectar la información se tendrá en cuenta las fuentes de información secundaria, consultando estudios y análisis previos realizados por alguna persona u organización, registrando las fuentes bibliográficas.

2. Para el segundo objetivo específico de hacer una revisión de lectura sobre hacer una revisión de lectura sobre el método de solución Heurística del Vecino más cercano, en este objetivo se busca responder a las preguntas ¿En qué consiste la heurística del Vecino más cercano?, ¿Cómo se implementa?, para la recolectar la información se tendrá en cuenta las fuentes de información secundaria, consultando estudios y análisis previos realizados por alguna persona u organización, registrando las fuentes bibliográficas.

3. Para el tercer objetivo específico sobre el diseño y estructuración del aplicativo con el algoritmo de la heurística del Vecino más cercano en Visual Basic de Excel

   El diseño del aplicativo se efectuará a partir del pseudocódigo de Visual Basic de Excel, teniendo en cuenta los siguientes puntos:

   i. La lógica del algoritmo del *vecino más cercano* y las restricciones planteadas para el *problema de ruteo de vehículos abierto* OVRP.

   ii. La información de entrada: Los códigos de identificación de los puntos de entrega y del depósito, las coordenadas geográficas de los puntos de

[3] Conjunto de puntos de entrega ubicados geográficamente dispersos.

entrega y del depósito, el tiempo total de ruta[4], el tiempo promedio de entrega[5] y la velocidad promedio de desplazamiento del vehículo.

iii. La información de salida: Como resultado el listado de rutas.

En la estructuración se hará en un archivo de Excel donde se muestra como estos componentes se interconectan, para ser funcionales, generando a partir de unos datos de entrada una determinada cantidad de rutas de distribución.

4. Para cumplir con el objetivo de presentar los resultados computacionales del aplicativo para diferentes instancias, se ejecutara el aplicativo con diferentes listados de puntos[6] geográficamente dispersos, se depuraran los errores que se puedan generar y cuando ya no se presenten errores[7], se tomara el registro del tiempo computacional de solución y el total de rutas generadas para cada listado.

5. El manual del usuario estará compuesto los siguientes módulos:

   i. Parámetros de entrada: En este módulo se señalará la información que se debe tener en cuenta para ejecutar el aplicativo.

   ii. Pasos para ejecutar el aplicativo: En este módulo se hará una explicación detallada desde abrir el aplicativo, ingresar los parámetros de entrada, ejecutar el aplicativo hasta la interpretación de los listados de rutas generados.

6. El análisis comparativo del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado con los algunos de los softwares disponibles en Colombia para el diseño de rutas de distribución, se desarrollara teniendo en cuenta el estudio sobre la caracterización de este tipo de software, realizado por los estudiantes de la universidad de Antioquia (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007) con el fin identificar las ventajas y desventajas del aplicativo.

---

[4] Intervalo de tiempo que inicia en el momento que el vehículo sale del depósito y finaliza con la entrega del último punto de entrega asignado antes de la promesa de entrega

[5] Intervalo de tiempo que inicia en el momento de llegada del distribuidor al punto de entrega, descarga, formaliza la entrega y finaliza en el instante que el vehículo sale del punto dirigiéndose a otro lugar

[6] Se hará listado o para 50, 100, 200, 1000, 2000, 3000 y 4000 puntos. Cada listado de puntos estará conformado con los códigos de identificación y las coordenadas geográficas de cada uno de los puntos y del depósito.

[7] “Errores de compilación: Errores por escribir mal el código. Errores de Ejecución: Solucionando operaciones imposibles de resolver. Errores Lógicos: Errores donde el programa hace lo que no estaba previsto, generando resultados no esperados” (Microsoft, 2016).

6 Alcance

Implementar una heurística de vecino más cercano para la solución del problema OVRP con las siguientes características:

- Se tiene un solo depósito, de donde salen las rutas de distribución.
- Partiendo del depósito se debe visitar cada punto de entrega exactamente una vez.
- Los vehículos no están obligados a regresar al depósito, después de cumplir con las entregas asignadas.
- Existe una misma promesa de horario de entrega o ventana de tiempo para todos los clientes que limita la disponibilidad de tiempo máximo de ruta.

La heurística del Vecino más cercano será implantada en lenguaje de programación de Visual Basic de Excel.

El aplicativo en su solución, determinara la cantidad de rutas necesarias para efectuar las entregas.

Al ejecutar el aplicativo se generará un listado de rutas con el respectivo orden de entrega.

6.1 Exclusiones:

- El aplicativo no genera las gráficas de las rutas.
- El aplicativo en su ejecución no tiene en cuenta la capacidad de carga. La capacidad de carga de los vehículos es ilimitada[8]. Se asume que al cierre de pedidos diario se generan las rutas, seguidamente se realiza un análisis por ruta, totalizando peso y/o volumen con el fin de contratar el vehículo correspondiente para cada ruta.

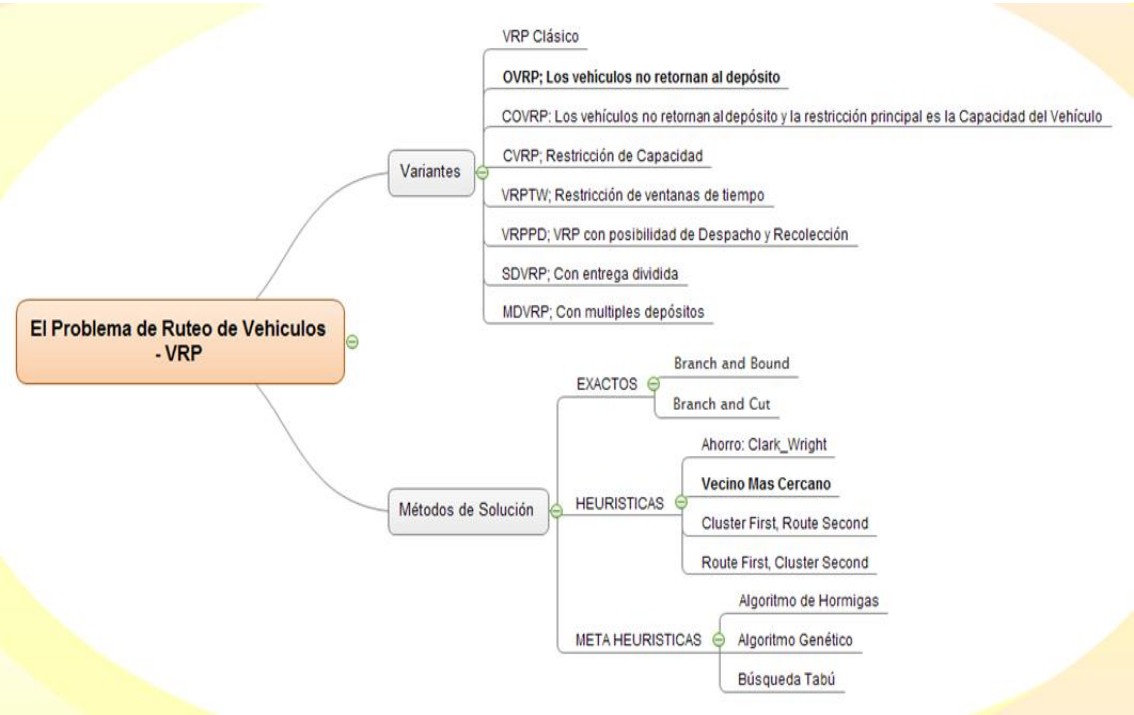
[8] La restricción de capacidad de carga de los vehículos ilimitada es debido a que se maneja el supuesto de que no se tiene flota de vehículos propios por lo que para efectuar la distribución se debe contratar vehículos con la capacidad necesaria para hacer las entregas asignadas satisfactoriamente.

7 Marco teórico

Algunas empresas Pymes entre sus operaciones de negocio se encuentra el diseño de rutas con el objetivo de garantizar la entrega de sus productos en el tiempo y lugares acordados con sus clientes a un bajo costo de distribución. Para nuestro caso de estudió se tendrán en cuenta las siguientes restricciones i. Se tiene un solo depósito. ii. Partiendo del depósito Se debe visitar cada punto de entrega exactamente una vez. iii. Existe una misma promesa de entrega para todos los clientes que limita la disponibilidad de tiempo total de ruta. iv. El vehículo inmediatamente después de visitar su último punto de entrega asignado no debe regresar al depósito. Este tipo de problema se ajusta a la variante del problema de ruteo de vehículos VRP conocida como el Problema de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP la cual tiene como característica diferenciadora de los demás VRP que los vehículos una vez salen del depósito, dirigiéndose a los diferentes puntos de entrega asignados no deben regresar al depósito, trabajado por algunos atores como (Emmanouil E. Zachariadis, 2010).

En el siguiente mapa conceptual de la figura 1, se puede visualizar la forma en que se desagrega en este capítulo el Problema de Ruteo de Vehículos VRP, en un primer nivel se mencionaran las diferentes variaciones del problema de ruteo de vehículos y en el segundo nivel se mencionan sus diferentes métodos de solución.

Figura 1. Mapa Conceptual VRP



Fuente: Autor

7.1 El Problema de Ruteo de Vehículos VRP

Los VRP son considerados como problemas del tipo NP-Difícil, puesto que pueden ser resueltos por métodos matemáticos exactos mientras estos problemas solo puede resolver problemas con menos de 100 clientes y con una tasa de éxito variable (Baldacci, Christofides, & Mingozzi, 2008), pueden abordar los problemas de escala pequeña y moderada (Hirabayashi, Saruwatari, & Nishida, 1992), (Belenguer & Benavent, 2003) (Longo, De Araga˜o, & Uchoa, 2006).

El objetivo del VRP es determinar el número de rutas de menor costo, utilizando la menor cantidad de vehículos para transportar bienes entre un almacén o depósito y un número determinado de clientes dispersos geográficamente, cada uno de estos clientes debe tener una demanda asociada que debe ser satisfecha por solo uno de los vehículos, cada ruta inicia su recorrido desde el depósito pasa por un subconjunto de clientes y finaliza regresando al depósito (Toth & Vigo, 2002).

Generalmente la formulación del modelo tiene las siguientes características:

Minimizar: Costos, en tiempo de viaje o distancia y número de vehículos.

Sujeto a:

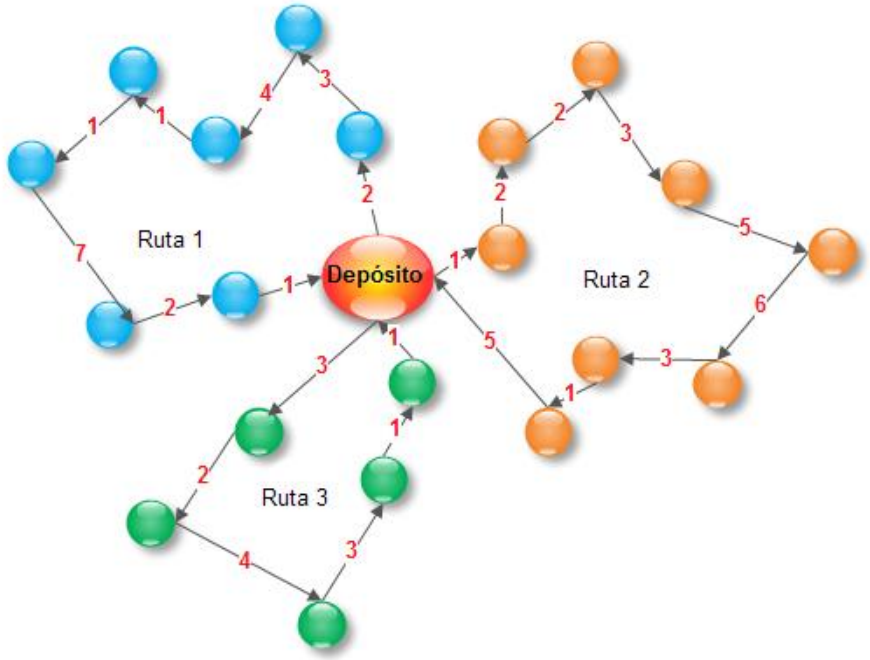
- Todos los clientes deben ser atendidos una sola vez.
- Todos los vehículos inician y finalizan en el depósito.
- Tiempo de ruta para cada vehículo debe ser menor o igual a la disponibilidad del tiempo total de ruta.
- La carga total para atender a los clientes de cada vehículo debe ser menor o igual a la capacidad de cada vehículo.

Restricciones adicionales que puede tener:

- Cada cliente debe ser atendido en un periodo de tiempo específico.
- La cantidad de vehículos usados debe ser menor o igual a la cantidad de vehículos disponibles.

En la figura 2 se encuentra un ejemplo de rutas determinadas por la solución a un VRP, que tienen un recorrido que inicia desde el depósito, pasan por un subconjunto de clientes en una determinada secuencia y finaliza regresando al depósito.

Figura 2. VRP



Fuente: Autor

7.1.1 Las siguientes son algunas de las variantes del VRP:

Según Gendreau et al. (Gendreau, Laporte, & Potvin, 2002), Parragh et al. (Parragh, Doerner, & Hartl, 2008) Se listan los siguientes tipos de VRP en la tabla 1.

Tabla 1. Variante del VRP

Variantes	Enfoque
VRP Clásico	El objetivo es encontrar un conjunto de rutas de mínimo costo, que salen del depósito entregan un subconjunto de clientes y regresan al depósito.
OVRP	Al finalizar la entrega, los vehículos no están obligados a volver al depósito.
COVRP	Es una variante del OVRP, donde además de no estar obligado a volver al depósito, tiene como restricción la capacidad del vehículo
CVRP	Los Vehículos tienen una capacidad limitada.
VRPTW	Con Ventanas de Tiempo, los clientes tienen asignado un intervalo de tiempo para ser atendidos.
VRPPD	Con Entrega y recogida, los clientes tienen la posibilidad de recibir y/o devolver bienes.

SDVRP	Con Entrega Dividida, Donde se permite que un cliente pueda ser atendido por varios vehículos, su demanda excede la capacidad de un vehículo, ejemplo algunas constructoras son visitadas por varios camiones especializados para cargar concreto de construcción.
MDVRP	Con Múltiples Depósitos, en este caso existen varios depósitos con una flota de vehículos independiente.

Fuente: Autor

7.1.2 Métodos de solución:

Los métodos de solución se pueden agrupar en tres grupos según (Toth & Vigo, 2002) así:

Métodos Exactos:

Dada la complejidad de los problemas para encontrar soluciones optimas, por ser clasificados como un problema de optimización combinatoria, estos métodos pueden ser utilizados para estancias con pocos puntos, la búsqueda exhaustiva de la solución óptima no resulta eficiente computacionalmente (Orrego Cardozo, 2013). A continuación se presentan algunos métodos considerados exactos.

- **Método de Branch and Bound**: Esta técnica de solución consiste en dividir el problema en problemas más pequeños, resolverlos de forma individual y finalmente consolidar las soluciones generando una solución al problema original. (Bakarcic & Di Piazza, 2012).

- **Método de Branch and Cut**: Este algoritmo desciende del método Branch and Bound, el algoritmo de Branch and Cut detecta las ramificaciones que proporcionan soluciones distantes de la óptima para podarlas, de esta manera aprovecha sus recursos para encontrar la solución óptima. (Bakarcic & Di Piazza, 2012).

Heurísticas:

Las heurísticas son algoritmos con los que se encuentran soluciones aproximadas a las soluciones óptimas, en un tiempo computacional razonable (Olivera, 2004). Entre estas podemos mencionar:

- **La heurística de Clark & Wright**: El algoritmo parte dos rutas originales, las cuales al combinarlas forman una nueva ruta dando como resultado un ahorro en el costo dejando una sola ruta (Lysgaard & Sørensen, 1997).

- **La Heurística del Vecino más Cercano**: Este algoritmo construye las rutas secuencialmente, seleccionando de manera iterativa los puntos con menor distancia para insertarlos a la ruta (Contreras P. & Díaz D., 2010).

- **Cluster First, Route Second**: Este algoritmo trabaja en dos fases, en la primera fase agrupa los puntos teniendo en cuenta las restricciones de capacidad del vehículo y en la segunda fase se crean las rutas (Prins, Lacomme, & Prodhon, 2014).

- **Route First, Cluster Second**: El algoritmo se desarrolla en dos fases, en la primera fase se hace un ruteo donde se visitan los clientes y en la segunda se crean los cluster basados en las restricciones de capacidad. (Beasley, 1983) (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009).

Metaheuristicas:

Las metaheurísticas tienen como objetivo explorar eficientemente espacios de búsqueda de soluciones más cercanas a las soluciones óptimas, mejorando procedimientos heurísticos generales. El término metaheurística se obtiene de anteponer a heurística el sufijo “meta” que significa “más allá” (Blum & Roli, 2001), Los algoritmos metaheurísticos no visitan de manera iterativa cada elemento en el espacio de busqueda, en realidad guian su proceso de busqueda hacia las regiones que pueden contener soluciones de lata calidad (Dib , Manier , Moalic , & Caminada , 2015). A continuación, se describen algunas de estas:

- **Algoritmo de Colonia de Hormigas**: Tiene en cuenta el camino de salida de la colonia en busca de alimento, inicialmente salen de manera aleatoria y una vez encuentran su alimento regresan dejando un rastro de feromona que le permite a otras hormigas seguir este mismo camino, reforzando así las mejores soluciones, En el caso de las hormigas artificiales estas crean sus soluciones secuencialmente moviéndose de un estado del problema a otro, las hormigas artificiales manejan una feromona artificial que es la modificación de valores numéricos, este mecanismo le permite a las hormigas olvidar la historia y enfocarse en nuevas direcciones de búsqueda prometedoras. (Franco, 2010).

- **Algoritmo Genético**: Este algoritmo se fundamenta en la teoría de selección natural, dirige su búsqueda en la información que dio mejores resultados para dar una mejor solución, eliminando la información que no proporcione mejores soluciones (Franco, 2010), (Dib , Manier , Moalic , & Caminada , 2015).

- **Algoritmo de Búsqueda Tabú**: Su característica más distintiva es el uso de memoria adaptativa. Usa una memoria de corto plazo para evitar ciclos de búsqueda, esta memoria es implementada

como una lista tabú que mantiene registros de atributos de soluciones ya visitadas recientemente, estos atributos pueden ser movimientos o diferencias entre dos soluciones, con la lista Tabú se permite filtrar las soluciones permitidas, con lo que se corre el riesgo de excluir buenas soluciones, para este caso se implementa un criterio de aspiración que permite incluir una solución que estaba prohibida (Franco, 2010), (Dib , Manier , Moalic , & Caminada , 2015).

7.2 El problema de ruteo de vehículos abierto OVRP

El modelo de ruteo OVRP es una variante del VRP, donde los vehículos no están obligados a regresar al depósito después de cumplir con un conjunto de nodos cliente haciéndoles sus respectivas entregas y entregando al último cliente (Emmanouil E. Zachariadis, 2010).

Este problema tiene dos tipos de variantes, una donde no existe deposito por lo que cada ruta puede iniciar y terminar en cualquier nodo (Usberti, França, & França, 2011) y otra donde cada ruta debe comenzar desde un deposito (Fung & Liu , 2012), que es el caso de estudio en este trabajo.

El objetivo principal es diseñar una serie de caminos de mínima distancia que le permita hacer uso de una menor cantidad de vehículos necesarios para satisfacer la demanda de unos clientes asignados (Emmanouil E. Zachariadis, 2010). De las actividades de entrega que se ajustan en este modelo, encontramos las rutas de distribución de diarios, la generación de rutas de entregas para aviones y las rutas escolares.

La formulación general del modelo OVRP tiene las siguientes características:

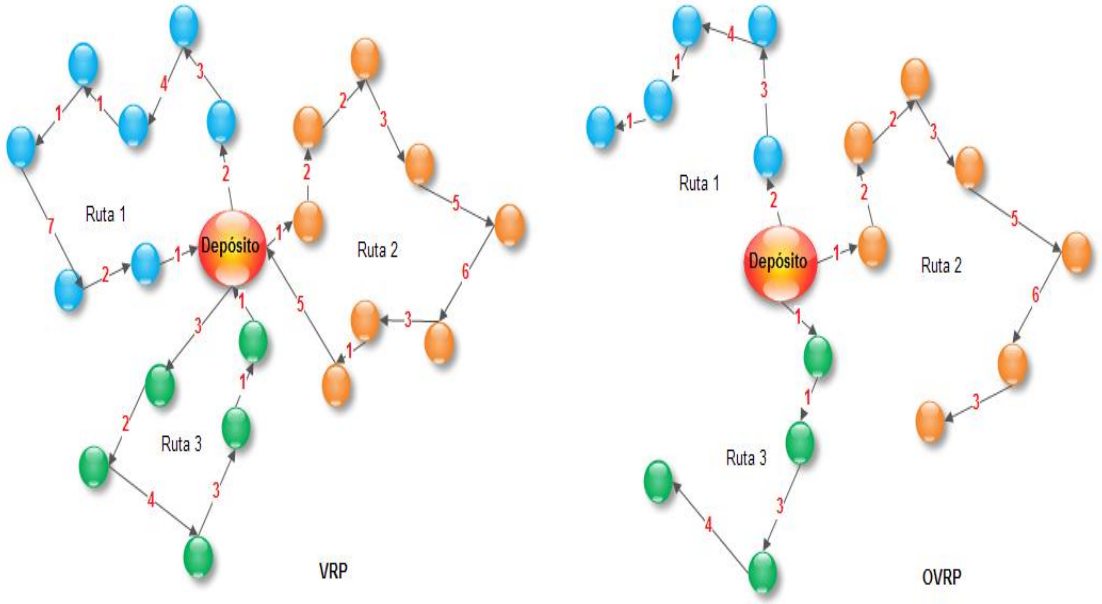
Minimizar: Costos, en tiempo de viaje o distancia y número de vehículos.

Sujeto a:

- Todos los clientes deben ser atendidos una sola vez.
- Todos los vehículos inician desde el depósito y finalizan hasta que entregan el último cliente, estos no están obligados a regresar al depósito.
- Tiempo de ruta para cada vehículo debe ser menor o igual a la disponibilidad del tiempo total de ruta.
- La carga total para atender a los clientes de cada vehículo debe ser menor o igual a la capacidad de cada vehículo.

En la figura 3, se aprecia visualmente la diferencia de entre el VRP y el OVRP, respectivamente.

Figura 3 VRP Vs OVRP



Fuente: Autor

Para la solución de problemas de ruteo de vehículos abierto OVRP, en la literatura se han propuesto algunos algoritmos heurísticos (Sariklis & Powell, 2000) quien propone una heurística para resolver un problema de ruteo abierto capacitado, (Brandão, 2004) diseña un algoritmo de búsqueda tabú como método de solución a un problema de ruteo de vehículos abierto, Adam N Letchford el al. 2007 propone el algoritmo de Branch and Cut para el Problema de Vehículos Abierto Capacitado COVRP (Adam N Letchford, 2007). ii. Zachariadis et al. 2010 propone una metaheurística para examinar soluciones de vecino más cercano, en la variación del problema de ruteo de vehículos conocido en inglés como Open Vehicle Routing Problem OVRP (Emmanouil E. Zachariadis, 2010). En cuanto a métodos exactos (Letchford, Lysgaard, & Eglese, 2006) propone un algoritmo de ramificación y corte para solucionar un OVRP. Para el desarrollo de este trabajo de grado se propone el algoritmo de la heurística del Vecino más cercano como método de solución para los Problemas de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP, entre las restricciones del OVRP, se manejara la restricción de capacidad ilimitada a razón de que se puede contratar los vehículos con la capacidad necesaria para que haga las ruta de entrega, proporcionara una solución factible en un tiempo computacional razonable, lo que permitirá a las empresa Pymes mediante su uso garantizar la entrega de productos en el tiempo y lugares acordados con un costo mínimo de distancia total recorrida.

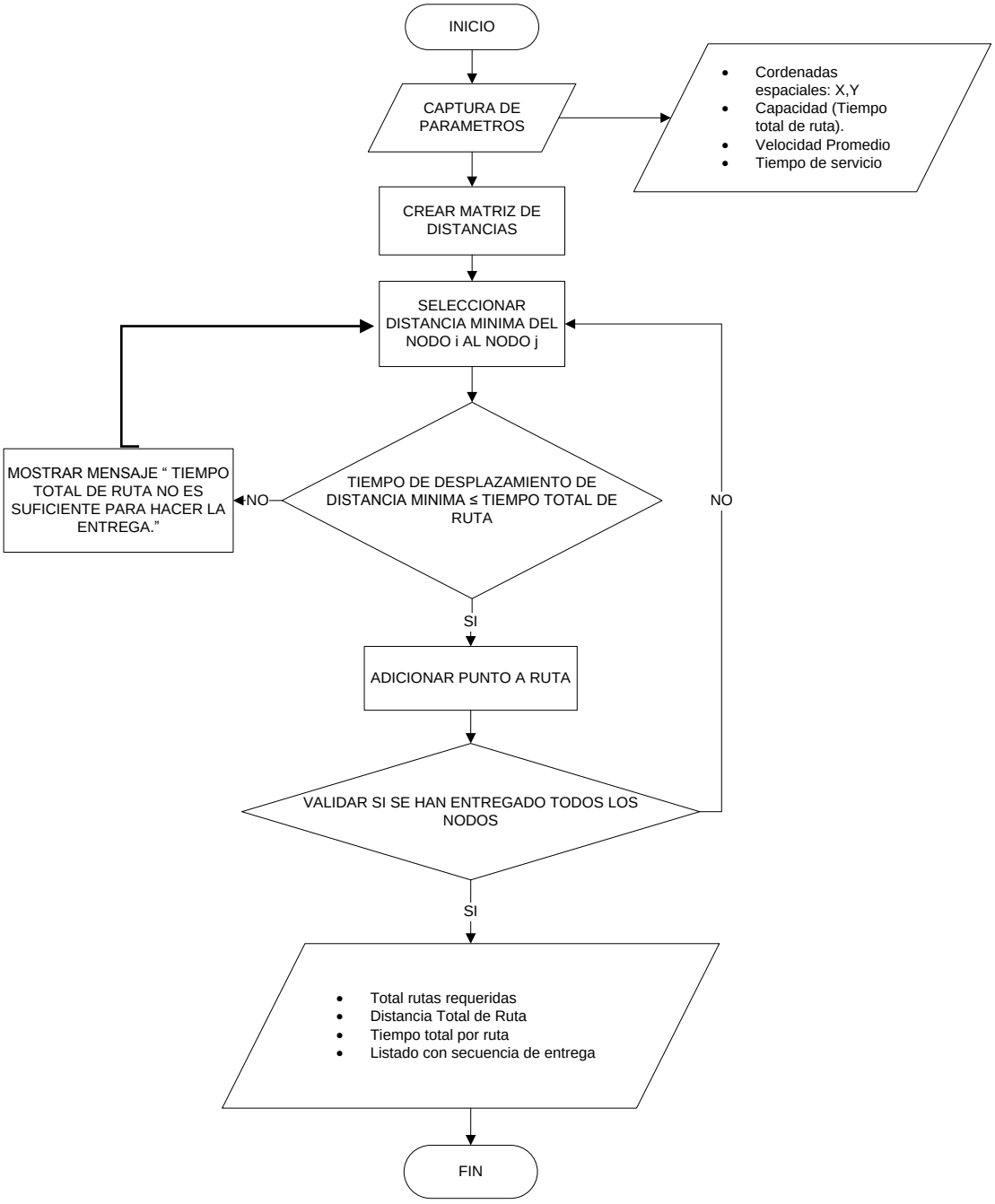
7.3 Heurística del vecino más cercano.

El algoritmo de vecino más cercano genera rutas uniendo vértices o puntos, teniendo en cuenta la menor arista o distancia euclidiana de un punto a los demás puntos, esta secuencia de inserción de puntos, inicia desde el depósito, incorporando el punto más cercano, después de ser incluido se inicia la búsqueda del siguiente punto a ser incluido, con la menor distancia al anterior punto incluido (Micó Andrés, 1996), (Contreras P. & Díaz D., 2010), para la incorporación de los puntos se puede tener en cuenta la restricción de capacidad del vehículo, de distancia total de ruta, de tiempo total de ruta o la combinación de estas tres. Para nuestro tema de estudio la restricción es el tiempo total de ruta. La inserción de puntos se realiza de manera secuencial hasta que se hayan incorporado todos los puntos.

Los recorridos se realizan en la matriz de distancias, que inician seleccionando la menor distancia desde el depósito hacia los demás clientes, los empates se rompen arbitrariamente, para esto es necesario que las distancias del depósito hacia los demás clientes se encuentren en la primera fila de la matriz, en el siguiente capítulo, se ilustra un ejemplo del método de solución del vecino más cercano para el problema de ruteo de vehículo abierto OVRP.

En la figura 4. Se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento de la heurística del Vecino más cercano, para solucionar un problema de ruteo de vehículo abierto CVRP.

Figura 4 Vecino más Cercano.



Fuente: Autor

8 Ejemplo de solución al Problema de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP utilizando la heurística del Vecino Más Cercano:

Mediante la explicación del siguiente ejemplo se busca dar una mayor claridad de la forma en que se resuelve en la práctica el Problema de Ruteo de Vehículos Abierto OVRP mediante el uso de la heurística del Vecino más cercano.

Planteamiento del problema OVRP:

La empresa Desayunos Sorpresa dedicada a la venta de desayunos sorpresa por internet debe entregar desayunos a siete clientes dispersos geográficamente y necesita saber ¿cuántos vehículos debe contratar para realizar la entrega de los desayunos?

El compromiso es entregar cada desayuno antes de las 6 a.m. ya que después de esta hora sus clientes deben prepararse para atender sus actividades cotidianas y se les dificultaría recibir el desayuno sorpresa. Para efectuar las entregas se deben tener en cuenta las siguientes restricciones de tiempo:

- ✓ Teniendo en cuenta el horario de entrega antes de las 6.a.m. la preparación de los desayunos, la empresa calcula un tiempo máximo de ruta por vehículo de 25 min, iniciando desde el depósito (en este caso el depósito es la casa en donde se preparan los desayunos).
- ✓ Se estima un tiempo promedio de servicio de 2 min por cliente; este tiempo inicia desde que el vehículo llega al punto, descarga, formaliza la entrega del desayuno y finaliza una vez inicia la marcha para dirigirse al siguiente punto de entrega.

Solución al problema:

Para iniciar con la solución debemos elaborar la matriz de costos **Cij**, que contenga los costos de desplazamiento iniciando desde el depósito hacia los clientes, el costo viene dado por el tiempo (en minutos) de desplazamiento desde **i** hasta **j**.

Para iniciar con la inclusión del primer cliente a la primera ruta, se debe ubicar en la primera fila de la matriz los valores de los tiempos de desplazamiento del depósito hacia los demás clientes, seleccionando el cliente con menor tiempo de desplazamiento desde el depósito, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 5. Inclusión primer cliente - Ruta1

Clientes

i \ j	Depósito	1	2	3	4	5	6	7
Depósito	0	13	11	9	10	8	5	12
1	13	0	11	7	4	8	11	9
2	6	11	0	5	8	6	7	14
3	9	7	5	0	7	5	9	6
4	10	4	8	7	0	17	22	11
5	5	8	6	5	17	0	7	5
6	8	11	7	9	22	7	0	9
7	12	9	14	6	11	5	9	0

Clientes

Fuente: Autor

En la figura 5. Podemos observar que el cliente con menor tiempo desde el depósito es el 6, con un tiempo de desplazamiento de C_{06}=5 minutos, para su inclusión, primero se debe validar que el tiempo de desplazamiento más el tiempo de servicio no exceda la restricción de disponibilidad de tiempo máximo de ruta [*tiempo máximo de ruta – (tiempo de desplazamiento* C_{ij} *+ tiempo de servicio)*] ≥ 0; teniendo 25 – (5+2) = 18 minutos como nueva disponibilidad de tiempo total de ruta. Como se puede observar cada que se incluye un punto, la disponibilidad de tiempo máximo de ruta va disminuyendo. Para la siguiente inclusión se elimina la columna del cliente 6 y se inicia la búsqueda del menor tiempo de desplazamiento desde la fila del anterior cliente incluido (cliente 6), como se muestra en la siguiente figura.

Figura 6. Inclusión segundo cliente - Ruta 1

Clientes

i \ j	Depósito	1	2	3	4	5	7
Depósito	0	13	11	9	10	8	12
1	13	0	11	7	4	8	9
2	6	11	0	5	8	6	14
3	9	7	5	0	7	5	6
4	10	4	8	7	0	17	11
5	5	8	6	5	17	0	5
6	8	11	7	9	22	7	9
7	12	9	14	6	11	5	0

Clientes

Fuente: Autor

En la figura 6, se puede apreciar que en este caso se presenta un empate en la menor distancia desde el cliente 6 al cliente 2 y desde el cliente 6 al cliente 5, por lo que se selecciona arbitrariamente el cliente 2 con C_{62}=7 minutos, se valida nuevamente que no se exceda la disponibilidad de tiempo máximo de recorrido; teniendo 18 – (7+2) = 9 minutos como nueva disponibilidad de tiempo máximo de ruta. En este paso se elimina la fila del cliente 6 y la columna del cliente 2 y

se inicia la búsqueda desde la fila del cliente 2, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 7. Inclusión del tercer cliente - Ruta 1

Clientes

Clientes

i \ j	Depósito	1	3	4	5	7
Depósito	0	13	9	10	8	12
1	13	0	7	4	8	9
2	6	11	5	8	6	14
3	9	7	0	7	5	6
4	10	4	7	0	17	11
5	5	8	5	17	0	5
7	12	9	6	11	5	0

Fuente: Autor

En la figura 7, se puede apreciar que se selecciona el tercer cliente con el menor tiempo de recorrido, este es el cliente 3 con C_{23}=5 minutos. Se valida nuevamente la restricción de disponibilidad de tiempo máximo de ruta; teniendo 9 – (5+2)= 2 minutos como nueva disponibilidad de tiempo máximo de recorrido. Para la inclusión del siguiente cliente, se debe iniciar la búsqueda del menor tiempo de desplazamiento desde la fila del cliente 3 y como no hay un valor menor a los últimos 2 minutos de disponibilidad de tiempo máximo de ruta, se procede hacer uso del siguiente vehículo para crear la segunda ruta, eliminando la fila del cliente 2 y la columna y la fila del cliente 3 de la matriz de costos, para iniciar la búsqueda desde el depósito, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 8. Inclusión primer cliente - Ruta 2

Clientes

Clientes

i \ j	Depósito	1	4	5	7
Depósito	0	13	10	8	12
1	13	0	4	8	9
4	10	4	0	17	11
5	5	8	17	0	5
7	12	9	11	5	0

Fuente: Autor

En la figura 8, Podemos observar que el cliente con menor tiempo desde el depósito es el 5, con un tiempo de desplazamiento de C_{05}=8 minutos, para su inclusión, primero se debe validar que el tiempo de desplazamiento más el tiempo de servicio, no exceda la restricción de disponibilidad de tiempo máximo de ruta; teniendo 25 – (8+2) = 15 minutos como nueva disponibilidad de tiempo total de ruta. Para la siguiente inclusión se elimina la columna del cliente 5 y se inicia la búsqueda del menor tiempo de desplazamiento desde la fila del anterior cliente incluido. Como se muestra en la siguiente figura.

Figura 9. Inclusión segundo cliente - Ruta 2

Clientes

Clientes

i \ j	Depósito	1	4	7
Depósito	0	13	10	12
1	13	0	4	9
4	10	4	0	11
5	5	8	17	5
7	12	9	11	0

Fuente: Autor.

En la figura 9, podemos apreciar que el cliente con menor tiempo de desplazamiento desde el anterior cliente 5, es el cliente 1 con C_{51}=8 minutos, se valida nuevamente que no se exceda la disponibilidad de tiempo máximo de ruta; teniendo 15 – (8+2) = 5 minutos como nueva disponibilidad de tiempo máximo de ruta. Para la inclusión del siguiente cliente se debe buscar el menor tiempo de desplazamiento desde la fila del cliente 1 y encontramos que el menor tiempo es hacia el cliente 4 con C_{14}=4 minutos pero si a este le sumamos los 2 minutos del tiempo de servicio nos da un valor de 6 minutos, tiempo que excede la disponibilidad de tiempo máximo de ruta, por tal razón debemos hacer uso de un tercer vehículo para crear la tercera ruta, iniciando la búsqueda del menor tiempo de desplazamiento desde el depósito, eliminando la columna del cliente 1 y la fila del cliente 5 como se muestra en la siguiente figura.

Figura 10. Inclusión primer cliente - Ruta 3

Clientes

i \ j	Depósito	4	7
Depósito	0	10	12
4	10	0	11
7	12	11	0

Clientes

Fuente: Autor.

En la figura 10, Podemos observar que el cliente con menor tiempo desde el depósito es el 4, con un tiempo de desplazamiento de C_{04}=10 minutos, para su inclusión, primero se debe validar que el tiempo de desplazamiento más el tiempo de servicio, no exceda la restricción de disponibilidad de tiempo máximo de recorrido; teniendo 25 – (10+2) = 13 minutos, como nueva disponibilidad de tiempo total de ruta. Para la siguiente inclusión se elimina la columna del cliente 4 y se inicia la búsqueda del menor tiempo de desplazamiento desde la fila del anterior cliente incluido. Como se muestra en la siguiente figura.

Figura 11. Inclusión segundo cliente - Ruta 3

Clientes

i \ j	Depósito	7
Depósito	0	12
4	10	11
7	12	0

Clientes

Fuente: Autor.

En la figura 11, Se asigna el último cliente, este es el cliente 7 con un tiempo de desplazamiento de C_{47}=11 minutos. Validando la restricción de disponibilidad de tempo máximo de ruta se tiene 13 - (11+2) = 0 minutos de disponibilidad de tiempo máximo de ruta. Ya asignados todos los clientes, obtenemos la siguiente

Resultados:

Según el desarrollo por medio de la heurística del Vecino más cercano, para la realizar la entrega de los desayunos sorpresa se necesitan tres vehículos con la siguiente asignación de clientes.

Ruta 1: entrega los clientes [6 – 2 – 3] en un tiempo de ruta de 23 minutos.

Ruta 2: entrega los clientes [5 – 1] en un tiempo de ruta de 20 minutos.

Ruta 3: entrega los clientes [4 – 7] en un tiempo de ruta de 25 minutos.

En el anterior ejemplo, cada ruta inicia desde el depósito y finalizaba entregando el último cliente, ninguna de las rutas debe regresar al depósito. Para la inclusión de puntos se tiene en cuenta que se exceda la disponibilidad de tiempo máximo de ruta.

9 Pseudocódigo – Método de solución del Vecino más cercano:

```
! Parámetros de entrada:
        Clientes; Cx; Cy 'Listado de coordenadas de los clientes, incluyendo las
        del depósito
        tmaxruta 'parámetro de tiempo máximo de ruta
        VelPro          'parámetro de velocidad promedio en Km/h

        TimeServ  'tiempo de servicio promedio por cliente incluye cargue y
        descargue

! Heurística Vecino más Cercano:
        Dist i,j    'Crear matriz de distancias
        nru = 1 'nru: es el numerador de rutas creadas que inicia con 1
Do while tru ≤ nclie   'tru: total de clientes enrutados, nclie: es el cantidad total
de clientes ≠ al    depósito
    timeruta = 0  'timeruta: es el tiempo acumulado de ruta, iniciando en 0
    Dru = 0  'Dru: es la distancia acumulada de ruta, iniciando en 0

        Do while timeruta ≤ tmaxruta and tru <= ncli

                For n=1 to ncli - tru
                        Mín dist (Pi, Pj) 'se comparan la menor distancia desde i a j
                        If Di > Dj Then 'se selecciona la menor distancia
                                        Di=Dj
                        End if
```

```
            Next n

            Dru = Dru + Di  'Dru: es la distancia total acumulada
            timeruta = (Dru / VelPro)+ TimeServ
            tn = (Di / VelPro) + TimeServ  'tn: es el tiempo de desplazamiento
        al cliente que ingresa

            If timeruta ≤ tmaxruta Then 'Se valida que el tiempo acumulado no
            se exceda la disponibilidad de tiempo total máximo de ruta
              tru=tru+1
            Else
                    If tn ≥ tmaxruta Then 'Se valida de manera independiente
        que el desplazamiento hacia el cliente no exceda la disponibilidad de
        tiempo total máximo de ruta, con el fin de identificarlo y apartarlo de
        futuras inclusiones
                    tru=tru+1
                    End If
            End If

        Loop
        nru = nru + 1
Loop
```

10 Manual de usuario del aplicativo

La siguiente información tiene el objetivo brindar las instrucciones necesarias para utilizar el aplicativo con la implementación del algoritmo de la heurística del Vecino Más Cercano para resolver problemas de ruteo de vehículos abierto OVRP.

El aplicativo fue implementado en el lenguaje de Visual Basic de Excel, por lo que se hace necesario para su normal funcionamiento tener instalado en un equipo de cómputo el paquete Microsoft Office con Excel.

Parámetros de entrada:

La siguiente información es necesaria para iniciar con el diseño de las rutas:

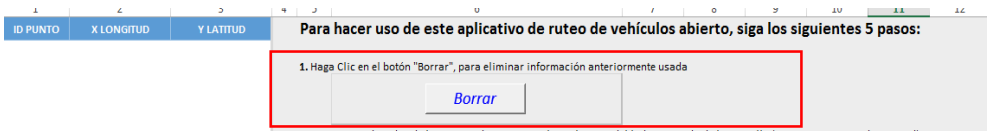
1. **Código de identificación**: Para una correcta y ágil identificación de los puntos asignados a cada ruta es necesario codificar el depósito y los puntos de entrega, no se debe registrar el mismo punto más de una vez. En el caso del depósito para que el programa pueda reconocerlo, debe registrarse como el primero de la lista de puntos con el primer código por lo que se recomienda que la codificación se haga de forma descendente.
2. **Coordenadas geográficas:** Para la ubicación geográfica del depósito y los puntos de entrega es necesario registrar las coordenadas correspondientes de Latitud (Norte y Sur) y Longitud (Este y Oeste) en grados decimales, estas coordenadas las podemos encontrar de manera gratuita, digitando la dirección del predio en cualquiera de las siguientes páginas web: http://mapas.bogota.gov.co/portalmapas/, http://www.coordenadas-gps.com/, http://www.mundivideo.com/coordenadas.htm
3. **Tiempo total máximo de ruta:** Intervalo de tiempo disponible para que el vehículo pueda efectuar las entregas e inicia en el momento que el vehículo sale del depósito y finaliza entregando el último punto asignado antes del horario establecido como promesa de entrega. Este tiempo se debe registrar en números decimales utilizando la coma (,) como símbolo decimal.
4. **Tiempo de servicio:** Es el tiempo promedio estimado que inicia en el momento de llegada del vehículo al punto de entrega, descarga, formaliza la entrega y finaliza en el instante que sale del punto dirigiéndose a otro lugar. Este tiempo se debe registrar en números decimales utilizando la coma (,) como símbolo decimal.
5. **Velocidad promedio de desplazamiento del vehículo**: Este valor puede ser estimado según la experiencia teniendo en cuenta estudios de movilidad, para el caso de Bogotá se puede consultar la Secretaria Distrital de Movilidad o el Departamento de Planeación Nacional. Este valor se debe registrar en Kilómetros por hora (Km/H).

Con la velocidad determinamos el tiempo de desplazamiento de un punto a otro, la sumatoria de los tiempos de desplazamiento más los tiempos de servicio debe ser menor o igual que el Tiempo Total Máximo de Ruta.

Pasos para hacer uso del aplicativo de ruteo de vehículo abierto:

1. Abrir archivo de Excel, (Aplicativo Ruteo VMC para un OVRP V12-20150423), el archivo abre en la hoja (Parámetros Entrada Coordenadas X y Y), En esta hoja se encuentra un instructivo de uso, en 5 pasos que se describen a continuación.
2. Ejecutar botón “Borrar” (Figura 12), necesario para borrar información anteriormente usada, preparando de esta manera el aplicativo para trabajar con nueva información.

Figura 12. Paso 1. Botón Borrar



Fuente: Autor

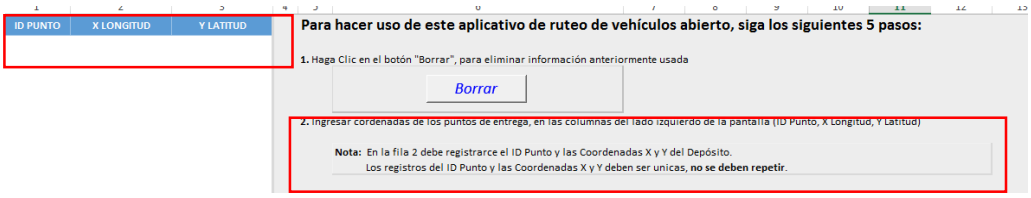
3. Ingresar Datos en la hoja “ParametrosEntradaCoordenadasX,Y”:

3.1 Ingresar código de identificación de punto **ID Punto** (Figura 13), este debe registrarse en orden descendente, siendo el primer código para las coordenadas del depósito y los demás códigos para las coordenadas de los puntos de entrega.

3.2 Ingresar coordenadas geográficas **X Longitud** y **Y Latitud** (Figura 13) de los puntos, estas coordenadas se pueden obtener de los aplicativos Google Earth, Google Maps u otros aplicativos de georeferenciación.

(Nota: Las coordenadas del depósito se deben ingresar en la fila 2
No se deben repetir registros de puntos geográficos, esto ocasionara errores en los resultados)

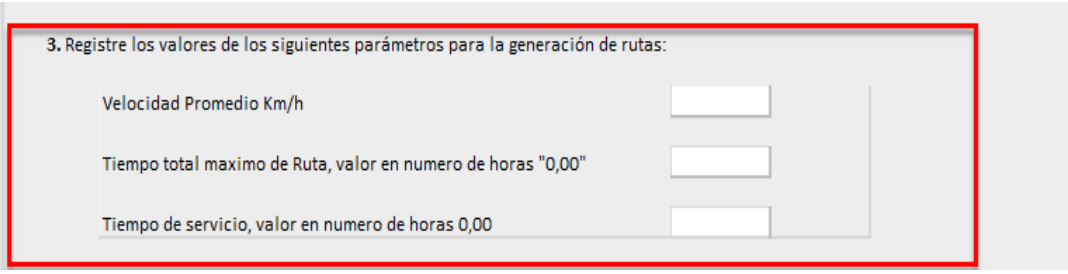
Figura 13. Paso 2. Ingreso de Coordenadas Geográficas X y Y



Fuente: Autor

4. Registro de parámetros (Figura 14) que se deben tener en cuenta para la generación de rutas.
    - Velocidad Promedio Km/h: Para este valor se estima una velocidad promedio del vehículo, para esta estimación se puede tener en cuenta la experiencia de movilidad en las diferentes jornadas del día.
    - Tiempo total máximo de ruta: Este valor depende de la hora en que salen los vehículos a entregar los bienes a los clientes y finaliza antes de una misma hora de entrega acordada con los clientes. Este valor se registra en número de horas.
    - Tiempo de servicio: Para este valor se toma el promedio de lo que se puede demorar la entrega en cada cliente. Teniendo en cuenta el momento en que se detiene el vehículo, se descarga la mercancía, se formaliza la entrega con el cliente y finaliza con la puesta en marcha del vehículo para continuar con la ruta de entregas. Este valor se registra en número de horas.

Figura 14. Paso 3. Registro de Parámetros a tener en cuenta en la generación de rutas



Fuente: Autor

5. Ejecutar botón: “Generar Rutas” (Figura 15)
   Antes de hacer clic en el botón (Generar Rutas), asegúrese de que se ha ejecutado los anteriores pasos correctamente.

Figura 15. Paso 4. Botón Generar Rutas

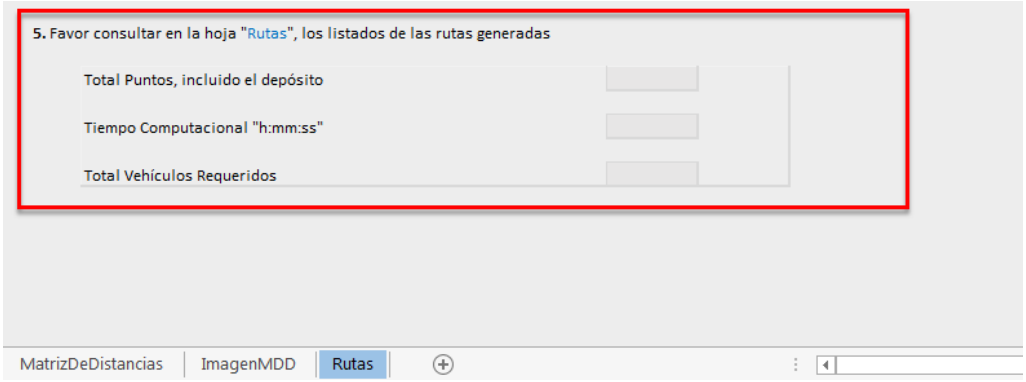
Fuente: Autor

6. Ver listado de entregas por ruta, guardar o Imprimir.

   En la hoja “ParametrosEntradaCoordenadasX,Y” (Figura 16), aparecen los valores correspondientes al total de puntos incluido el depósito, el

tiempo computacional (es el tiempo que se demoró el aplicativo en generar las rutas, entregando un listado en la hoja Rutas) y la cantidad de vehículos requeridos para hacer las entregas.

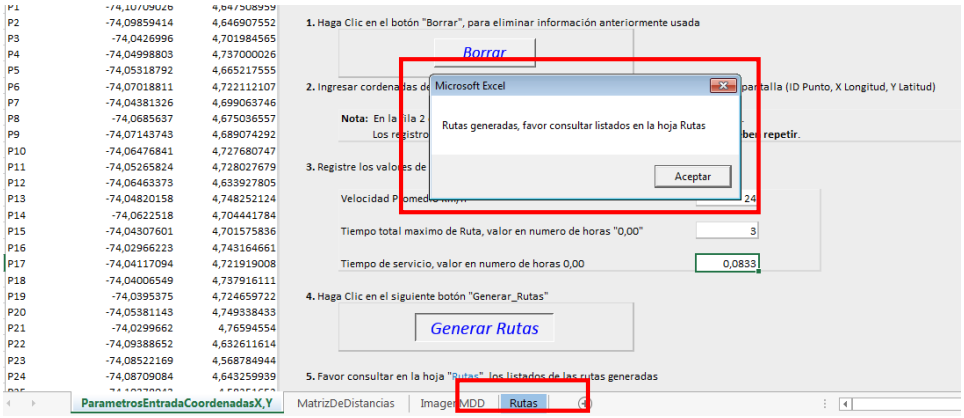
Figura 16. Paso 5. Generación de Rutas



Fuente: Autor

En la figura 17, se visualiza el mensaje que indica la finalización de la operación en el aplicativo al que se le debe dar aceptar, indicando que ya se puede consultar el listado de rutas en la hoja Rutas

Figura 17.Paso 5. Mensaje de generación de rutas finalizado



Fuente: Autor

En la Figura 18, se visualiza la hoja Rutas, donde se encuentran los listados de las rutas generadas, con los siguientes campos:

- **ID Punto**: Es el código único del punto.
- **Ruta**: Es la ruta correspondiente al ID Punto.
- **Orden de entrega**: Este campo indica el orden en que la ruta correspondiente debe efectuar las entregas.
- **Distancia**: Es la distancia (en Kilómetros) acumulada por cliente, a medida que se va entregando cada uno de los puntos asignados. Al final de cada ruta se encuentra la distancia total de recorrido.

- **Tiempo Entrega**: Es el tiempo (en minutos) programado en el que el vehículo, debe haber formalizado la entrega de bienes en cada punto, este debe ser menor al tiempo total de ruta.
- **Observaciones**: Es este campo, se genera dos mensajes, i. Es la identificación del punto de partida por ruta (El depósito, en este caso es único, para todas las rutas). ii. Se identifican los puntos que no se pueden entregar porque para su entrega se excede el tiempo total máximo de ruta (ejemplo: se tiene un punto que para efectuar su entrega saliendo desde el depósito se necesitan 40 min, pero solo se cuenta con 30 min de tiempo total máximo de ruta).

Figura 18. Paso 5. Listado de rutas

1	ID PUNT	RUTA	ORDEN DE ENTREG	DISTANCIA	TIEMPO ENTREG	OBSERVACIONES
2	P1	Ruta 1	0	0	0	Depósito
3	P31	Ruta 1	1	0,406217324	0,100225722	
4	P2	Ruta 1	2	0,836224334	0,201442681	
5	P24	Ruta 1	3	1,89177898	0,328724124	
6	P22	Ruta 1	4	3,202533386	0,466638891	
7	P44	Ruta 1	5	5,543639412	0,647484976	
8	P42	Ruta 1	6	6,143226319	0,755767763	
9	P12	Ruta 1	7	7,33559291	0,888749705	
10	P34	Ruta 1	8	10,08751218	1,086713008	
11	P8	Ruta 1	9	12,14746667	1,255844444	
12	P40	Ruta 1	10	12,87883024	1,369617927	
13	P48	Ruta 1	11	13,36634285	1,473230952	
14	P9	Ruta 1	12	13,83655719	1,576123216	
15	P26	Ruta 1	13	14,35530068	1,681037528	
16	P36	Ruta 1	14	15,45651406	1,810221419	
17	P14	Ruta 1	15	16,63194496	1,942497707	
18	P15	Ruta 1	16	18,28863594	2,094826498	
19	P3	Ruta 1	17	18,34396152	2,18043173	
20	P7	Ruta 1	18	18,68041315	2,277750548	
21	P43	Ruta 1	19	19,29741831	2,386759096	
22	P49	Ruta 1	20	20,43339332	2,517391388	
23	P17	Ruta 1	21	22,01290563	2,666504401	

ParametrosEntradaCoordenadasX,Y | MatrizDeDistancias | ImagenMDD | Rutas

Fuente: Autor

Nota:

El aplicativo en su primera hoja “ParametrosEntradaCoordenadasX,Y” se encuentra un resumen de los pasos anteriormente descritos.

Por seguridad guarde una copia del archivo sin usar a manera de plantilla para su posterior uso. Debido a que el archivo en su manipulación puede sufrir desconfiguraciones, como la eliminación de hojas, filas o columnas.

11 Resultados computacionales por instancias

Las pruebas o test se realizaron haciendo uso de un computador portátil con procesador Intel(R) Core(TM) i5 CPU M 450 @ 2.40 GHz y una memoria RAM de 4 GB, fabricado por Dell.

Parámetros de entrada que se tuvieron en cuenta para el test:

1. **Tiempo Total Máximo de Ruta** de: 3 horas
2. **Tiempo de Servicio** de: 5 min
3. **Velocidad Promedio** de: 24 Km/h
4. Para la identificación de los **vértices**, se seleccionó de manera aleatoria coordenadas geográficas de la ciudad de Bogotá en la página web http://www.coordenadas-gps.com/mapa/pais/CO.
5. Para **la distancias entre los vértices** se utilizó la fórmula de aproximación, publicada por la Universidad Nacional de Colombia Sede Amazonia en su sitio Web (SIAMAC - Sistema de Información de la Amazonia Colombiana, s.f.), cuyo resultado es muy aproximado a las distancias que se encuentran en los sistemas de georreferenciación como Google Earth:

$$\boldsymbol{D} = \sqrt{(\boldsymbol{X^2} + \boldsymbol{Y^2})} \quad (1)$$

D: Es la distancia entre los vértices o puntos, dada en kilómetros

X = 84,8*$(x_2 - x_1)$ (2)

Y = 110,56*$(y_2 - y_1)$ (3)

Donde (1) es la ecuación de distancias entre dos puntos. Para que el valor de la distancias sea dado en kilómetros, el SIAMAC propone para el valor de X en la ecuación (2) multiplicar por la constante 84,4 la diferencia de las coordenadas de X $(x_2 - x_1)$ y para el valor de Y en la ecuación (3) multiplicar por la constante 110,56 la diferencia de las coordenadas de Y $(y_2 - y_1)$, teniendo los valores de la ecuación (2) y (3), se remplazan en la ecuación (1) para hallar el valor de la distancia en kilómetros que hay entre los dos puntos con coordenadas geográficas. (SIAMAC - Sistema de Información de la Amazonia Colombiana, s.f.)

Resultados obtenidos con diferentes cantidades de puntos:

En la siguiente tabla resumen se muestran los resultados del test obtenido con diferentes cantidades de puntos cliente, incluido el punto del depósito.

Tabla 2. Resultados De Test Al Aplicativo

Cantidad de puntos	**Tiempo Computacional**	**Total Rutas Generadas**
50	00:00:01	3
100	00:00:04	5
200	00:00:14	8
500	00:00:48	18
1000	00:03:08	35
2000	00:13:30	68
3000	00:37:30	101
4000	01:01:15	135

Fuente: Autor

12 Análisis comparativo del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado con algunos de los softwares disponibles en Colombia para el diseño de rutas de distribución.

El análisis comparativo para identificar ventajas y desventajas del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado, se realizó teniendo en cuenta el estudio titulado *Análisis comparativo del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado con algunos de los softwares disponibles en Colombia para el diseño de rutas de distribución* (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007), publicado en la revista de la Universidad EAFIT, en este artículo son identificadas las características más importantes con las que debe contar un software para la gestión del transporte en el sistema logístico en el ámbito colombiano, dicho estudio utilizo una herramienta estándar para la recolección de la información cuyo esquema general está basado en el estudio hecho por (Hall, 2006), (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007).

El estudio realizado por (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007), se realizó a siete empresas que ofrecen nueve sistemas informáticos para el diseño de rutas.

A continuación se presentan las tablas 3 a la 12, con los resultados de comparar el aplicativo diseñado en este trabajo, que por motivos de facilitar su identificación se denominara *RouteList,* con los nueve sistemas informáticos del estudio realizado por (Gutiérrez, Palacio, & Villegas, 28 de febrero 2007).

Tabla 3. Plataforma computacional requerida

Producto	Proveedor	Año de Introduc-ción	Carácter del Software			Plataforma de soporte						Otro
			Privado	Académico	Mixto	Windows	Linux	MacOS	Web	Maqu. Para-lelas	ASP	
ARC Logistics	Procalculo Prosis	2000	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-
Axiodis Estándar	OptiLogistic	1991	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-
Axiodis Profesional	OptiLogistic	1991	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-
DataRutas	Servinformación	2000	S	-	-	S	S	S	S	-	-	-
Network Analyst	Procalculo Prosis	2005	S	-	-	S	-	-	-	-	-	Solaris
Roadnet Transportation Suite	Smart Logistics S.A. (UPS Logistics Techologies)	1983	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-
Sinmaf Vehicle Router	SINMAF LTDA.	2006	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-
SpicaR	Deneb Latin America Ltda.	2005	S	-	-	S	-	-	-	-	S	Servidor-Cliente y Web
TransCad	SAIP Ltda. - Caliper Corporation	1990	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-
RouteList	Iuiram	-	S	-	-	S	-	-	-	-	-	-

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

En la tabla 3. Se afirma que RoutList es el producto de este trabajo de grado, desarrollado sobre la plataforma de Windows.

Tabla 4. Tamaño máximo de los problemas que resuelve el sistema

Producto	Capacidad máxima para solucionar problemas					Método de medición de la capacidad de vehículos	Computador			
	No. Paradas	No. Vehículos	No. Bodegas	No. Productos	No. Tipo Vehículos		Tipo de Procesador	Velocidad de Procesador	Memoria	Espacio en Disco Duro
ARC Logistics	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Volumen, peso, número de entregas	Desktop Estándar	1.2 Gh	512	Depende de la implemen-tación
Axiodis Estándar	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Volumen, peso, packaging	Pentium IV	2.4 Gh	512	1 GB
Axiodis Profesional	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Volumen, peso, packaging	Pentium IV	2.4 Gh	512	1 GB
DataRutas	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Peso, volumen, cantidad de producto	Pentium IV	2.4 Gh	512	5 GB
Network Analyst	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Se define por redes mediante JAVA	Desktop Estándar	2.0 Gh	512	Depende de la implemen-tación
Roadnet Transportaion Suite	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Peso	Depende de la implemen-tación	Depende de la implemen-tación	Depende de la implemen-tación	Depende de la implemen-tación
Sinmaf Vehicle Router	50.000	2.500	100	ilimitado depende de restric-ciones	ilimitado	Peso y volumen en forma explícita	Intel Centrino, AMD equivalente	> 1.6 GHz	> 512 MB	< 5 MB
SpicaR	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Peso	Pentium III	> 1.6 GHz	256	Servidor
TransCad	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	ilimitado	Peso, unidades	-	-	512	40 GB
RouteList	4000	-	1	-	-	-	Intel(R) Core(TM) i5	2.40 GHz	4 GB	< 5 MB

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

Según la tabla 4. El número de paradas de RouteList dependen de la cantidad de filas de una hoja de Excel, en este trabajo de grado se hicieron los test con una cantidad máxima de 4000 paradas que es el equivalente a 4000 filas de una hoja de Excel. Los demás productos comerciales manejan desde 50000 hasta un número ilimitado de paradas.

RouteList únicamente maneja un depósito de donde salen las rutas, los demás productos tienen desde 100 hasta un ilimitado número de depósitos.

La cantidad de vehículos y el tipo de vehículos, depende de la cantidad de rutas generadas por RouteList, la cual tiene una relación de uno a uno (una ruta equivale a un vehículo) estos datos no son utilizados como parámetros de entrada para hacer el diseño de las rutas.

El método de medición de la capacidad del vehículo, es un proceso que se puede hacer manualmente, teniendo en cuenta la lista de rutas que genera RouteList. En este listado los clientes se encuentran asignados a una determinada ruta y dependiendo del total de requerimientos[9] de una cantidad determinada de

[9] Cantidad de producto por cliente se pueden trabajar por peso o por volumen.

clientes por ruta, se determina la capacidad en peso o en volumen que debe tener el vehículo a ser contratado.

Tabla 5. Desempeño computacional

Producto	Tiempo Computacional	¿Qué tipos de algoritmos emplea?	¿Se utilizan aproximaciones para reducir el tiempo computacional?
ARC Logistics	10 - 30 min	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
Axiodis Estándar	30 seg a 5 min promedio	Tiene 14 algoritmos diferentes, en su mayoría heurísticos	Es parametrizable por el usuario
Axiodis Profesional	30seg a 5 min promedio	Tiene 14 algoritmos diferentes, en su mayoría heurísticos	Es parametrizable por el usuario
DataRutas	10 min	-	-
Network Analyst	1 - 30 min	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
Roadnet Transportaion Suite	< 1 Minuto - 1.7 GHz, 1.25 GB RAM	Algoritmos heurísticos	No se utilizan aproximaciones
Sinmaf Vehicle Router	Instancias Solomon = 3,5 min. Instancias de gran escala (50.000 nodos) = 25 min.	MOANT: MultiObjective ANT Colonies; SPEA-II	Si el problema es multi-depósito se realiza un procedimiento Cluster/Assign first, then Route
SpicaR	20 - 30 min	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
TransCad	5 min	-	-
RouteList	< 40 min (3000 nodos)	Heurística del Vecino más Cercano	Distancia Euclidiana

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

Según la tabla 5. RouteList ofrece un desempeño computacional menor a 40 minutos para diseñar rutas con memos de 3000 nodos. En este caso se puede apreciar que existen aplicaciones comerciales con un alto desempeño computacional, teniendo en cuenta que la mayoría de estas aplicaciones manejan una capacidad ilimitada de número de entregas.

Para la reducción del tiempo computacional se utilizó una fórmula de aproximación[10] para la medición de distancia, la cual utiliza unas constantes de aproximación para las coordenadas geográficas X y Y de cada punto de entrega, publicada por la Universidad Nacional de Colombia Sede Amazonia en su sitio Web (SIAMAC - Sistema de Información de la Amazonia Colombiana, s.f.), cuyo resultado es muy aproximado a las distancias que se encuentran en los sistemas de georreferenciación como Google Earth.

[10] Ya explicada en el anterior capitulo *Resultados computacionales por instancias* de este trabajo.

Tabla 6. Funciones de ruteo

Producto	Por nodos	Por arcos	Progra-mación de paradas en tiempo real	Permite hacer ruteo diario	Planea-ción y análisis de ruteo	Incorpora información de tráfico en tiempo real	Diseño de viajes tipo "Multimodal"
ARC Logistics	S	-	N	S	S	N	N
Axiodis Estándar	S	S	S	S	S	N	N
Axiodis Profesional	S	S	S	S	S	N	S
DataRutas	S	-	S	S	S	S	S
Network Analyst	S	-	S Programable	S	S	S Programable	S
Roadnet Transportaion Suite	S	S	S	S	S	S	S
Sinmaf Vehicle Router	S	S	-	S	S	-	S
SpicaR	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	S	S	S	N	S
TransCad	S	S	N	S	S	S	N
RouteList	S	S	N	S	S	N	N

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

Para el caso de funciones de rute la tabla 6. RouteList permite diseñar rutas diariamente y funciona teniendo en cuenta los nodos que son las paradas donde se deben hacer las entregas y los arcos que son las distancias euclidianas que hay de un nodo a otros nodos.

RouteList, permite hacer la planeación de las rutas, facilitando el listado de rutas para determinar la cantidad de vehículos que se deben contratar para efectuar las entregas.

Tabla 7. Funciones de ruteo

Producto	Considera prioridades de entrega	Cálculo de rutas considerando reglas de pausas	Reconstrucción automática de rutas existentes	Cálculo de mejoras obre rutas existentes	Simula cambios a planes propuestos y determina efectos sobre costos y servicios	Análisis de consolidación con despacho directo y Cross-Docking
ARC Logistics	S	S	S	S	S	N
Axiodis Estándar	S	N	N	N	S	N
Axiodis Profesional	S	S	S	S	S	S
DataRutas	S	N	S	S	S	N
Network Analyst	S	S	S	S	S	S Programable
Roadnet Transportaion Suite	S	S	S	S	S	S
Sinmaf Vehicle Router	S	-	S	-	-	S
SpicaR	S	S	S	S	S	S
TransCad	S	N	S	S	S	S
RouteList	N	S	N	N	N	N

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

Con relación a la tabla 7. Se puede decir que RouteList no considera la prioridad[11] de entrega, la prioridad de entrega está determinada por el algoritmo del vecino más cercano que inicia la secuencia de entregas, entregando a los puntos más cercanos desde que se sale del depósito.

En RouteList, como regla de pausa, se utiliza el parámetro de entrada el tiempo de servicio, que es promedio de entrega por punto, este es el tiempo que transcurre desde que el distribuidor llega al punto de entrega, formaliza la entrega y sale a entregar al siguiente punto de entrega asignado.

RouteList, no hace reconstrucción automática, ni mejoras de las rutas existentes, en este caso es necesario que el usuario del aplicativo cambie los parámetros de entrada relacionados a la velocidad promedio Km/h, Tiempo total máximo de ruta y Tiempo de servicio.

RoutList no maneja planes de presupuestos o costos, pero la lógica de su algoritmo[12] tiene la finalidad de diseñar rutas de entrega con una menor distancia

[11] Prioridad de entrega, es cuando el usuario determina cuales son usuarios a los cuales se les debe entregar primero.

[12] La heurística del vecino más cercano.

de recorrido, de modo que el aplicativo permita a las empresas disminuir sus costos de distribución.

Tabla 8. Capacidad de los algoritmos

Producto	Utiliza		Si maneja varios crterios, ¿cómo los prioriza?	¿Cuáles criterios utiliza?					
	Un solo criterio	Dos o más criterios		Costo	Número de vehiculos	Distancia	Cumpli-miento de horarios	Atractivo visual	Otro
ARC Logistics	-	S	Todos los criterios se definen en función del costo	S	S	S	S	S	-
Axiodis Estándar	-	S	El usuario lo define	S	S	S	S	N	Utilización de vehiculos
Axiodis Profesional	-	S	El usuario lo define	S	S	S	S	N	Utilización de vehiculos
DataRutas	-	S	El usuario lo define	N	S	S	S	S	-
Network Analyst	-	S	El usuario lo define	S	S	S	S	S	Peso Seguridad
Roadnet Transportaion Suite	S	S	El usuario lo define	S	S	S	S	S	El usuario personaliza los criterios
Sinmaf Vehicle Router	-	S	Esquemas multi-objetivo puros mediante MOANT y MOGA's (SPEA-II)	S	S	S	S	-	Balance de Carga
SpicaR	-	S	El usuario lo define	-	S	S	S	-	-
TransCad	S	S	Se utiliza una función de varias variables	S	S	S	S	S	-
RouteList	-	S	En función de la menor distancia recorrida	N	N	S	S	N	Velocidad promedio

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

Con respecto a la capacidad de los algoritmos tabla 8. RouteList utiliza como criterios de entrada la velocidad promedio de desplazamiento, el tiempo promedio de servicio y el tiempo total disponible para efectuar las entregas. Estos criterios son necesarios para determinar distancias mínimas a ser recorrida en el tiempo total disponible para hacer las entregas.

Tabla 9. Ventanas de tiempo y disponibilidad como plataforma que provee

	Ventanas de tiempo			Disponible como plataforma que provee					
Producto	¿El sistema acepta?		Si acepta ventas de tiempo flexibles: ¿cómo se especifican?	Despliegue de tableros electrónicos	Mensajes wireless al conductor	Seguimiento de vehículos en tiempo real	Scanner de Código de Barras	Software de la Cadena de Abaste-cimiento	Procesamiento de ódenes de clientes
	Ventanas de tiempo rígidas	Ventanas de tiempo flexibles							
ARC Logistics	S	S	% de cumplimiento	S	N	N	N	S SAP	S
Axiodis Estándar	S	S	Usuario define rangos	AxioMobil - AxioTrans	N	S	S	S	Se importan los pedidos
Axiodis Profesional	S	S	Usuario define rangos	AxioMobil - AxioTrans	N	S	S	S	Se importan los pedidos
DataRutas	-	S	Usuario define rangos	S	S	S	S	S	S
Network Analyst	S	-	-	S		Programable	N	S SAP	S
Roadnet Transportaion Suite	-	S	Factores de ventanas de tiempo	S		S	FleetLoader TM	S	S
Sinmaf Vehicle Router	-	S	Fronteras difusas	-	-	En investigación actual	En investi-gación actual	S	-
SpicaR	S	S	Usuario define rangos	S	S	S	S	S	S
TransCad	S	-	-	S	S	S	N	N	-
RouteList	-	S	Usuario define rangos	N	N	N	N	N	N

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

Con relación a la tabla 9, RouteList maneja una única ventana de tiempo, que es el tiempo total de ruta disponible para hacer las entregas, la cual es definida por el usuario. Este valor inicia desde el momento en que salen los vehículos a entregar los bienes a los clientes y finaliza antes de una misma hora de entrega acordada con los clientes.

RouteList es un aplicativo desarrollado en Visual Basic de Excel que no dispone de una plataforma para ofrecer los servicios que ofrecen las demás aplicaciones.

Tabla 10. Características del software

Producto	Asigna conductores individuales	Instrucciones de ruteo giro a giro	Pronósticos automatizados de entrega	Manifiesto o Plan de Carga	Plan para cargue de vehículos	Capacidades mínimas de cargue de vehículo	Función de costos fijos y variables por vehículo	Asignación exclusiva de vehículos a clientes
ARC Logistics	Camiones Individuales	S	S	S	S	N	S	N
Axiodis Estándar	S	S	N	S	S	S	S	N
Axiodis Profesional	S	S	N	S	S	S	S	S
DataRutas	S	S	S	S	S	S	El usuario lo personaliza	S
Network Analyst	S Programable	S	S	S	S	Programable	S Programable	S Programable
Roadnet Transportaion Suite	S	S	S	S	Fleet Loader	S	S	S
Sinmaf Vehicle Router	S	-	S	-	S	S	S	-
SpicaR	S	S	S	S	S	S	S	N
TransCad	N	S	N	N	N	N	S	S
RouteList	N	S	N	N	N	N	N	N

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

De acuerdo a la tabla 10. RouteList, tiene como única característica la generación de rutas y es por medio de la generación de un listado donde se encuentra para cada grupo de puntos de entrega una ruta de distribución, el orden de entrega, la distancia de recorrido en Km y tiempo en que debió efectuar la entrega.

Tabla 11. Uso del software y capacidad del SIG[13]

	El Software se usa en:					Capacidades del SIG			
Producto	Recolección y despacho local	Distancias largas	Mensajería	Buses	Servicios Domici-liarios	Despliegue de rutas y paradas en los mapas	Permite editar las rutas manualmente	Geocodifi-cación de direcciones de paradas	Hace zonifica-ción
ARC Logistics	S	S	S	S	S	S	S	S	N
Axiodis Estándar	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Axiodis Profesional	S	S	S	S	S	S	S	S	S
DataRutas	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Network Analyst	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Roadnet Transportaion Suite	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Sinmaf Vehicle Router	S	S	-	-	S	S	-	S	S
SpicaR	S	S	S	N	N	S	S	Contactar al proveedor	S
TransCad	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RouteList	N	S	S	N	S	N	N	N	N

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

Según el uso del software y capacidad del SIG tabla 11. RouteList únicamente fue diseñado para problemas de ruteo de vehículos abierto, que son los casos donde una vez el vehículo sale del depósito, no está obligado a regresar al depósito después de finalizar con las entregas asignadas, teniendo en cuenta esto, RouteList puede ser utilizado para el diseño de rutas con distancias largas, en la entrega de mensajería y servicios domiciliarios.

No es la herramienta ideal para el diseño de rutas de recolección y despacho, ni para el ruteo de buses, debido a que estos casos son problemas en los que los vehículos si deben regresar al depósito o en el caso de los buses que puede ser un caso donde se manejan dos depósitos controlados uno de salida y otro de llegada, por ejemplo, las rutas de buses escolares donde el bus sale en un determinado tiempo de un parqueadero y va pasando por las casas de los estudiantes asignados y finaliza la ruta llegando al colegio, en este caso los depósitos controlados son el parqueadero y el colegio.

[13] Sistema de información geográfica SIG; es un sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica con la ayuda de un software que utiliza mapas o información cartográfica. (ArcGis, 2016)

Con relación a la capacidad del SIG. De acuerdo a los alcances y exclusiones de este trabajo de grado, RouteList no genera mapas, únicamente genera un listado de rutas con un orden de entrega por ruta.

Tabla 12. Información general

Producto	Valor de la licencia monousuario	¿Permite usuarios simultáneos?	Costo adicional de usuarios simultáneos	¿La trarifa de la licencia incluye mapas de la región?	Marca de los mapas incluidos	Costo de soporte de instalación ($/hora)	Horas promedio requeridas
ARC Logistics	US$10.000 Contactar al proveedor	N	N	N	Desarrollo propio	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
Axiodis Estándar	US$ 20.000	N	-	S	Contactar al proveedor	Ya incluido	80 horas
Axiodis Profesional	US$ 60.000	S	US$ 16.500 o menos dependiendo de la cantidad	S	Contactar al proveedor	Ya incluido	80 horas
DataRutas	Contactar al proveedor	N	Contactar al proveedor	N	Desarrollo propio	Ya incluido	-
Network Analyst	Contactar al proveedor	S	N	N	Desarrollo propio	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
Roadnet Transportaion Suite	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	N	Se adquieren con GeoBis y MapInfo	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
Sinmaf Vehicle Router	Contactar al proveedor	S	-	-	GEOBIS (actualmente, más no es excluyente)	-	-
SpicaR	Contactar al proveedor	S	-	Contactar al proveedor	Procálculo Prosis	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
TransCad	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor	Contactar al proveedor
RouteList	-	N	-	N	-	-	-

Fuente: Autor sobre la tabla comparativa de Gutiérrez et al.

De acuerdo a la tabla 12. Aunque determinar el precio del aplicativo desarrollado no está contemplado en el alcance de este trabajo de grado, se puede inferir que el precio debe ser menor que el precio de los demás productos, debido a las ventajas que tienen las demás aplicaciones comerciales. RouteList únicamente necesita para su funcionamiento disponer de una licencia de office con Excel, que es una herramienta que generalmente tienen la mayoría de las empresas para el manejo de la información.

RouteList no incluye mapas ni soporte de instalación, en su defecto se creó un manual de usuario donde se describen las instrucciones básicas para hacer uso de este aplicativo.

RouteList no tiene un costo adicional por usuario ya que este archivo puede ser copiado por otros usuarios en forma de plantilla para su posterior uso.

13 Conclusiones

1. Durante el desarrollo de este trabajo de grado se logró presentar una alternativa de solución de ruteo de vehículos para las pequeñas y medianas empresas PYMES, que deben diseñar su distribución como un caso que se ajusta al problema de ruteo de vehículos abierto OVRP, con la implementación del algoritmo de Vecino más Cercano en Visual Basic de Excel.

2. La revisión de la literatura permitió construir el marco teórico en el que se fundamentó la alternativa de solución desarrollada en este trabajo a manera de aplicativo, identificándose las variantes de problema de ruteo de vehículos VRP, una de estas variantes es conocida como el problema de ruteo de vehículos abierto o por sus siglas en inglés Open Vehicle Routing Problem OVRP, la cual tiene como característica principal que los vehículos no retornan al punto de origen o deposito, esta variante es la que mejor describe el problema planteado en este documento y ha sido estudiada por autores como (Emmanouil E. Zachariadis, 2010), (Usberti, França, & França, 2011) y (Fung & Liu , 2012).

3. El desarrollo de la revisión de literatura referente a los métodos de solución, se encontró tres grupos de soluciones a los problemas de ruteo de vehículos, denominados métodos exactos, heurísticas y metaheurísticas. Los métodos exactos proporcionan soluciones óptimas pero ineficientes computacionalmente, mientras que las heurísticas y las mentaheurísticas proporcionan soluciones aproximadas a la óptima en tiempos computacionales más racionales[14]. Siendo la *heurística del vecino más cercano* el algoritmo que se implementó como método de solución, la cual tiene como medida de desempeño la minimización de la distancia total recorrida por el conjunto de rutas.

4. El aplicativo desarrollado en este trabajo de grado permitió generar un listado de rutas con: el orden de entrega por cliente, los tiempos de entrega y la cantidad de clientes asignados a cada ruta, tal como se puede apreciar en la figura 21 Listado de entrega. En el Apéndice A, se encuentra el código desarrollado en el aplicativo, el cual mantiene la misma lógica del ejemplo de solución al problema de ruteo de vehículos abierto OVRP utilizando la heurística del vecino más cercano planteado en este trabajo.

5. El tiempo computacional del aplicativo obtenido con los diferentes listados con cantidades de puntos entre los 50 y los 4000 puntos con coordenadas geográficas X y Y de la ciudad de Bogotá de los mapas de Google Maps, fue de 48 segundos para 500 puntos, de 188 segundos para 1000 puntos, de

[14] Tiempo racional, entendido como el tiempo de diseño de rutas que permite tomar decisiones logísticas posteriores a tiempo y de esta manera cumplir con los compromisos de entrega adquiridos.

menos de 14 minutos para 2000 puntos, de menos de 38 minutos para 3000 puntos y de 62 minutos para 4000 puntos. El resultado de cantidad de rutas depende de los parámetros de entrada; velocidad promedio, tiempo de servicio y tiempo total máximo de ruta. Estos resultados se encuentran en la tabla 2 de este documento.

El tiempo computacional obtenido con el aplicativo para menos de 2000 puntos se encuentran dentro de los tiempos computacionales reportados por los aplicativos comerciales (Tabla 5) que van desde los 20 segundos hasta los 30 minutos. Dado lo anterior se demostró que el aplicativo es funcional y competitivo frente a los demás aplicativos comerciales.

6. Se diseñó un manual con las instrucciones básicas para hacer uso del aplicativo desarrollado como objeto de este trabajo de grado. El manual contiene la descripción de los parámetros de entrada necesarios para diseñar las rutas y los pasos que se deben seguir para obtener el listado de rutas, cada paso ilustrado con una imagen[15] de la parte del aplicativo a la cual se hace referencia. Adicionalmente en la primera hoja *ParametrosEntradaCoordenadasX,Y* del aplicativo se anuncian los pasos que se deben seguir para hacer uso del aplicativo.

7. El análisis comparativo del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado frente a aplicativos comerciales disponibles en el mercado colombiano, se encontró que RouteList es un aplicativo de bajo costo debido a que únicamente necesita para su funcionamiento disponer de una licencia de office con Excel, que es una herramienta de uso común en las empresas, por lo cual no requiere de inversiones adicionales en software especializados, ni de soporte de instalación y mantenimiento, no requiere equipo adicional ni de contratación de personal especializado. De acuerdo a la tabla 3 los valores de licencia se encuentran en el rango de US$10000 a US$60000, es de aclarar que estos softwares comerciales justifican sus costos por su capacidad para solucionar problemas con una cantidad ilimitada de paradas, vehículos, bodegas, productos y tipos de vehículos, la combinación de diferentes tipos de algoritmos para encontrar soluciones, despliegue de rutas y paradas en los mapas, disponibilidad de plataformas que ofrecen servicios de geolocalización en tiempo real, scanner de códigos de barras.

[15] Figura 12 hasta la figura 18.

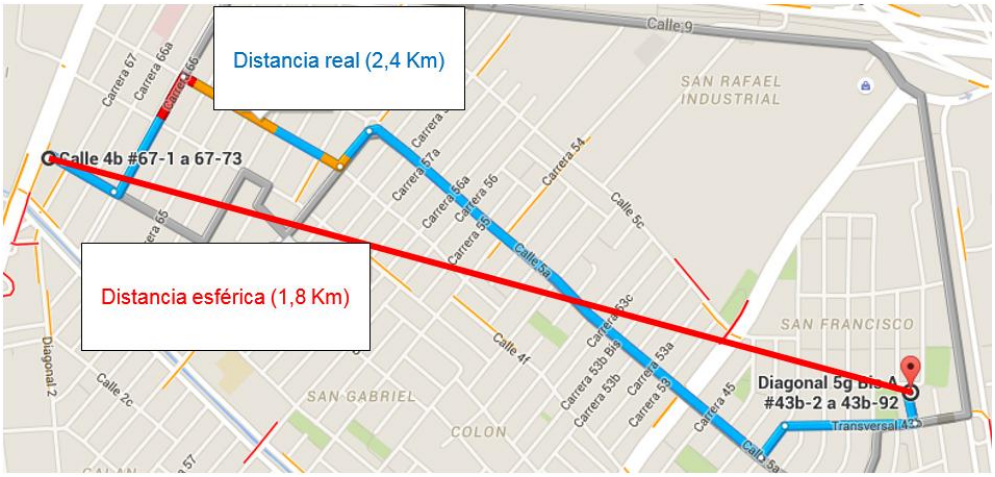
14 Recomendaciones

- ✓ Debido a que el aplicativo fue desarrollado en un archivo de Excel, en su manipulación puede sufrir des configuraciones, como la eliminación de hojas, filas o columnas. Por esta razón se recomienda guardar una copia del archivo sin usar a manera de plantilla para su posterior uso.

- ✓ Para el normal funcionamiento del aplicativo se recomienda seguir el orden de los pasos descritos en su primera hoja "ParametrosEntradaCoordenadasX,Y".

- ✓ Para obtener resultados más cercanos a la realidad es recomendable incorporar cartografía con la malla vial. En este trabajo de grado la distancia entre dos puntos de entrega se desarrolló como una aproximación a la realidad, donde se utilizó la distancia esférica terrestre que hay entre dos puntos y no se tuvo en cuenta las distancias de las calles que se deben recorrer para hacer el mismo desplazamiento de un punto a otro, tal como se aprecia en la figura 19. La distancia esférica entre dos puntos es diferente, siendo menor (1,8 km) a la distancia real (2,4 km) haciendo uso de la malla vial.

Figura 19. Distancias entre dos puntos.



Fuente: Autor, sobre un mapa de Google Maps.

- ✓ Otros factores que no se tuvieron en cuenta en el desarrollo de este trabajo y que pueden afectar los resultados, son las diferentes condiciones (sentidos viales, grado de inclinación de las vías, la lluvia, etc.) y afectaciones (Calles sin pavimentar, los ríos, calles cerradas, accidentes, bloqueos, etc.) en la malla vial.

- ✓ El método implementado del vecino más cercano, puede ser utilizado como punto de partida, en futuros estudios con el objetivo de encontrar soluciones

basados en metaheurísticas para el problema de ruteo de vehículos abierto OVRP.

15 Apéndices

15.1 Apéndice A. Código de la heurística del vecino más cercano

```
Option Explicit
Sub MatrizDeDistancias()

Application.ScreenUpdating = False

Dim i, j, TamañoMatriz As Long
Dim Parte1, Parte2, Resultado, nru As Variant
Dim VelocProm As Variant
Dim VenTiempo As Variant
Dim TimServ As Variant
Dim HoraInicio As Date
Dim HoraFin As Date
Dim TTMacro As Date

Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Activate

'Tamaño de la matriz

   TamañoMatriz = (Rows.End(xlDown).Row) - 1
   Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(27, 8).Value
= TamañoMatriz

HoraInicio = Now

'Nodos de la Matriz de Distancias

   For i = 1 To TamañoMatriz

      Worksheets("MatrizDeDistancias").Cells(10, 1).Value = "Puntos"
      Worksheets("MatrizDeDistancias").Cells(10, 1 + i).Value =
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(1 + i, 1)
      Worksheets("MatrizDeDistancias").Cells(10 + i, 1).Value =
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(1 + i, 1)
   Next i
'Llenado de Matriz de Distancias

   For i = 1 To TamañoMatriz 'filas
      For j = 1 To TamañoMatriz 'columnas
                                                                  '2
'1
      Parte1 =
(Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(1 + j,
```

```
2).Value) - (Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(i +
1, 2).Value) 'long X
        Parte2 =
(Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(1 + j,
3).Value) - (Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(i +
1, 3).Value) 'latit Y
        Resultado = Sqr(((84.8 * Parte1) ^ 2) + ((110.56 * Parte2) ^ 2))
'Distancia de dos puntos usando formula de aproximación de geometría
esférica
        Worksheets("MatrizDeDistancias").Cells(10 + i, 1 + j).Value =
Resultado

        Next j
    Next i



Call RutasVMC

'Tiempo Total de Ejecución de Macro

HoraFin = Now
TTMacro = HoraFin - HoraInicio
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Activate
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(29, 8).Value =
TTMacro
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(31, 8).Activate
MsgBox "Rutas generadas, favor consultar listados en la hoja Rutas"

End Sub

Sub RutasVMC()

Application.ScreenUpdating = False

Dim i, j, ncli As Long
Dim Tiempo, VenT, tn, TimServ As Variant
Dim Dist, velpro As Variant
Dim nro, nr, nrp, cfil, nru, tru, Oent As Variant
Dim dnr, dnrp, Dru As Variant

Worksheets("ImagenMDD").Activate
        nro = 0 'Bodega
        VenT =
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(16, 8)
        Tiempo = 0
        tn = 0
        Dist = 0
        nru = 1 'Numero de rutas
```

```
        tru = 1 'Total cliente enrutados
        ncli = Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(27,
8) - 1 'Total Clientes
        i = 1
        velpro =
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(14, 8)
        Oent = 0 'Orden de entrega
        TimServ =
Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(18, 8)

Do While tru <= ncli

        Tiempo = 0
        Dru = 0
        Worksheets("ImagenMDD").Cells(11, 1).Select
        Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
        Selection.Copy
        Worksheets("ImagenMDD").Cells(4, 1).Select
        ActiveSheet.Paste

       Do While Tiempo <= VenT And tru <= ncli

           dnr = Cells(4, 3)
           dnrp = Cells(4, 4)
           nr = Cells(10, 3)
           cfil = 0


           For j = 1 To ncli - tru

              If dnr > dnrp And dnrp <> "" Then
                 dnr = dnrp
                 nr = Cells(10, 3 + j)
                 cfil = j
              End If
              dnrp = Cells(4, 4 + j)

           Next j
           i = cfil + 2
           Dru = Dru + dnr

           Tiempo = (Dru / velpro) + TimServ * (Oent + 1)
           tn = (dnr / velpro) + TimServ * (Oent + 1)

                    If Tiempo <= VenT Then

                       Worksheets("ImagenMDD").Cells(10, 3 + cfil).Select
                       Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
```

```
                    Selection.Delete Shift:=xlToLeft

                    Worksheets("ImagenMDD").Cells(4, 1).Select
                    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
                    Selection.ClearContents
                    Worksheets("ImagenMDD").Cells(10 + i, 1).Select
                    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
                    Selection.Copy
                    Worksheets("ImagenMDD").Cells(4, 1).Select
                    ActiveSheet.Paste
                    Worksheets("ImagenMDD").Cells(10 + i, 1).Select
                    Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
                    Selection.Delete Shift:=xlUp

                    tru = tru + 1

                  Else

                    If tn >= VenT Then

                        Worksheets("ImagenMDD").Cells(10, 3 +
cfil).Select
                        Range(Selection, Selection.End(xlDown)).Select
                        Selection.Delete Shift:=xlToLeft

                        Worksheets("ImagenMDD").Cells(4, 1).Select
                        Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
                        Selection.ClearContents
                        Worksheets("ImagenMDD").Cells(10 + i, 1).Select
                        Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
                        Selection.Copy
                        Worksheets("ImagenMDD").Cells(4, 1).Select
                        ActiveSheet.Paste
                        Worksheets("ImagenMDD").Cells(10 + i, 1).Select
                        Range(Selection, Selection.End(xlToRight)).Select
                        Selection.Delete Shift:=xlUp

                    End If
                  End If
      Loop
      nru = nru + 1 'Contador de rutas

Loop

Worksheets("ParametrosEntradaCoordenadasX,Y").Cells(31, 8).Value =
nru - 1

End Sub
```

15.2 Apéndice B. Desarrollo del Test realizado con 50 puntos (incluido el depósito) en el aplicativo propuesto.

15.2.1 Coordenadas geográficas:

Tabla 13. Coordenadas geográficas (Test 50 puntos)

Cód.	**X LONGITUD**	**Y LATITUD**
P1[16]	-74,107090269	4,647508959
P2	-74,098594142	4,646907552
P3	-74,0426996	4,701984565
P4	-74,049988036	4,737000026
P5	-74,053187925	4,665217555
P6	-74,070188117	4,722112107
P7	-74,043813266	4,699063746
P8	-74,0685637	4,675036557
P9	-74,071437432	4,689074292
P10	-74,064768417	4,727680747
P11	-74,052658249	4,728027679
P12	-74,064633735	4,633927805
P13	-74,048201584	4,748252124
P14	-74,0622518	4,704441784
P15	-74,043076016	4,701575836
P16	-74,029662231	4,743164661
P17	-74,041170948	4,721919008
P18	-74,040065491	4,737916111
P19	-74,0395375	4,724659722
P20	-74,053811433	4,749338433
P21	-74,0299662	4,76594554
P22	-74,093886524	4,632611614
P23	-74,085221694	4,568784944
P24	-74,087090849	4,643259939
P25	-74,10378043	4,58251652
P26	-74,077387186	4,687983796

[16] Para hacer uso del aplicativo de ruteo, en la primera fila se deben ubicar siempre las coordenadas del depósito (en este caso las coordenadas son Cód. **P1**.

P27	-74,10369628	4,497031368
P28	-74,08960338	4,751768077
P29	-74,10351763	4,744436874
P30	-74,08647167	4,740458848
P31	-74,10323068	4,645332696
P32	-74,10381902	4,583410071
P33	-74,1021039	4,589600423

P34	-74,07589212	4,657272639
P35	-74,10145981	4,583817888
P36	-74,06779388	4,694696946
P37	-74,03820619	4,743217911
P38	-74,06779136	4,725767808
P39	-74,03742949	4,72671403
P40	-74,06775218	4,681622291

Fuente: Autor

15.2.2 Parámetros de entrada:

3. Registre los valores de los siguientes parámetros para la generación de rutas:

Velocidad Promedio Km/h	24
Tiempo total maximo de Ruta, valor en numero de horas "0,00"	3
Tiempo de servicio, valor en numero de horas 0,00	0,0833

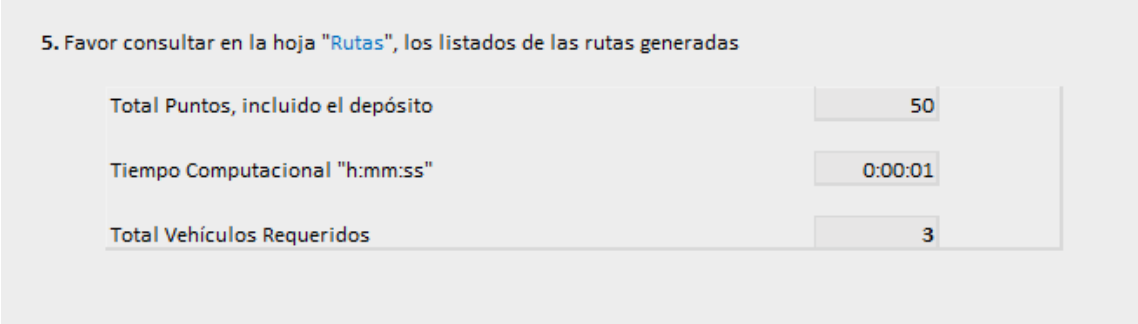
15.2.3 Matriz de distancias generada con el aplicativo propuesto.

Tabla 14. Matriz de distancias.

Puntos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41	P42	P43	P44	P45	P46	P47	P48	P49	P50
P1	0	0,723533	8,12955	11,01551	4,972577	8,821796	7,828257	4,465	5,500817	9,562791	10,02767	3,900879	12,20641	7,353784	8,074635	12,44815	9,946229	11,49838	10,27486	12,13101	14,63677	1,991596	8,899094	1,759811	7,191044	5,135092	16,63929	11,62188	10,72063	10,42422	0,406217	7,0922	6,416316	2,857354	7,057853	6,190527	12,08683	9,2719	10,56309	5,035153	13,81467	3,362013	8,18889	3,478695	11,0604	8,998906	11,00915	5,41952	9,078702	5,98007
P2	0,723533	0	7,716605	10,77976	4,350167	8,656518	7,404806	4,019555	5,199723	9,379649	9,778056	3,217582	11,99189	7,068225	7,66134	12,14187	9,617181	11,21943	9,948674	11,94453	14,39014	1,630194	8,711358	1,055555	7,132644	4,884494	16,57596	11,61842	10,79092	10,39399	0,430007	7,034249	6,342863	2,240394	6,979425	5,893912	11,81546	9,101661	10,23499	4,644462	13,5815	2,638512	7,727668	2,769964	10,74327	8,819639	11,61836	5,062757	8,663751	5,549307
P3	8,12955	7,716605	0	3,920336	4,161124	3,222677	0,336452	3,69961	2,824212	3,401967	3,000615	7,750844	5,136575	1,680136	0,055326	4,685181	2,207761	3,978867	2,521265	5,319565	7,15349	8,812957	15,16158	7,504953	14,18768	3,323934	23,2425	6,790786	6,973353	5,645538	8,098063	14,09696	13,40752	5,688532	13,9825	2,275424	5,574656	3,382542	2,770374	3,095394	6,46455	6,702162	0,665884	7,272033	3,304282	3,142258	4,272611	2,749216	0,949167	11,17497
P4	11,01551	10,77976	3,920336	0	7,940908	2,375626	4,226794	7,029448	5,602171	1,622514	1,017498	11,46314	1,253222	3,746857	3,960116	1,853489	1,827326	0,847505	1,626897	1,402135	3,622718	12,12669	18,83633	10,83097	17,67835	5,896313	26,91902	3,735149	4,613174	3,117356	11,09495	17,58378	16,88512	9,084249	17,48924	4,914723	1,212761	1,954843	1,558018	6,305157	2,801928	10,3399	4,44094	10,92778	1,326934	2,1455	1,267288	5,829116	3,402858	14,9203
P5	4,972577	4,350167	4,161124	7,940908	0	6,453344	3,825546	1,696635	3,058084	6,975403	6,944433	3,592977	9,190035	4,404218	4,110213	8,845732	6,351197	8,114218	6,673091	9,300554	11,30925	4,990638	11,00221	3,762824	10,09992	3,247548	19,08158	10,05496	9,743028	8,784457	4,779292	10,01198	9,332737	2,116226	9,886771	3,486653	8,716799	6,808013	6,929129	2,194284	10,60087	2,601557	3,90334	3,141089	7,463482	6,509263	8,42778	2,604043	5,008971	7,016034
P6	8,821796	8,656518	3,222677	2,375626	6,453344	0	3,390543	5,206495	3,654197	0,768292	1,624048	9,761027	3,439264	2,066301	3,231256	4,150635	2,460749	3,094831	2,614389	3,315051	5,926177	10,09718	16,99972	8,834942	15,69438	3,822293	25,04663	3,66892	3,75238	2,453814	8,939229	15,59783	14,89838	7,184952	15,51807	3,037812	3,577756	0,4524	2,824141	4,481317	5,07506	8,587635	3,88704	9,187146	3,067674	0,244609	3,549093	3,995489	3,330645	13,20167
P7	7,828257	7,404806	0,336452	4,226794	3,825546	3,390543	0	3,385532	2,58983	3,628767	3,288921	7,414705	5,450984	1,672828	0,284686	5,021296	2,536793	4,307258	2,853025	5,62266	7,487104	8,485751	14,82547	7,178667	13,8526	3,099423	22,90666	7,002252	7,127276	5,833651	7,789548	13,76196	13,07282	5,361743	13,64715	2,090082	4,904786	3,584851	3,104577	2,799898	6,79403	6,365948	0,617005	6,935599	3,638723	3,330572	4,605821	2,476656	1,261078	10,84008
P8	4,465	4,019555	3,69961	7,029448	1,696635	5,206495	3,385532	0	1,571028	5,829233	6,011952	4,557185	8,276829	3,294809	3,644295	8,22296	5,68003	7,360026	6,013193	8,309523	10,57041	5,158685	11,83181	3,848519	10,65604	1,615206	19,90448	8,669022	8,225523	7,390785	4,407633	10,56217	9,864736	2,059954	10,46383	2,174633	7,965584	5,609229	6,293981	0,731364	9,799195	3,381151	3,723936	3,980685	6,816139	5,308976	7,731202	1,218317	4,645297	7,995561
P9	5,500817	5,199723	2,824212	5,602171	3,058084	3,654197	2,58983	1,571028	0	4,305632	4,59168	6,124233	6,832965	1,869078	2,773924	6,950736	4,44678	6,019708	4,774574	6,828399	9,197753	6,52633	13,35046	5,236279	12,09607	0,518743	21,40776	7,100543	6,698197	5,822371	5,536819	12,00062	11,3011	3,536226	11,91238	0,694191	6,616252	4,0686	5,063042	0,881171	8,398894	4,942745	3,117672	5,54148	5,559813	3,770552	6,420242	0,470214	3,739283	9,5528
P10	9,562791	9,379649	3,401967	1,622514	6,975403	0,768292	3,628767	5,829233	4,305632	0	1,027658	10,36533	2,673278	2,578147	3,422533	3,434117	2,100013	2,380921	2,165494	2,568429	5,158231	10,79698	17,65293	9,523584	16,38677	4,517461	25,71337	3,395193	3,772179	2,320142	9,670995	16,29069	15,59101	7,841265	16,20695	3,655703	2,832746	0,33233	3,320803	5,098505	4,30802	9,203821	4,042842	9,80306	2,464789	0,564648	2,832926	4,611073	3,290633	13,81746
P11	10,02767	9,778056	3,000615	1,017498	6,944433	1,624048	3,288921	6,011952	4,59168	1,027658	0	10,45313	2,267728	2,731613	3,035304	2,569726	1,185347	1,528255	1,173293	2,358145	4,612744	11,11345	17,82111	9,816243	16,66158	4,898778	25,90309	4,087128	4,678913	3,17975	10,09859	16,56707	15,8685	8,066976	16,47216	3,902171	2,079045	1,307385	1,29954	5,287831	3,807223	9,325928	3,570818	9,919572	1,452427	1,379515	1,976014	4,812338	2,627442	13,91124
P12	3,900879	3,217582	7,750844	11,46314	3,592977	9,761027	7,414705	4,557185	6,124233	10,36533	10,45313	0	12,71627	7,798642	7,699342	12,436	9,929685	11,68419	10,25458	12,79276	14,889	2,484901	7,410778	2,165901	6,582418	6,073495	15,49352	13,19936	12,65501	11,92277	3,507506	6,498974	5,840762	2,751919	6,359677	6,723979	12,28918	10,15736	10,51464	5,279729	14,16629	1,192367	7,48799	0,617997	11,04901	9,856454	12,0091	5,765724	8,60064	3,458971
P13	12,20641	11,99189	5,136575	1,253222	9,190035	3,439264	5,450984	8,276829	6,832965	2,673278	2,267728	12,71627	0	4,988058	5,178802	1,669726	2,971808	1,334876	2,709876	0,490642	2,493569	13,35928	20,0887	12,0673	18,92015	7,108055	28,17081	3,532327	4,709729	3,357737	12,29847	18,82531	18,12632	10,32914	18,73243	6,14974	1,014015	2,989843	2,55045	7,550849	1,63711	11,59279	5,624359	12,18586	2,122232	3,234673	1,383572	7,072609	4,54357	16,17326
P14	7,353784	7,068225	1,680136	3,746857	4,404218	2,066301	1,672828	3,294809	1,869078	2,578147	2,731613	7,798642	4,988058	0	1,656691	5,095699	2,632381	4,151684	2,950709	5,015111	7,330326	8,382398	15,12418	7,084631	13,93247	2,226712	23,19905	5,723429	5,638991	4,48051	7,401569	13,83775	13,13891	5,341759	13,74439	1,175431	4,747307	2,404145	3,239483	2,565677	6,536447	6,647034	2,280758	7,24497	3,717795	2,106219	4,556287	2,084951	2,332383	11,25511
P15	8,074635	7,66134	0,055326	3,960116	4,110213	3,231256	0,284686	3,644295	2,773924	3,422533	3,035304	7,699342	5,178802	1,656691	0	4,73667	2,254935	4,025883	2,569734	5,35853	7,203022	8,75791	15,11011	7,449851	14,13396	3,274739	23,19135	6,808918	6,980377	5,658855	8,04288	14,04321	13,35366	5,633471	13,92891	2,229784	4,622431	3,398009	2,820224	3,040631	6,512077	6,649228	0,664146	7,219548	3,354298	3,154785	4,321892	2,695775	1,004143	11,1246
P16	12,44815	12,14187	4,685181	1,853489	8,845732	4,150635	5,021296	8,22296	6,950736	3,434117	2,569726	12,436	1,669726	5,095699	4,73667	0	2,543596	1,055933	2,210658	2,158611	2,518786	13,38121	19,84676	12,0714	18,84055	7,321102	27,92731	5,171243	6,264517	4,82672	12,4865	18,74855	18,05524	10,2736	18,63977	5,258628	0,724551	3,762181	1,934374	7,531878	1,991861	11,37788	5,010669	11,95272	1,406965	3,909254	0,601867	7,087607	3,874825	15,85627
P17	9,946229	9,617181	2,207761	1,827326	6,351197	2,460749	2,536793	5,68003	4,44678	2,100013	1,185347	9,929685	2,971808	2,632381	2,254935	2,543596	0	1,771122	0,333172	2,315422	4,959443	10,83863	17,3377	9,528547	16,30119	4,848553	25,42263	5,26866	5,84383	4,354156	9,969565	16,20889	15,51486	7,730017	16,10166	3,762312	2,36819	2,297167	0,617827	4,992972	4,257253	8,852919	2,654792	9,432876	1,136686	2,242575	2,079954	4,555723	1,579512	13,36694
P18	11,49838	11,21943	3,978867	0,847505	8,114218	3,094831	4,307258	7,360026	6,019708	2,380921	1,528255	11,68419	1,334876	4,151684	4,025883	1,055933	1,771122	0	1,46631	1,718589	3,215096	12,50509	19,0872	11,19921	18,01052	6,363377	27,17334	4,471268	5,428823	3,945273	11,5528	17,91729	17,22103	9,419345	17,81482	3,325522	0,607002	2,707745	1,258513	6,651959	2,487592	10,59357	4,405023	11,17804	0,790135	2,853714	0,454267	6,192486	3,291305	15,12769
P19	10,27486	9,948674	2,521265	1,626897	6,673091	2,614389	2,853025	6,013193	4,774574	2,165494	1,173293	10,25458	2,709876	2,950709	2,569734	2,210658	0,333172	1,46631	0	2,984918	4,63616	11,1718	17,66358	9,86171	16,63282	5,171461	25,74797	5,196885	5,849552	4,346456	10,30013	16,54059	15,84673	8,062959	16,43301	4,088443	2,054897	2,399057	0,289034	5,325899	3,945293	9,181331	2,940104	9,760313	0,803936	2,38426	1,754831	4,887779	1,836721	13,68913
P20	12,13101	11,94453	5,319565	1,402135	9,300554	3,315051	5,62266	8,309523	6,828399	2,568429	2,358145	12,79276	0,490642	5,015111	5,35853	2,158611	2,315422	1,718589	2,984918	0	2,731298	13,34527	20,13892	12,0628	18,92433	7,071844	28,214	3,047021	4,249779	2,938436	12,23873	18,8288	18,12922	10,34958	18,74072	6,156424	1,486301	2,862949	2,861227	7,579457	1,873038	11,65424	5,842755	12,25041	2,483113	3,1321	1,838373	7,099558	4,794811	16,25173
P21	14,63677	14,39014	7,15349	3,622718	11,30925	5,926177	7,487104	10,57041	9,197753	5,158231	4,612744	14,889	2,493569	7,330326	7,203022	2,518786	4,959443	3,215096	4,63616	2,731298	0	15,70637	22,296	14,40317	21,22394	9,51135	30,38145	5,294576	6,675107	5,558785	14,71123	21,13053	20,43387	12,6303	21,02892	8,505344	2,608112	5,479082	4,383366	9,858064	0,86177	13,80594	7,515625	14,88485	2,1455	5,295819	3,822485	1,313909	3,947293	0,406217	7,0922
P22	1,991596	1,630194	8,812957	12,12669	4,990638	10,09718	8,485751	5,158685	6,52633	10,79698	11,11345	2,484901	13,35928	8,382398	8,75791	13,38121	10,83863	12,50509	11,1718	13,34527	15,70637	0	7,094828	1,310754	5,601701	6,279798	15,01282	13,17894	12,39035	11,94016	1,614297	5,504545	4,806102	3,12448	5,432727	7,211967	13,10854	10,53439	11,45265	5,854311	14,91871	2,582493	8,723062	2,341106	11,97454	10,24473	12,88431	6,313566	9,742267	3,988479
P23	8,899094	8,711358	15,16158	18,83633	11,00221	16,99972	14,82547	11,83181	13,35046	17,65293	17,82111	7,410778	20,0887	15,12418	15,11011	19,84676	17,3377	19,0872	17,66358	20,13892	22,296	7,094828	0	8,235481	2,186688	13,19536	8,086289	20,23403	19,48195	18,98056	8,599803	2,258681	2,710308	9,815137	2,158354	13,99906	19,69311	17,41885	17,92481	12,56295	21,56468	8,498677	14,88536	7,910089	18,45914	17,12101	19,41757	13,04873	5,01009	11,84926
P24	1,759811	1,055555	7,504953	10,83097	3,762824	8,834942	7,178667	3,848519	5,236279	9,523584	9,816243	2,165901	12,0673	7,084631	7,449851	12,0714	9,528547	11,19921	9,86171	12,0628	14,40317	1,310754	8,235481	0	6,863299	5,012671	16,22824	11,99855	11,27252	10,74644	1,387711	6,767347	6,06766	1,817139	6,683918	5,917626	11,80326	9,267719	10,14232	4,547341	13,61929	1,654502	7,42634	1,718893	10,66463	8,975426	11,57635	5,01009	8,436432	4,778382
P25	7,191044	7,132644	14,18768	17,67835	10,09992	15,69438	13,8526	10,65604	12,09607	16,38677	16,66158	6,582418	18,92015	13,93247	14,13396	18,84055	16,30119	18,01052	16,63282	18,92433	21,22394	5,601701	2,186688	6,863299	0	11,87332	9,451241	18,75103	17,90193	17,52368	6,945113	0,098845	0,795995	8,596727	0,243776	12,77258	18,617	16,12922	16,90623	11,3751	20,45511	7,503086	13,9962	6,96241	17,43629	15,83776	18,37098	11,84926	15,08069	7,98604
P26	5,135092	4,884494	3,323934	5,896313	3,247548	3,822293	3,099423	1,615206	0,518743	4,517461	4,898778	6,073495	7,108055	2,226712	3,274739	7,321102	4,848553	6,363377	5,171461	7,071844	9,51135	6,279798	13,19536	5,012671	11,87332	0	21,22926	7,127673	6,623124	5,852564	5,199884	11,77694	11,07737	3,397792	11,6961	1,101213	6,952044	4,255916	5,460493	1,078071	8,698241	4,882127	3,634472	5,47477	5,944097	3,965148	6,776035	0,860406	4,226605	9,463381
P27	16,63929	16,57596	23,2425	26,91902	19,08158	25,04663	22,90666	19,90448	21,40776	25,71337	25,90309	15,49352	28,17081	23,19905	23,19135	27,92731	25,42263	27,17334	25,74797	28,214	30,38145	15,01282	8,086289	16,22824	9,451241	21,22926	0	28,18903	27,35316	26,95295	16,39624	9,550035	10,23533	17,87248	9,596992	22,06496	27,77917	25,47173	26,00805	20,63474	29,65092	16,58424	22,95251	15,99633	26,54244	25,1756	27,50232	21,11905	24,07705	10,84008
P28	11,62188	11,61842	6,790786	3,735149	10,05496	3,66892	7,002252	8,669022	7,100543	3,395193	4,087128	13,19936	3,532327	5,723429	6,808918	5,171243	5,26866	4,471268	5,196885	3,047021	5,294576	13,17894	20,23403	11,99855	18,75103	7,127673	28,18903	0	1,431504	1,27824	11,8241	18,65266	17,96057	10,51192	18,59577	6,575243	4,459817	3,418261	5,219924	7,973613	4,562597	12,00895	7,436712	12,60238	5,061669	3,683852	4,748576	7,504466	6,65374	16,58431
P29	10,72063	10,79092	6,973353	4,613174	9,743028	3,75238	7,127276	8,225523	6,698197	3,772179	4,678913	12,65501	4,709729	5,638991	6,980377	6,264517	5,84383	5,428823	5,849552	4,249779	6,675107	12,39035	19,48195	11,27252	17,90193	6,623124	27,35316	1,431504	0	1,510925	10,95698	17,80314	17,11914	9,91753	17,75889	6,278441	5,54005	3,665885	5,936943	7,578161	5,910058	11,46415	7,638465	12,04459	5,893198	3,485372	11,09159	7,744017	12,08683	10,56276
P30	10,42422	10,39399	5,645538	3,117356	8,784457	2,453814	5,833651	7,390785	5,822371	2,320142	3,17975	11,92277	3,357737	4,48051	5,658855	4,82672	4,354156	3,945273	4,346456	2,938436	5,558785	11,94016	18,98056	10,74644	17,52368	5,852564	26,95295	1,27824	1,510925	0	10,61273	17,42552	16,7315	9,240721	2,668803	8,802735	6,230322	12,14598	9,386977	10,58731	5,014888	13,89667	3,019341	8,124655	3,302045	11,32674	4,38472	2,504493	4,309144	6,227609	5,609009	15,31248
P31	0,406217	0,430007	8,098063	11,09495	4,779292	8,939229	7,789548	4,407633	5,536819	9,670995	10,09859	3,507506	12,29847	7,401569	8,04288	12,4865	9,969565	11,5528	10,30013	12,23873	14,71123	1,614297	8,599803	1,387711	6,945113	5,199884	16,39624	11,8241	10,95698	10,61273	0	6,846347	6,162501	2,667803	6,802735	6,23032	12,14598	9,386977	10,58731	5,014888	13,89667	3,019341	8,124655	3,302045	11,09159	9,108836	11,95666	5,421409	9,046405	5,598985
P32	7,0922	7,034249	14,09696	17,58378	10,01198	15,59783	13,76196	10,56217	12,00062	16,29069	16,56707	6,498974	18,82531	13,83775	14,04321	18,74855	16,20889	17,91729	16,54059	18,8288	21,13053	5,504545	2,258681	6,767347	0,098845	11,77694	9,550035	18,65266	17,80314	17,42552	6,846347	0	0,699689	8,502702	0,205079	12,6746	18,52373	16,03285	16,8142	11,28086	20,36112	7,614373	13,90736	6,923832	12,14598	9,386977	10,58731	5,014888	13,89667	3,019341	8,124655	3,302045
P33	6,416316	6,342863	13,40752	16,88512	9,332737	14,89838	13,07282	9,864736	11,3011	15,59101	15,8685	5,840762	18,12632	13,13891	13,35366	18,05524	15,51486	17,22103	15,84673	18,12922	20,43387	4,806102	2,710308	6,06766	0,795995	11,07737	10,23533	17,96057	17,11914	16,7315	6,162501	0,699689	0	7,805036	0,641646	11,9782	17,82737	15,33328	16,12087	10,58276	19,66335	6,732809	13,22426	6,200584	16,65038	15,04187	17,58316	11,05618	14,30424	3,269593
P34	2,857354	2,240394	5,688532	9,084249	2,116226	7,184952	5,361743	2,059954	3,536226	7,841265	8,066976	2,751919	10,32914	5,341759	5,633471	10,2736	7,730017	9,419345	8,062959	10,34958	12,6303	3,12448	9,815137	1,817139	8,596727	3,397792	17,87248	10,51192	9,91753	9,240721	2,667803	8,502702	7,805036	0	8,405595	4,194233	10,02512	7,603919	8,341542	2,779183	11,85841	1,579595	5,614143	2,135462	8,866694	7,306411	9,787947	3,256809	6,619295	6,072461
P35	7,057853	6,979425	13,9825	17,48924	9,886771	15,51807	13,64715	10,46383	11,91238	16,20695	16,47216	6,359677	18,73243	13,99281	18,63977	16,10166	17,81482	16,43301	18,74072	21,02892	19,48195	2,432727	2,158354	6,683918	2,243776	11,99855	11,27252	10,74644	1,387711	6,767347	6,06766	1,817139	6,683918	5,917626	11,80326	9,267719	10,14232	4,547341	13,61929	1,654502	7,42634	1,718893	10,66463	8,975426	11,57635	5,01009	8,436432	4,778382
P36	6,190527	5,893912	2,275422	4,914723	3,486653	3,037812	2,090082	2,174633	0,694191	3,655703	3,902171	6,723979	6,14974	1,175431	2,229784	6,258628	3,762312	5,325522	4,088443	6,156424	8,505344	7,211967	13,99906	5,917626	12,77258	1,101213	22,06496	6,575243	6,278441	5,301562	6,23032	12,67746	11,9782	4,194233	12,58683	0	5,922237	3,435194	4,377255	1,445538	7,708925	5,553917	2,670024	6,153493	4,870208	3,134716	5,726424	0,958472	3,14854	10,16877
P37	12,08683	11,81546	4,574656	1,212761	8,716799	3,577756	4,904786	7,965584	6,616252	2,832746	2,079045	12,28918	1,014015	4,747307	4,622431	0,724551	2,36819	0,607002	2,054897	1,486301	2,608112	13,10854	19,69311	11,80326	18,617	6,952044	27,77917	4,459817	5,54005	4,104265	12,14598	18,52373	17,82737	10,02512	18,42148	5,922237	0	3,164858	1,825858	7,256293	1,890397	11,20011	4,983349	11,78425	1,313909	3,342854	0,392903	6,795286	3,860091	15,73129
P38	9,2719	9,101661	3,382542	2,770374	3,095394	6,808013	6,929129	2,194284	4,481317	2,799898	2,731364	0,881171	5,098505	5,287831	5,279729	7,550849	2,565677	3,040631	7,539457	9,858064	5,854311	12,56295	4,547341	11,3751	1,078071	20,63474	7,973613	7,578161	6,695858	5,014888	11,28086	10,58276	2,779183	11,18468	1,445538	7,256293	4,880729	5,609417	0	9,08099	4,108379	3,210444	4,707955	6,126548	4,880729	5,609417	0	9,08099	4,108379	3,210444
P39	10,56309	10,23499	4,644462	13,5815	2,638512	7,727668	2,769964	10,74327	8,819639	11,61836	5,062757	8,663751	5,549307	11,17497	14,92303	11,61842	10,79092	10,39399	0,430007	7,034249	6,342863	2,240394	6,979425	5,893912	11,81546	9,101661	10,23499	4,644462	13,5815	2,638512	7,727668	2,769964	10,74327	8,819639	11,61836	5,062757	8,663751	5,549307	0	7,716605	7,776976	4,350167	8,656518	3,222677	2,375626	6,453344	0	3,390543	5,206495	3,654197
P40	5,035153	4,644462	3,095394	6,305157	2,194284	4,481317	2,799898	0,731364	0,881171	5,098505	5,287831	5,279729	7,550849	2,565677	3,040631	7,531878	4,992972	6,651959	5,325899	7,579457	9,858064	5,854311	12,56295	4,547341	11,3751	1,078071	20,63474	7,973613	7,578161	6,695858	5,014888	11,28086	10,58276	2,779183	11,18468	1,445538	7,256293	4,880729	5,609417	0	9,08099	4,108379	3,210444	4,707955	6,126548	4,880729	5,609417	0	9,08099	4,108379
P41	13,81467	13,5815	6,46455	2,801928	10,60087	5,07506	6,79403	9,799195	8,398894	4,30802	3,807223	14,16629	1,63711	6,536447	6,512077	1,991861	4,257253	2,487592	3,945293	1,873038	0,86177	14,91871	21,56468	13,61929	20,45511	8,698241	29,65092	4,562597	5,910058	4,736668	13,89667	20,36112	19,66335	11,85841	20,2629	7,708925	1,890397	4,626393	3,712318	9,08099	0	13,0675	6,869054	5,649142	0	13,0675	6,869054	5,649142
P42	3,362013	2,638512	6,702162	10,3399	2,601557	8,587635	6,365948	3,381151	4,942745	9,203821	9,325928	1,192367	11,59279	6,647034	6,649228	11,37788	8,852919	10,59357	9,181331	11,65424	13,80594	2,582493	8,498677	1,654502	7,503086	4,882127	16,58424	12,00895	11,46415	10,73276	3,019341	7,414373	6,732809	1,579595	7,292383	5,553917	11,20011	8,989106	9,447757	4,108379	13,0675	0	6,493142	0,599587	9,981095	8,688566	10,93213	4,59563	7,582278	4,614856
P43	8,18889	7,727668	0,665884	4,44094	3,90334	3,88704	0,617005	3,723936	3,117672	4,042842	3,570818	14,16629	7,48799	5,624359	2,280758	0,664146	5,010669	2,654792	4,405023	2,940104	5,842755	7,515625	8,723062	14,88536	7,42634	13,9962	3,634472	22,95251	7,436712	7,638465	6,303291	8,124455	13,90736	13,22426	5,614143	13,78524	2,670024	4,983349	4,037039	3,157617	3,210444	6,869054	6,493142	0	7,043581	3,679886	3,802223	4,654209	2,946092	1,135975	10,87251
P44	3,478695	2,769964	2,272033	10,93278	3,141089	9,187146	6,935599	3,980685	5,54148	9,80306	9,919572	6,617997	12,18586	7,24497	7,219548	11,95272	9,432876	11,17804	9,760313	12,25041	14,38874	2,341106	7,910089	1,718893	6,96241	5,47477	15,99633	12,60238	12,04459	11,32674	3,302045	6,875339	6,200584	2,135462	6,747457	6,153493	11,78425	5,588678	10,02484	4,707955	13,65459	0,599587	7,043581	0	10,55866	9,288128	11,51269	5,19519	8,142207	4,015286
P45	11,0604	10,74327	3,304282	1,326934	7,463482	3,067674	3,638723	6,816139	5,559813	2,464789	1,452427	11,04901	2,122232	3,717795

15.2.4 Resultado arrojado por la heurística del vecino más cercano al problema de ruteo de vehículos abierto

Figura 20. Total, vehículos requeridos



5. Favor consultar en la hoja "Rutas", los listados de las rutas generadas

Total Puntos, incluido el depósito	50
Tiempo Computacional "h:mm:ss"	0:00:01
Total Vehículos Requeridos	3

Fuente: Autor

15.2.5 Listado con el orden de entrega por ruta, arrojado por el aplicativo propuesto.

Figura 21. Listado de entrega

ID PUNTO	RUTA	ORDEN DE ENTREGA	DISTANCIA KM	TIEMPO ENTREGA min.	OBSERVACIONES
P1	Ruta 1	0	0	0	Depósito
P31	Ruta 1	1	0,406217324	0,100225722	
P2	Ruta 1	2	0,836224334	0,201442681	
P24	Ruta 1	3	1,89177898	0,328724124	
P22	Ruta 1	4	3,202533386	0,466638891	
P44	Ruta 1	5	5,543639412	0,647484976	
P42	Ruta 1	6	6,143226319	0,755767763	
P12	Ruta 1	7	7,33559291	0,888749705	
P34	Ruta 1	8	10,08751218	1,086713008	
P8	Ruta 1	9	12,14746667	1,255844444	
P40	Ruta 1	10	12,87883024	1,369617927	

ID PUNTO	RUTA	ORDEN DE ENTREGA	DISTANCIA KM	TIEMPO ENTREGA min.	OBSERVACIONES
P48	Ruta 1	11	13,36634285	1,473230952	
P9	Ruta 1	12	13,83655719	1,576123216	
P26	Ruta 1	13	14,35530068	1,681037528	
P36	Ruta 1	14	15,45651406	1,810221419	
P14	Ruta 1	15	16,63194496	1,942497707	
P15	Ruta 1	16	18,28863594	2,094826498	
P3	Ruta 1	17	18,34396152	2,18043173	
P7	Ruta 1	18	18,68041315	2,277750548	
P43	Ruta 1	19	19,29741831	2,386759096	
P49	Ruta 1	20	20,43339332	2,517391388	
P17	Ruta 1	21	22,01290563	2,666504401	
P19	Ruta 1	22	22,34607783	2,763686576	
P39	Ruta 1	23	22,63511147	2,859029645	
P45	Ruta 1	24	23,16952391	2,964596829	
P1	Ruta 2	0	0	0	Depósito
P5	Ruta 2	1	4,972577096	0,290490712	
P6	Ruta 2	2	11,42592105	0,642680044	
P46	Ruta 2	3	11,67053009	0,736172087	
P38	Ruta 2	4	11,9716213	0,832017554	
P10	Ruta 2	5	12,3039513	0,929164637	
P11	Ruta 2	6	13,33160963	1,055283734	
P4	Ruta 2	7	14,34910743	1,180979476	

ID PUNTO	RUTA	ORDEN DE ENTREGA	DISTANCIA KM	TIEMPO ENTREGA min.	OBSERVACIONES
P18	Ruta 2	8	15,19661264	1,299592193	
P47	Ruta 2	9	15,65087915	1,401819964	
P37	Ruta 2	10	16,04378242	1,501490934	
P16	Ruta 2	11	16,76833362	1,614980567	
P13	Ruta 2	12	18,43805983	1,767852493	
P20	Ruta 2	13	18,92870225	1,871595927	
P41	Ruta 2	14	20,80174061	2,032939192	
P21	Ruta 2	15	21,66351072	2,15214628	
P28	Ruta 2	16	26,95808701	2,456053626	
P30	Ruta 2	17	28,23632719	2,592613633	
P29	Ruta 2	18	29,74725265	2,73886886	
P1	Ruta 3	0	0	0	Depósito
P50	Ruta 3	1	5,98007001	0,332469584	
P33	Ruta 3	2	9,249662727	0,552002614	
P35	Ruta 3	3	9,891308685	0,662037862	
P32	Ruta 3	4	10,09638776	0,753882823	
P25	Ruta 3	5	10,19523293	0,841301372	
P23	Ruta 3	6	12,38192124	1,015713385	
P27	Ruta 3	7	20,46820985	1,435942077	

Fuente: Autor

El listado generado (figura 21), se puede apreciar como resultado, la distribución de los **49 clientes** en tres rutas, de la siguiente forma:

- **Ruta 1** entrega **24 clientes** en un tiempo total de ruta de **2,9 horas**.
- **Ruta 2** entrega **18 clientes** en **2,7 horas**
- **Ruta 3** entrega **7 clientes** en **1, 4 horas**.

15.2.6 Grafica de rutas

Figura 22. Grafica de rutas

Ruta 1 – Ruta 2 – Ruta 3

Fuente: Autor

La figura 22. Muestra las rutas generadas por el aplicativo desarrollado en este trabajo de grado, sin embargo, es importante destacar que las gráficas no son generadas por el mismo, para esto se puede apoyar en software libres como ArcGIS Online.

16 Bibliografía

Fung , R., & Liu , R. (2012). *A memetic algorithm for the open capacitated arc routing problem.* Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.

Lüer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (2009). *El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución, estado del arte.* Chile: Departamento de Ingeniería de Sistemas Universidad de La Frontera.

Adam N Letchford, J. L. (2007). A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem.

Aksen, D., Özyurt, Z., & Aras, N. (2007). *The open vehicle routing problem with driver nodes and.* Journal of the Operational Research Society, Vol. 58, pag. 1223–1234.

ArcGis. (Abril de 2016). *ArcGis*. Obtenido de ArcGis Resources: http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm

Bakarcic, D., & Di Piazza, G. (2012). *Ruteo de vehículos y asignación de conductores: un enfoque combinado.* Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.

Baldacci, R., Christofides, N., & Mingozzi, A. (2008). *An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts.* Math Program, 115 (2008), pp. 351–385.

Beasley, J. (1983). *Route First - Clouster Second Methods for Vehicle Routing.* Obtenido de http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/papers/omega_83.pdf

Belenguer, J., & Benavent, E. (2003). *A cutting plane algorithm for the capacitated arc routing problem.* Computers & Operations Research, 30 (5), pp. 705–728.

Blum, C., & Roli, A. (2001). *Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison.*

Brandão, J. (2004). *A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem.* European Journal of Operational Research.

Calviño Martínez , A. (2011). *Cooperación en los problemas del viajante (TSP) y la rutas de vehículos (VRP): una panorámica.* Santiago de Compostela: USC Compostela.

Contreras P., C., & Díaz D., M. (2010). *Métodos Heurísticos para la solución del ruteo de vehiculos con capacidad CVRP.* Universidad Industrial de Santander.

Daneshzand, F. (2011). *The Vehicle-Routing Problem.* Tehran, Iran: Department of Industrial Engineering, Amirkabir University of Technology.

Dhahri, A., Zidi, K., & Ghedira, K. (2012). *Variable Neighborhood Search Based Set covering ILP model for the Vehicle Routing Problem with time windows.* International Conference on Computational Science.

Dib , O., Manier , M.-A., Moalic , L., & Caminada , A. (2015). *Combining VNS with Genetic Algorithm to solve the one-to-one routing issue in road networks.* Computers & Operations Research.

Emmanouil E. Zachariadis, C. T. (2010). *An Open Vehicle Routing Problem metaheuristic for examining wide solution neighborhoods.* Athens: Department of Process Analysis and Plant Design, National Technical University of Athens . Recuperado el 25 de 03 de 2015, de http://users.ntua.gr/ezach/BLSA_OVRP_Paper.pdf

Franco, L. A. (2010). *Algoritmo de Optimización basado en Colonias de Hormigas aplicadas al Problema de Asignación Cuadratica Y otros problemas relacionados.* San Luis - Argentina: Universidad Nacional de San Luis. Departamento de Informatica.

Gendreau, M., Laporte, G., & Potvin, Y. (2002). *The Vehicle Routing Problem.* Paolo Toth and Daniele Vigo.

Gutiérrez, V., Palacio, J. D., & Villegas, J. G. (28 de febrero 2007). *Reseña del software disponible en Colombia para el diseño de rutas de distribución y servicios.* Revista Universidad EAFIT, 20.

Hall, R. (2006). *Vehicule Routing: On the road to integration. 2006 survey of vehicle routing software spotlights critical supply chain management role En: OR/MS today. Vol. 33 N°. 3.* Obtenido de http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/Vehicle Routing/vrss.html: análisis comparativo del aplicativo desarrollado en este trabajo de grado con algunos de los softwares disponibles en Colombia para el diseño de rutas de distribución.

Hirabayashi, R., Saruwatari, Y., & Nishida, N. (1992). *Tour construction algorithm for the capacitated arc routing problem.* Asia–Pacific Journal of Operational Research, 9 (2) (1992), pp. 155–175.

Letchford, A., Lysgaard, J., & Eglese, R. (2006). *A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem.* Journal of the Operational Research Society.

Longo, H., De Araga˜o, M., & Uchoa, E. (2006). *Solving capacitated arc routing problems using a transformation to the CVRP.* Computers & Operations Research, 33 (6), pp. 1823–1837.

Lysgaard, J., & Sørensen, M. (1997). *Algoritmo de ahorro de Clarke y Wright.* Ciencia del Departamento de gestión y logística.

Micó Andrés, M. (1996). *Algoritmos de búsqueda de vecinos más próximos en espacios métricos.* Valencia.: Departamento de Sistemas Informˊaticos y Computación. Universidad Politécnica de Valencia.

MINEDUCACION. (19 de Marzo de 2015). *Ministerio de Educación*. Obtenido de PAE: http://www.mineducacion.gov.co/1621/w3-article-349942.html

Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas de Ruteo de Vehículos.* Uruguay: Universidad de la Republica de Montevideo, Facultad de Ingeniería.

Parragh, S., Doerner, K., & Hartl, R. (2008). *Una encuesta sobre los problemas de recogida y entrega. Parte I: El transporte entre los clientes y de depósito.* Journal für Betriebswirtschaft, 58 (1) (2008), pp. 21-51.

Prins, C., Lacomme, P., & Prodhon, C. (2014). *Order-first split-second methods for vehicle routing problems:.* journal homepage: www.el sevier.com/locate/trc.

Sariklis, D., & Powell, S. (2000). *A heuristic method for the open vehicle routing problem.* ournal of the Operational Research Society, 51 (5), pp. 564–573.

SIAMAC - Sistema de Información de la Amazonia Colombiana. (s.f.). (SIAMAC) Recuperado el 14 de 03 de 2015, de UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE AMAZONIA: http://www.unal.edu.co/siamac/sig/tips.html

Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem.* United States of America: SIAM.

Usberti, F., França, P., & França, A. (2011). *The open capacitated arc routing problem.* Computers & Operations Research.