

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
Ingeniero e Ingeniera de Sistemas**

**TEMA:
ESTUDIO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LA METAHEURÍSTICA DE
BÚSQUEDA APLICADO A FLUJO DE TRÁFICO.**

**AUTOR Y AUTORA:
DANNY GABRIEL ORTIZ GUEVARA
FERNANDA LIZETH HIDALGO VELAÑO**

**TUTORA:
LINA PATRICIA ZAPATA MOLINA**

Quito, agosto del 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Danny Gabriel Ortiz Guevara, con documento de identificación N° 1721852612, y Fernanda Lizeth Hidalgo Velaño, con documento de identificación N° 1726772781, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autor y autora del artículo académico con el tema : “ESTUDIO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LA METAHEURÍSTICA DE BÚSQUEDA APLICADO A FLUJO DE TRÁFICO ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO E INGENIERA DE SISTEMAS en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autor y autora nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



FERNANDA LIZETH
HIDALGO VELAÑO

CI: 1726772781



DANNY GABRIEL
ORTIZ GUEVARA

CI: 1721852612

Quito, agosto del 2018

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico, con el tema: “ESTUDIO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LA METAHEURÍSTICA DE BÚSQUEDA APLICADO A FLUJO DE TRÁFICO” realizado por Danny Gabriel Ortiz Guevara y Fernanda Lizeth Hidalgo Velaño, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Agosto del 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Lina Patricia Zapata Molina', is written over a horizontal dotted line. The signature is fluid and cursive.

LINA PATRICIA ZAPATA MOLINA

CI: 0501877278

Estudio, Análisis e Implementación de la Metaheurística de Búsqueda Aplicado a Flujo De Tráfico

Zapata M. Lina¹, Ortiz G. Danny², Hidalgo V. Fernanda³

Resumen

El avance acelerado que actualmente la tecnología posee en el área de informática, demanda el diseño de algoritmos de optimización y de búsqueda cada vez más eficientes para resolver problemas complejos. El siguiente trabajo presenta la implementación de una Metaheurística de Búsqueda Local aplicado al problema de ruteo de vehículos (VRP), utilizado para resolver el problema operacional que enfrentan las empresas de distribución de alimentos hoy en día para realizar sus servicios de entrega con calidad y en el menor tiempo. El propósito de esta investigación es la comprensión de las metaheurísticas de búsqueda local, aplicadas al flujo de tráfico a fin de determinar la mejor ruta desde un punto de origen hacia un punto destino.

Palabras Clave: Problema de enrutamiento de vehículos, Metaheurística

Abstract

The accelerated progress that technology currently has in the area of informatics, demands the design of optimization and search algorithms increasingly efficient to solve complex problems. The following work presents the implementation of a Local Search Metaheuristics applied to the problem of vehicle routing (VRP), used to solve the operational problem faced by food distribution companies today to perform their delivery services with quality and in the shortest time. The purpose of this research is the understanding of local search metaheuristics, the applications of traffic flow in order to determine the best route from a point of origin to a destination point.

Keywords: Vehicle routing problem, Metaheuristics

¹ Magister en Redes de Información y Conectividad, Ingeniera en Sistemas, Docente de la Carrera de Ingeniería de Sistemas -Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito – Campus Sur. Autora para correspondencia: lzapata@ups.edu.ec

² Estudiante de Ingeniería de Sistemas-Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito – Campus Sur. Autor para correspondencia: dortig@est.ups.edu.ec

³ Estudiante de Ingeniería de Sistemas-Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito – Campus Sur. Autora para correspondencia: fhidalgov@est.ups.edu.ec

1. Introducción

El desarrollo del presente trabajo tiene dos enfoques, el primer enfoque trata sobre la lógica del algoritmo metaheurístico de búsqueda local, entendiéndose como metaheurística al grupo de métodos de búsqueda por entornos, en las que se comienza de una solución inicial a la que se efectúan alteraciones en sucesivas iteraciones para obtener una solución final [1]. El segundo enfoque es abordar el problema del ruteo de vehículos VRP, el cual es un método que plantea la búsqueda de la solución óptima para determinar las mejores rutas con un menor costo tomando en cuenta ciertas restricciones tales como: la capacidad del vehículo, lugares de destino (Clientes) y que satisfaga la demanda de los clientes, entre otras [2].

La problemática planteada está enfocada para resolver el problema operacional que enfrenta la mayoría de empresas dedicadas a la distribución de alimentos y que tiene como objetivo que dicha distribución se la realice de manera que se pueda tener ahorro de recursos y manejo de menores tiempo.

Para alcanzar una adecuada comprensión de la lógica del algoritmo metaheurístico de búsqueda local es necesario tener claro el funcionamiento lógico del algoritmo Agente Viajero enfocado al problema de ruteo de vehículo. El objetivo del algoritmo es armar m rutas, una para cada vehículo, visitando a todos los clientes una sola vez por alguno de los vehículos. Cada ruta debe comenzar y terminar en el mismo punto y puede tener p clientes [3]. Cada cliente tiene cierta demanda que deberá ser satisfecha por algún vehículo. En muchos casos, la demanda es un bien que ocupa lugar en los vehículos y es usual que un mismo vehículo no pueda satisfacer la demanda de todos los clientes en una misma ruta. Regularmente cada ruta debe

comenzar y finalizar en un mismo punto, aunque esto no siempre pasa en algunas aplicaciones [4].

El objetivo de este estudio será determinar un conjunto de rutas que presenten un costo mínimo, en donde el recorrido se inicie y termine en el mismo punto (Depósito), considerando un conjunto de clientes y almacenes, los cuales se encuentran ubicados en distintos puntos geográficos con una determinada flota de vehículos, estos pueden ser iguales en su capacidad o presentar diferencias. El propósito de esta investigación es la comprensión de las metaheurísticas de búsqueda local, estos son métodos que usan movimientos para recorrer un espacio de soluciones posibles y examinar las estructuras de entornos relacionados [5]. Todo esto aplicado a flujo de tráfico a fin de determinar la mejor ruta desde un punto de origen hacia un punto destino.

El documento está organizado en secciones donde la primera sección se trata sobre el estudio de la metodología Clarke and Wright para obtener una solución inicial y la metodología de la metaheurística de Búsqueda Tabú. La segunda sección describe un caso de estudio de simulación de la implementación del algoritmo de búsqueda tabú. La tercera sección muestra las pruebas realizadas utilizando datos reales Y la cuarta sección describe las conclusiones que se obtuvo del trabajo realizado.

2. Metodología

2.1 Solución Inicial

El algoritmo de búsqueda tabú en su primera fase busca una solución inicial para lo cual se tiene el vector de demanda de los clientes, así también el vector de coordenadas geográficas de posición de cada uno de estos, para calcular primero el

costo se debe ir desde un punto origen hacia otro punto de destino mediante el método de distancia Haversine ¹.

Para obtener una solución inicial existe algunos métodos, entre los más conocidos tenemos el método Del Vecino Más Cercano, que tiene como objetivo principal elegir el cliente más cercano al depósito, después busca el más cercano al último cliente que se escogió hasta visitar todos los clientes [6]. Otro método conocido es el “Clarke and Wright” el cual basándose en la distancia, calcula el ahorro en distancia de ir de un punto al otro [7].

Para calcular la solución inicial, a nuestro problema planteado, utilizamos el método “Clarke and Wright” porque devuelve mejores resultados en comparación con el método del Vecino más cercano [6]. Los pasos a seguir son:

Calcular la matriz de ahorros basándose en la Ec. 1.

$$S_{ij} = c_{i,0} + c_{0,j} - c_{i,j} \quad (1)$$

Donde:

S_{ij} = Ahorro que se obtiene al unir los clientes (i,j) en una sola ruta.

$c_{i,0}$ = Costo de ir del cliente i al depósito.

$c_{0,j}$ = Costo de ir del cliente j al depósito.

$c_{i,j}$ = Costo de ir del cliente i al cliente j

Lo que permitirá armar las rutas, para esto se escoge los puntos que tiene un mayor ahorro que no han sido visitados aun y se le agrega a una ruta.

Tomar en consideración la demanda de los clientes, si el vehículo sobrepasa su capacidad se escoge los puntos subsiguientes con mayor ahorro que no

sobrepase la capacidad del vehículo, de no existir se cierra esa ruta y se empieza una nueva. En este proceso se va sumando el costo de ir de un punto a otro de cada punto que se tiene en la ruta para tener el costo de toda la ruta. Este proceso se realiza para la ruta de cada vehículo hasta que todos los puntos sean visitados. La unión de cada ruta que se generó para cada vehículo es la solución inicial utilizada para el algoritmo tabú.

2.2 Algoritmo de búsqueda Tabú

Una vez encontrada la solución inicial, se procede aplicar el método metaheurística de búsqueda tabú a cada una de las rutas encontradas en la solución inicial, para lo cual como primer paso se necesita generar una vecindad² utilizando el método 2-opt, el cual consiste en intercambiar la posición de dos nodos con el objetivo de encontrar una nueva ruta que tenga una mejor solución. Es decir, consiste en eliminar dos aristas o clientes y conectar los dos caminos resultantes, de una manera diferente, para obtener un nuevo ciclo o ruta [8].

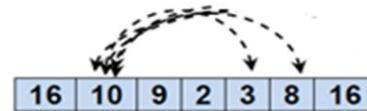


Figura. 1. Método 2-opt

El siguiente paso es definir la lista tabú ³ (Memoria a Corto Plazo) que almacena la combinación de nodos que se han utilizado

² Vecindad es el conjunto de todas las soluciones que se pueden encontrar a partir de una solución por medio de un movimiento que puede ser una inserción, un intercambio o una eliminación de componentes en una solución [3].

³ Lista Tabú es una lista creada para guardar los movimientos que no se permiten (movimientos tabú) en la actual iteración. Con el fin de evitar movimientos que regresen a un punto de alguna iteración anterior y de esta manera producir ciclos en la búsqueda [3].

¹Calcula la distancia que existe entre dos puntos de tipo coordenadas geográficas.

y se las penaliza por un cierto número de iteraciones evitando caer en un ciclo. Basándose tanto en la lista tabú como en la memoria de frecuencia se crea el criterio de aspiración, este criterio permite que una combinación de nodos sea admisible aunque sea considerado como un movimiento tabú. El más sencillo de aplicar, es considerar una solución S cuando $f(s_0) < f(s^*)$, facilitando con este movimiento una nueva dirección en la búsqueda garantizando que no se creen ciclos. Es decir, si una combinación de nodos tiene un menor costo que las otras soluciones generadas y tiene una baja frecuencia, se la puede escoger, aunque esté en la lista tabú.

Para evitar que el algoritmo caiga en un ciclo sin fin se debe definir un criterio de parada, es decir se debe definir un número máximo de iteraciones, se determina el número de iteraciones según el tamaño de nodos que se tenga, a mayor número de nodos mayor deberá ser el número de iteraciones a escoger.

3. Simulación

Es importante recalcar que la automatización del algoritmo de búsqueda tabú está enfocada a encontrar las mejores rutas en tiempo y distancia para el ahorro de recursos en que él envió de los diferentes productos a cada uno de los clientes.

La automatización del algoritmo de búsqueda tabú se realizó en JAVA, la Figura 2 representa los datos de entrada que se necesitan para la ejecución del programa y los datos de salida que arroja como resultados el programa.

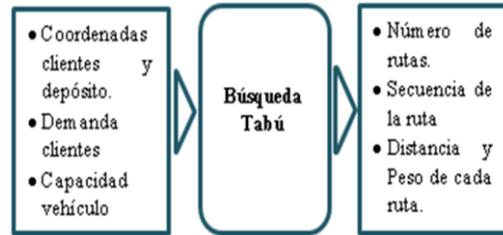


Figura. 2. Datos de entrada y salida para la implementación del algoritmo de Búsqueda Tabú.

3.1 Datos de los Clientes

Para realizar la simulación se recolecto las coordenadas geográficas de los puntos de venta que tiene el supermercado AKI, estos puntos están ubicados en la ciudad de Quito, la cual es abastecida por la empresa La Favorita ubicada en Amaguaña en las afueras de Quito, la ubicación de los puntos de venta del supermercado AKI fueron proporcionados por su página web así mismo como la ubicación del depósito de la empresa la favorita [9], como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1: Dirección de los puntos de ventas

Nº Cliente	Dirección
0	Centro de Distribución de Corporación Favorita - Amaguaña
1	AKÍ LA VICENTINA - Ladrón de Guevara e Iberia
2	AKÍ GUAMANÍ - García Moreno
3	AKÍ GUAJALÓ - Av. Pedro Vicente Maldonado s/n entre Cusubamba y Lajas
4	AKÍ EL EJIDO - Av. 10 de Agosto N16-73 y Río de Janeiro
5	AKÍ COTOCOLLAO - Av. de la Prensa s/n y Aurelio Bastidas esquina
6	AKÍ CONOCOTO - Calle Flores #607 entre 7 Rocafuerte y García Moreno
8	AKÍ CHILLOGALLO -Av. Teniente Hugo Ortiz y Balzar esquina
9	AKÍ CALDERÓN - Av. 9 de Agosto s/n y Calle Paredes

Se obtuvo la ubicación geográfica de los puntos de venta del supermercado AKI y del depósito de la empresa la favorita, utilizando las herramientas de Google Maps, como se muestra en la Figura 3.

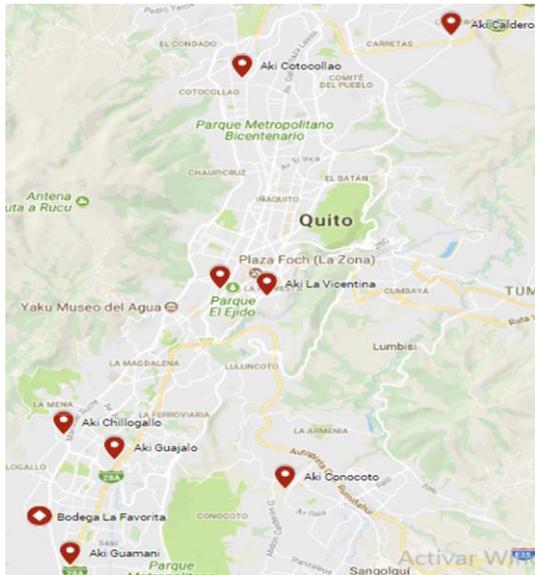


Figura 3. Mapeo de clientes y el depósito

Como se puede apreciar en la Tabla 2 se almacena la ubicación geográfica de los clientes y el depósito, en donde el nodo 0 es el depósito y los demás nodos representan a los clientes, donde la primera columna hace referencia al cliente y la segunda y tercera columna a la ubicación geográfica.

Tabla 2: Ubicación geográfica de clientes y depósito

Nodo	Longitud	Latitud
0	-0.3064616	-78.562282
1	-0.2128482	-78.4876444
2	-0.3279784	-78.5523849
3	-0.2828183	-78.5376365
4	-0.2100713	-78.503131
5	-0.1199533	-78.4958287
6	-0.2953416	-78.4815567
7	-0.272075	-78.55460871
8	-0.1021079	-78.426624

Como se puede evidenciar en la Tabla 3 se tiene la demanda de cada cliente, en la columna llamada Nodo tenemos el conjunto de clientes en donde el nodo 0 es el depósito y cuenta con una demanda de 0 y los demás nodos representan a los clientes, en la columna llamada Demanda se visualiza la demanda de cada cliente, la misma que es determinada por las empresas distribuidoras, en este caso la demanda son datos tomados arbitrariamente para realizar la simulación.

Tabla 3: Demanda de los clientes en toneladas

Nodo	Demanda (Toneladas)
0	0
1	19
2	18
3	19
4	17
5	18
6	19
7	19
8	14

La capacidad de los vehículos es un dato conocido, la cual es heterogénea (igual), teniendo la capacidad de los vehículos y la demanda de los clientes se podrá calcular aproximadamente cuántos vehículos se necesitan para cubrir la demanda de los clientes. Como se muestra en la Ec. 2.

$$n = \frac{\sum d}{q} \quad (2)$$

Donde Q es la capacidad del vehículo, $\sum d$ es la sumatoria de las demandas de los clientes y n es el número de vehículos. Para nuestro caso la capacidad máxima de cada vehículo es de 50 toneladas, el número de vehículos aproximadamente que se necesita, se calcula usando la Ec. 2.

$$n = \frac{143 \text{ toneladas}}{50 \text{ toneladas}}$$

$$n = 3 \text{ vehículos}$$

3.2 Matriz de Costos

A través del método de distancia Haversine se calcula la distancia que existe entre dos puntos, se obtiene la distancia en km que existe entre el nodo 0 y el nodo 1, entre el nodo 0 y el nodo 2, así sucesivamente, estas distancias se almacenan en una matriz denominada matriz de costos, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Matriz de costos en km

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00	7,18	1,42	2,05	6,79	11,88	4,89	2,11	14,72
1	7,18	0,00	7,93	5,16	0,94	5,60	4,96	5,36	7,59
2	1,42	7,93	0,00	2,85	7,67	12,93	4,68	3,36	15,51
3	2,05	5,16	2,85	0,00	4,83	10,09	3,45	1,21	12,73
4	6,79	0,94	7,67	4,83	0,00	5,42	5,28	4,84	7,94
5	11,88	5,60	12,93	10,09	5,42	0,00	10,56	9,78	4,29
6	4,89	4,96	4,68	3,45	5,28	10,56	0,00	4,60	12,05
7	2,11	5,36	3,36	1,21	4,84	9,78	4,60	0,00	12,77
8	14,72	7,59	15,51	12,73	7,94	4,29	12,05	12,77	0,00

3.3 Solución inicial mediante el método Clarke Wright (Matriz de Ahorros)

Se aplica el método Clarke Wright para encontrar una óptima solución inicial, pues este método consiste en unir dos rutas y calcular el ahorro en distancias que existe entre las rutas, basándonos en este método se construye una matriz denominada matriz de ahorro, como se muestra en la Tabla 5.

El cálculo de ahorro se lo realiza utilizando la matriz de costos y la Ec. 1.

$$S_{ij} = c_{i,0} + c_{0,j} - c_{i,j} \quad (1)$$

Tabla 5: Matriz de ahorros en km

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,68	4,07	13,03	13,47	7,11	3,93	14,31
2	0,00	0,68	0,00	0,62	0,54	0,37	1,63	0,18	0,63
3	0,00	4,07	0,62	0,00	4,00	3,84	3,49	2,96	4,04
4	0,00	13,03	0,54	4,00	0,00	13,24	6,40	4,06	13,56
5	0,00	13,47	0,37	3,84	13,24	0,00	6,21	4,21	22,31
6	0,00	7,11	1,63	3,49	6,40	6,21	0,00	2,40	7,55
7	0,00	3,93	0,18	2,96	4,06	4,21	2,40	0,00	4,06
8	0,00	14,31	0,63	4,04	13,56	22,31	7,55	4,06	0,00

Para comenzar a construir la solución inicial se debe empezar escogiendo el conjunto de nodos que tenga un mayor ahorro en distancia como se aprecia en este caso el mayor ahorro se presenta en los nodos 8-5 que cuentan con un ahorro de 22,31 km el cual es el mayor ahorro de distancia que se tiene en la matriz, estos nodos se van agregando a la ruta y se pone el valor de 0 a toda la fila y columna de estos nodos, para ya no volver a escogerlos como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Proceso para construir la solución inicial

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,68	4,07	13,03	13,47	7,11	3,93	0,00
2	0,00	0,68	0,00	0,62	0,54	0,37	1,63	0,18	0,00
3	0,00	4,07	0,62	0,00	4,00	3,84	3,49	2,96	0,00
4	0,00	13,03	0,54	4,00	0,00	13,24	6,40	4,06	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	7,11	1,63	3,49	6,40	6,21	0,00	2,40	0,00
7	0,00	3,93	0,18	2,96	4,06	4,21	2,40	0,00	0,00
8	0,00	14,31	0,63	4,04	13,56	22,31	7,55	4,06	0,00

Se realiza este proceso mientras no sobrepase la capacidad del vehículo, si sobrepasa la capacidad se regresa al depósito y se escoge el siguiente conjunto de nodos que tenga un mayor ahorro de distancia en Km hasta armar la solución inicial como se observa en la Tabla 7, en donde la primera columna hace referencia

a cada una de las rutas enumeradas, la segunda columna nos muestra los nodos por los que pasara cada ruta, la columna llamada distancia km muestra la distancia en km que deberá recorrer cada recorrido y la última columna muestra el peso que transportara cada camión repartidor asignado a cada trayecto.

Tabla 7: Solución inicial

Nº Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia km	Peso T
1	0 8 5 0	28,05	32,00
2	0 4 1 0	15,31	36,00
3	0 3 7 0	5,43	38,00
4	0 2 6 0	14,46	37,00
Total		63,25	143,00

3.4 Vecindad

El siguiente paso es aplicar el método 2-opt que consiste en cambiar la posición de dos nodos, con excepción de los nodos que representan al depósito, creando una vecindad con todas las posibles combinaciones que se puede tener cambiando la posición de los nodos de la ruta, como se observa en la Figura 4.

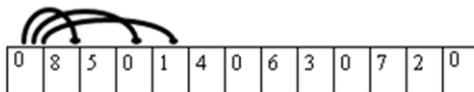


Figura. 4. Representación del método 2-opt

3.5 Algoritmo Tabú

Se debe definir el tamaño de la lista tabú, en la cual se va almacenar los movimientos que se han considerado como una mejor solución.

Se escoge el vecino que tenga un menor costo de distancia en Km y se aplica el criterio de aspiración el cual valida que esta nueva solución no se encuentre en la lista tabú, en el caso de que se considere como un movimiento tabú se puede

escogerlo solo si tiene un menor costo de distancia que la solución actual, caso contrario se escoge el siguiente vecino que tenga un menor costo de distancia en Km y se lo considera como la mejor solución.

Este proceso se lo realiza hasta cumplir con el criterio de parada el cual es definido por un N número de iteraciones, al final del proceso se obtiene la mejor solución encontrada como se muestra en la Tabla 8, donde su descripción de columnas coincide con la Tabla 7 antes vista.

Tabla 8: Solución encontrada con el algoritmo tabú

Nº Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia km	Peso T
1	0 8 5 0	28,05	32,00
2	0 1 4 0	14,52	36,00
3	0 6 3 0	7,55	38,00
4	0 7 2 0	6,20	37,00
Total		56,32	143,00

4. Pruebas de funcionalidad

Para la realización de las pruebas se utilizó como referencia los datos que proporciona la tesis “Implantación de VRP - Solver aplicando la heurística de Clarke Wright para el ruteo del transporte terrestre en el área de distribución caso de estudio: industrias alimentarias” [10], la cual tiene como objetivo la implantación del VRP Solver para poder minimizar las distancias utilizadas en el envío de productos de una empresa distribuidora.

Con ayuda del SAP el ERP que utilizan la empresa se obtiene las direcciones de los clientes y la demanda respectiva de cada uno, la demanda es medida en kg como se muestra en la Tabla 16 en la sección anexos. Con la ayuda de la herramienta de Google Maps se ubicó las direcciones de 46 clientes y el depósito como se muestra en la Figura 5.

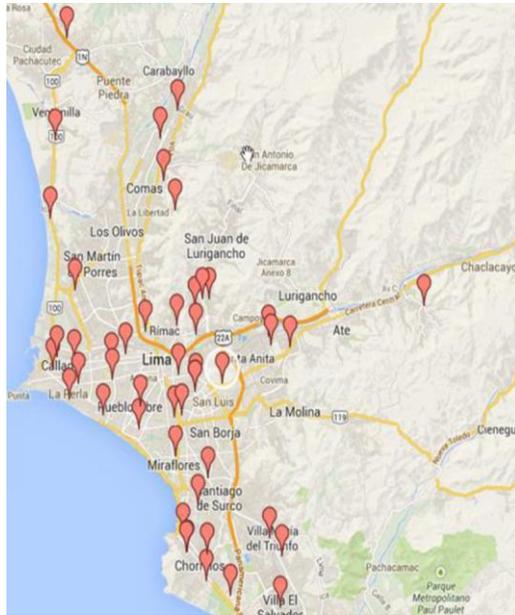


Figura. 5. Mapeo de clientes [10]

Tal como se describe en el caso simulado usando las herramientas de google maps se obtiene las coordenadas geográficas de los clientes a los que se debe realizar la distribución de los productos como se muestra en la Tabla 9, donde la descripción de las columnas coincide con la Tabla 2 y se aumenta la columna demanda que es la que contienen la demanda de productos que presenta cada cliente, esta información se usara como datos de entrada para realizar las pruebas.

Tabla 9: Coordenadas geográficas de clientes y el depósito

Nodo	Longitud	Latitud	Demanda
1	-12.057408	-76.982822	0
2	-12.050363	-77.081007	1305.12
3	-11.950378	-77.131472	9587.47
4	-11.82788	-77.117617	589.34
5	-11.890103	-77.034554	802.24
6	-12.198319	-77.002251	1250

7	-12.056137	-77.05227	330
8	-12.04831	-77.110312	330
9	-11.994187	-77.086	660
10	-12.113619	-77.028198	1110.84
11	-12.050138	-77.026041	1861.8
12	-12.024618	-77.026007	111.96
13	-12.07657	-77.103001	1828
14	-12.055429	-77.064906	820.8
15	-11.972774	-77.065805	584.4
16	-12.072899	-77.00915	150
17	-12.080807	-77.006168	2548.8
18	-12.054753	-76.976772	3402
19	-12.028051	-76.935074	1925.12
20	-12.011734	-77.011473	1000
21	-12.200801	-76.995297	3150
22	-12.180614	-77.002072	1000.2
23	-12.147656	-77.009279	9250
24	-12.13567	-77.030952	4200
25	-12.178288	-77.018156	3400.8
26	-11.874221	-77.123748	9232.66
27	-12.215372	-76.944984	2412.78
28	-12.063267	-77.104202	4257.1
29	-12.062002	-77.066508	3000
30	-12.178426	-77.019	2000.2
31	-12.023117	-76.900412	2000.2
32	-11.096026	-77.040356	58.4

33	-12.057655	-77.028581	9839.44
34	-11.982699	-76.997592	102.6
35	-12.043297	-77.060833	795.6
36	-11.94956	-77.125426	9100.1
37	-12.023043	-76.07132	23.4
38	-12.149471	-76.948744	984
39	-12.166879	-77.021658	3500
40	-12.127132	-77.02650	100
41	-12.005157	-77.019253	32.2
42	-12.005595	-76.999801	1000
43	-12.085249	-77.087394	1000
44	-11.945133	-77.028165	9950
45	-12.024342	-77.049742	7848.6
46	-12.126035	-77.011868	250
47	-12.163002	-76.945745	500

De igual forma como en el caso de estudio como datos de entrada también se tiene la capacidad de los vehículos, los cuales tienen una capacidad de 10 Toneladas [10], este dato se usara para validar que no sobre pasen la capacidad de los vehículos al momento de armar las rutas que los vehículos deben seguir para distribuir los productos a cada cliente.

Se calcula el número de vehículos aproximados que se necesita para la distribución de los productos a los clientes, con la Ec. 2.

$$n = \frac{119186,17 \text{ kg}}{10000 \text{ kg}}$$

$$n = 12 \text{ vehículos}$$

Teniendo como datos de entradas las coordenadas geográficas de los clientes y el depósito de la empresa se calcula la distancia en Km que hay entre un punto y otro y se almacena en una matriz denominada Matriz de costos como se puede observar en la sección anexos en la Tabla 17.

Para calcular una solución inicial se puede realizar a través del método del vecino más cercano como se puede observar en la Tabla 10, sin embargo aquí ya se puede apreciar un valor que será el costo acumulado de la ruta en km.

Tabla 10: Solución inicial método vecino más cercano

Nº Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia km	Peso Kg
1	1 18 42 34 20 41 12 11 1	13,13	7510,56
2	1 33 1	10,18	9839,44
3	1 10 40 24 39 1	12,56	8910,84
4	1 30 25 28 8 1	30,07	9988,1
5	1 23 46 1	7,98	9500
6	1 38 47 27 19 31 37 1	30,59	7845,5
7	1 44 1	23,54	9950
8	1 5 32 45 7 14 1	22,51	9860,04
9	1 29 35 2 43 13 1	27,45	7928,72
10	1 36 1	32,17	9100,1
11	1 3 1	33,49	9587,47
12	1 26 4 1	33,7	9822
13	1 9 15 17 16 22 6 21 1	29,31	9343,4
	Total	306,68	119186,17

Para calcular la solución inicial se utiliza el método Clarke Wright el cual consiste en crear la matriz de ahorros como se puede observar en la sección anexos en la Tabla 18. Aplicando el método Clarke Wright se obtiene la solución inicial presentada en la Tabla 11, donde igual que la Tabla 10 presenta ya un costo acumulado del recorrido en km.

Tabla 11: Solución inicial método Clarke Wright

N° Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia km	Peso Kg
1	1 36 1	32,17	9100,10
2	1 3 1	33,49	9587,47
3	1 26 4 1	33,70	9822,00
4	1 8 28 13 43 2 9 1	31,26	9380,22
5	1 35 29 14 15 17 42 1	23,86	8749,60
6	1 45 7 32 5 1	20,31	9039,24
7	1 44 1	23,54	9950,00
8	1 12 33 1	10,83	9951,40
9	1 11 10 24 40 1	12,74	7272,64
10	1 39 30 25 1	10,58	8901,00
11	1 23 46 1	7,98	9500,00
12	1 6 22 21 27 47 38 37 1	34,49	9320,38
13	1 31 19 18 34 20 41 16 1	27,85	8612,12
Total		302,80	119186,17

Se escoge como solución inicial la generada por el método de Clarke Wright ya que esta tiene un costo de 302,80 km a comparación de la generada con el método del vecino más cercano que tiene un costo de 306,68 km.

Una vez que se obtiene la solución inicial se aplica el algoritmo tabú, en el cual se debe tomar en cuenta el número de iteraciones que se va a configurar, es decir, el número de veces que se repetirá el proceso del algoritmo tabú. Si se configura con un número de iteraciones de 10 presenta los resultados que se observan en la Tabla 12, donde la primera columna muestra el número de ruta, la segunda muestra cómo se encuentra distribuida cada ruta, es decir, que cliente será atendido en cada recorrido, de igual forma la tercera columna muestra la distancia o el costo en km que presenta cada trayecto y así también la última columna que muestra el peso que tendrá que distribuirse en cada una de las rutas generadas.

Tabla 12: Solución encontrada con 10 iteraciones

N° Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia km	Peso Kg
1	1 33 1	10,18	9839,44
2	1 3 1	33,49	9587,47
3	1 26 4 1	33,7	9822
4	1 8 28 13 43 2 35 1	29,11	9.515,82
5	1 12 29 14 7 11 16 1	18,95	6.274,56
6	1 45 15 32 5 1	20,88	9293,64
7	1 44 1	23,54	9950
8	1 9 36 1	32,19	9760,1
9	1 17 10 24 40 1	11,57	7959,64
10	1 39 30 25 1	10,58	8901
11	1 23 46 1	7,98	9500
12	1 22 6 21 27 47 38 34 1	21,72	9.399,58
13	1 18 19 31 37 42 41 20 1	33,46	9.382,92
Total		287,35	119186,17

Al configurar el número de iteraciones en 20 se obtiene una mejor solución como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13: Solución encontrada con 20 iteraciones

N° Ruta	Secuencia de la Ruta	Distancia km	Peso Kg
1	1 44 1	23,54	9950,00
2	1 33 1	10,18	9839,44
3	1 26 4 1	33,70	9822,00
4	1 8 28 13 43 2 35 1	29,11	9515,82
5	1 11 7 29 14 12 41 1	18,84	6156,76
6	1 45 15 32 5 1	20,88	9293,64
7	1 3 1	33,49	9587,47
8	1 9 36 1	32,19	9760,10
9	1 17 10 24 40 1	11,57	7959,64
10	1 39 30 25 1	10,58	8901,00
11	1 23 46 1	7,98	9500,00
12	1 22 6 21 27 47 38 34 1	21,72	9399,58
13	1 18 37 31 19 42 20 16 1	32,55	9500,72
Total		286,33	119186,17

Obteniendo estos resultados los compararemos con los resultados que se obtiene de la tesis de la cual se obtuvo la información para realizar las pruebas, que se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14: Rutas generadas por VRP Solver [10]

Ruta	Secuencia de visitas a los clientes	Distancia Km	Peso Kg
1	1,12,3,41	37	9731,63
2	1,26,4,34	55	9924,6
3	1,5,32,36	46	9960,74
4	1,7,14,2,8,28,13,43	28	9871,02
5	1,16,10,24,40,17	19	8109,64
6	1,11,29,35,9,15,20,42	32	8901,8
7	1,46,39,30,25	26	9151
8	1,18,37,31,39	24	7350,72
9	1,23	19	9250
10	1,33	9	9839,44
11	1,38,47,27,21,6,22	37	9296,98
12	1,44	24	9950
13	1,45	15	7848,6

Búsqueda Tabú	1,44,1	286,33 km
	1,33,1	
	1,26,4,1	
	1,8,28,13,43,2,35,1	
	1,11,17,29,14,12,41,1	
	1,45,15,32,5,1	
	1,3,1	
	1,9,36,1	
	1,17,10,24,40,1	
	1,39,30,25,1	
	1,23,46,1	
	1,22,6,21,27,47,38,34,1	
	1,18,37,31,19,42,20,16,1	

5. Análisis de resultados

En la Tabla 15 se puede observar claramente los resultados obtenidos entre VRP Solver y el algoritmo metaheurístico de búsqueda Tabú, donde la primera columna hace referencia al algoritmo aplicado, la segunda columna muestra cada uno de los nodos que visitara cada ruta y la última columna muestra el costo total del recorrido en km de cada algoritmo.

Tabla 15: Comparación de resultados

Metodología	Secuencia de Rutas	Distancia Km
VRP Solver	1,12,3,41	370 km
	1,26,4,34	
	1,5,32,36	
	1,7,14,2,8,28,13,43	
	1,16,10,24,40,17	
	1,11,29,35,9,15,20,42	
	1,46,39,30,25	
	1,18,37,31,19	
	1,23	
	1,33	
	1,38,47,27,21,6,22	
	1,44	
	1,45	

Entre los dos resultados existe una diferencia de 83,67 km utilizando la búsqueda tabú a comparación de usar VRP Solver. El resultado puede variar por algunos factores uno de ellos es la solución inicial que se obtiene porque de ahí parte el algoritmo de búsqueda tabú.

Como se puede observar en la Figura 6 donde se analiza la distancia que recorre cada carro en la ruta armada, la misma que es generada en la solución inicial versus la solución generada por el algoritmo tabú, estas distancias que recorre cada uno de los vehículos es bastante similar.

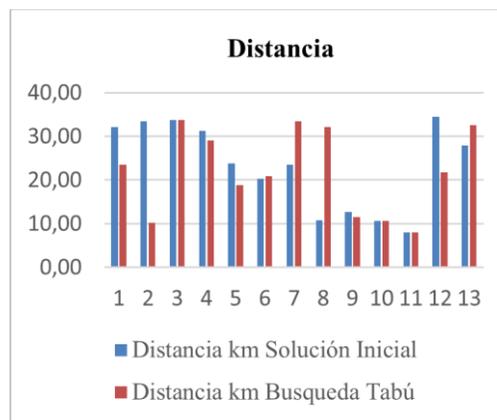


Figura. 6. Distancia generada en la solución inicial VS Distancia generada en algoritmo tabú

Como se puede observar en la Figura 7 donde se analiza el peso que transporta cada uno de los vehículos en la ruta armada, la misma que es generada en la solución inicial versus la solución generada por el algoritmo tabú, estos pesos que transporta cada uno de los vehículos es bastante similar, sin embargo, se aprecia un cambio significativo únicamente en dos rutas.

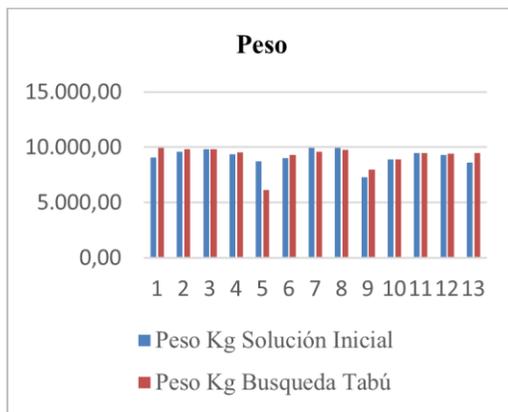


Figura. 7. Peso generado en la solución inicial VS Peso generado en el algoritmo tabú

En la Figura 8 se analiza la distancia en km que se recorre en cada una de las rutas generadas por el VRP solver VS la distancia en km que se recorre en cada una de las rutas generadas por el algoritmo Tabú.

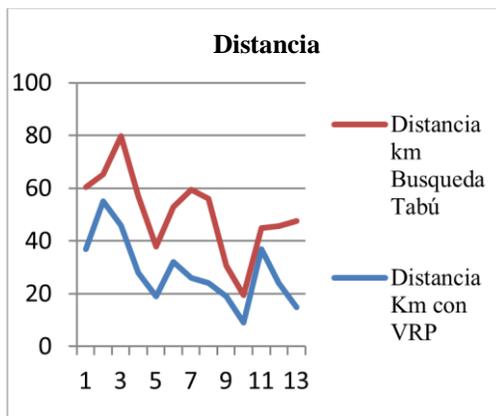


Figura. 8. Distancias generadas por el VRP Solver VS Distancias generadas en el algoritmo tabú

6. Conclusiones

El método de Clarke and Wright permitió obtener una mejor solución inicial, al construir las rutas basándose en el ahorro en distancia existentes entre nodos, el resultado final fue un recorrido de 302,80 km como se puede observar en la Tabla 11, a comparación del método del vecino más cercano el cual realiza un mayor recorrido de 306,68 km, que se puede observar en la Tabla 10.

Los resultados de las pruebas arrojan que el número de iteraciones que se tiene es un factor que influyen para encontrar una mejor solución, al tener un número de iteraciones de 10 se obtiene un recorrido de 287,35 km que se puede evidenciar en la Tabla 12 a comparación de tener un número de iteraciones de 20, con el cual se obtiene un recorrido de 286,33 km que se puede evidenciar en la Tabla 13, mayor a 20 iteraciones tienden a converger los resultados.

Se puede evidenciar claramente que la metodología VRP Solver utilizada para las pruebas de funcionamiento en el documento de tesis: “Implantación de VRP - Solver aplicando la heurística de Clarke Wright para el ruteo del transporte terrestre en el área de distribución caso de estudio: industrias alimentarias” [10], proporciona en sus resultados una distancia total de 370 km que se deberá recorrer para la distribución de productos, VS el algoritmo Metaheurístico de búsqueda local Tabú, presenta una distancia total de 286,33 km que se deberá recorrer para la distribución de productos, lo cual muestra claramente que el resultado fue optimizado en un 12%, por la metaheurística aplicada en el presente documento.

7. Referencias

- [1] Alvaro Sánchez García. (2017, June) iol.etsii.upm.es. [Online].
<http://www.iol.etsii.upm.es/arch/metaheuristicas.pdf>
- [2] Linda Bibiana Rocha Medina, Elsa Cristina González La Rotta, and Javier Arturo Orjuela Castro. (2011) dialnet. [Online].
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4797255>
- [3] Julio Mario Daza, Jairo Montoya, and Francesco Narducci, "RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO DE VEHICULOS CON LIMITACIONES DE CAPACIDAD UTILIZANDO UN PROCEDIMIENTO METAHEURÍSTICO DE DOS FACES," *EIA*, pp. 23-38, 2009.
- [4] Alfredo Olivera. (2004, July) fing.edu.uy. [Online].
<https://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>
- [5] José A. Moreno. (2018, Apr.) tebadm.ulpgc.es. [Online].
<http://www.tebadm.ulpgc.es/almacen/seminarios/MH%20Las%20Palmas%202.pdf>
- [6] David Gomez Atuesta and Carlos Rangel Carvajal. (2011)
<http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2011/137753.pdf>.
- [7] Alicia Cirila Riojas Cañari. (2005, Nov.) sisbib.unmsm.edu.pe. [Online].
http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/data/monografias/basic/riojas_ca/cap3.pdf
- [8] FREDY ALEXANDER GUASMAYAN. (2014, Feb.) repositorio.utp.edu.co. [Online].
<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4562/5196G917.pdf;sequence=1>
- [9] (2018) aki. [Online].
<http://www.aki.com.ec/locales/>
- [10] Agurto Maguiña and Lizeth Lucero. (2016, May)
<https://www.coursehero.com>. [Online].
<https://www.coursehero.com/file/29178054/Magui%C3%B1a-alpdf/>
- [11] S. H. Zanakins and J. R. Evans, *Heuristic 'Optimization': Why, When and..*, 1981.
- [12] Belén Melián, José A Moreno Pérez, and J. Marcos Moreno Vega. (2003) sci2s. [Online].
<http://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/OtherPostGraduateCourses/Metaheuristicas/metaheuristicas-vision-global.pdf>
- [13] Rafael Martí. (2002) uv.es. [Online].
<http://www.uv.es/~rmarti/paper/docs/heur1.pdf>
- [14] Chris Veness. (2017) wikiwand. [Online]. <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- [15] José A. Moreno Pérez. tebadm.ulpgc.es. [Online].
<http://www.tebadm.ulpgc.es/almacen/seminarios/MH%20Las%20Palmas%202.pdf>

