Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Matemáticas
Escuela Profesional de Investigación Operativa

Heurística del ahorro para trasladar policías de la Unidad de Servicios Especiales (USE) a concentraciones no multitudinarias del sector salud

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciada en Investigación Operativa

AUTOR

Oksana Marlene RICRA TAMBRA

ASESOR

Dra. María Del Pilar ÁLVAREZ RIVAS

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ricra, O. (2022). *Heurística del ahorro para trasladar policías de la Unidad de Servicios Especiales (USE) a concentraciones no multitudinarias del sector salud*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Matemáticas, Escuela Profesional de Investigación Operativa]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Oksana Marlene Ricra Tambra
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70272952
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	María del Pilar Álvarez Rivas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06445832
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9580-0347
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Luis Alberto Oré Luján
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07516499
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Alicia Cirila Riojas Cañari
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06018994
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.3.3.1. Optimización Matemática

Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Coordenadas geográficas Latitud: -12.058333 Longitud: -77.083333
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Julio 2022
URL de disciplinas OCDE	Matemáticas aplicadas https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.01.02

Anexo 6

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA

En la Ciudad Universitaria, Facultad de Ciencias Matemáticas, siendo las 10:00 horas del día viernes 5 de agosto del año 2022, se reunieron los docentes designados como Miembros del Jurado Evaluador de Tesis:

Dr. Luis Alberto Oré Luján	(Presidente)
Lic. Alicia Cirila Riojas Cañari	(Miembro)
Dra. María Del Pilar Alvarez Rivas	(Miembro-Asesor)

Para la sustentación de la Tesis intitulada: HEURÍSTICA DEL AHORRO PARA TRASLADAR POLICÍAS DE LA UNIDAD DE SERVICIOS ESPECIALES (USE) A CONCENTRACIONES NO MULTITUDINARIAS DEL SECTOR SALUD, presentada por la señorita Bachiller Oksana Marlene Ricra Tambra, para obtener el Título Profesional de Licenciada en Investigación Operativa.

Luego de la exposición de la Tesis, el Presidente invitó a la expositora a dar respuesta a las preguntas formuladas.

Realizada la evaluación correspondiente por los miembros del jurado, la expositora mereció la aprobación de **Aprobado con mención honrosa** con un calificativo promedio de: diecisiete (17).

A continuación, los miembros del jurado dan manifiesto que la participante señorita Oksana Marlene Ricra Tambra, en virtud de haber aprobado la sustentación de su tesis, será propuesto para que se le otorgue el Título Profesional de Licenciada en Investigación Operativa.

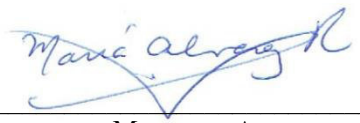
Siendo las 10:57 horas, se levantó la Sesión, firmando para constancia la presente Acta en tres (3) copias originales o archivo PDF.



PRESIDENTE
Dr. Luis Alberto Oré Luján



MIEMBRO
Lic. Alicia Cirila Riojas Cañari



MIEMBRO-ASESOR
Dra. María Del Pilar Alvarez Rivas

Link: meet.google.com/yuc-osfc-zxa

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA

INFORME DE EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

La Directora de la Escuela Profesional de Investigación Operativa, Mg. Carmela Catalina Velásquez Pino, informa lo siguiente:

1. Operador del programa informático de similitudes: Dr. Paulo César Olivares Taipe
2. Documento evaluado:
   Heurística del Ahorro para trasladar Policías de la Unidad de Servicios Especiales (USE) a concentraciones no multitudinarias del Sector Salud
3. Autor de la tesis: Oksana Marlene RICRA TAMBRA
1. Fecha de recepción de la tesis: 06/09
2. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes: 07/09
   - Software utilizado: Turnitin
3. Configuración del programa detector de similitudes:
   - Excluye textos entrecomillados
   - Excluye bibliografía
   - Excluye cadenas menores a 40 palabras
4. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes:
5. Fuentes originales de las similitudes encontradas: 6%
   Fuentes de internet: 6%
   Publicaciones: 1%
6. Calificación de originalidad:
   - El documento mencionado cumple criterios de originalidad, sin observaciones

Lima, 07 de setiembre 2022

UNMSM
Firmado digitalmente por VELASQUEZ PINO Carmela Catalina FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.09.2022 17:43:52 -05:00

Mg. Carmela Catalina Velásquez Pino
Directora

FICHA CATALOGRÁFICA

RICRA TAMBRA, OKSANA MARLENE

HEURÍSTICA DEL AHORRO PARA TRASLADAR POLICÍAS DE LA UNIDAD DE SERVICIOS ESPECIALES (USE) A CONCENTRACIONES NO MULTITUDINARIAS DEL SECTOR SALUD

Lima 2022.

Xi, 8 p., 76 p., 29.7 cm. (UNMSM, Licenciada, Investigación Operativa, 2022).

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Facultad de Ciencias Matemáticas

Escuela Profesional de Investigación Operativa

UNMSM / FCM

Dedico el presente trabajo a la Facultad de Ciencias Matemáticas y a mi Escuela de Investigación Operativa, con el fin de motivar a más jóvenes en la investigación.

Agradecimientos

A Dios por acompañarme y guiarme en este camino.

A mi papá que desde el cielo me ilumina y cuida, gracias por darme la vida.

A mi mamá por su apoyo incondicional, la gran paciencia brindada, y por darme la oportunidad de tener una excelente educación.

A mi hermana Oksani por darme esos consejos, que son una gran lección para no rendirme y perseverar en lo personal y profesional.

A mi asesora de tesis Dra. María Alvarez por el apoyo otorgado, por compartir sus conocimientos y sugerirme participar en congresos y escuelas de verano de los cuales adquirí grandes aprendizajes, le agradezco eternamente.

A todos mis maestros porque me mostraron que las matemáticas del colegio y de la academia no son nada comparado a las matemáticas de la universidad, provocándome dolores de cabeza, pero que al final hicieron de mí una persona analítica y con mente holística.

A mis amigos por haber compartido conmigo momentos buenos y malos, por depositar su confianza en mí y hacer de mis días universitarios experiencias que nunca olvidaré.

Al personal de la USE, por comprometerse en mi proyecto y entender que las matemáticas aplicadas junto con lo empírico brindan mejores soluciones.

A mi escuela, Investigación Operativa, por demostrarme que la existencia de problemas es beneficioso, porque en los Investigadores Operativos está encontrar la solución factible y tomar las mejores decisiones.

A la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y a la Facultad de Ciencias Matemáticas por ser mi alma máter.

Resumen

HEURÍSTICA DEL AHORRO PARA TRASLADAR POLICÍAS DE LA UNIDAD DE SERVICIOS ESPECIALES (USE) A CONCENTRACIONES NO MULTITUDINARIAS DEL SECTOR SALUD.

Oksana Marlene Ricra Tambra

Julio 2022

Asesora : Dra. María del Pilar Alvarez Rivas

Título obtenido : Licenciada en Investigación Operativa

En la presente investigación se resolvió el problema de ruteo de vehículos empleando la heurística del Ahorro, aplicado para solucionar el problema operacional y logístico que enfrentaría en un supuesto escenario crítico la Unidad de Servicios Especiales (USE) de la Policía Nacional del Perú (PNP), los cuales trasladan simultáneamente a los policías desde su base hacia diferentes puntos de concentración en Lima, debido a marchas o manifestaciones donde la policía debe garantizar, mantener y restablecer el orden público.

El objetivo de esta investigación es minimizar las distancias de recorrido de la USE, por consecuencia reducir costos logísticos, y cumplir con el tiempo de respuesta establecido en el traslado de policías hacia concentraciones no multitudinarias del sector salud, en caso se desarrollaría este tipo de manifestaciones en Lima Metropolitana.

Se concluyó que mediante la Heurística del Ahorro se reducen las distancias a un 40% de las distancias iniciales que presenta la USE y los vehículos a 4 unidades. Además, se comprobó que la heurística programada tiene una calidad aceptable por no excederse del límite que algunos autores refieren con respecto al óptimo.

Palabras clave: Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), Heurística del Ahorro o Algoritmo de Clarke y Wright, traslado de policías, Unidad de Servicios Especiales (USE), Policía Nacional del Perú (PNP).

Abstract

SAVINGS HEURISTIC TO TRANSFER POLICEMEN FROM “LA UNIDAD DE SERVICIOS ESPECIALES (USE)” TO NON-MULTITUDE CONCENTRATIONS OF THE HEALTH SECTOR.

Oksana Marlene Ricra Tambra

July 2022

Adviser : Dra. María del Pilar Alvarez Rivas

Obtained title : Licenciada en Investigación Operativa

The present research solved the vehicle routing problem using the Savings Algorithm, it was applied to resolve the operational and logistic problem that The "Unidad de Servicios Especiales (USE)" would face in a supposed critical scenery. They simultaneously transfer policemen from their base to different protests of people concentration points in Lima. Protests are the principal reason where the police must guarantee, keep and restore the public order.

The research objective is to minimize travel distances of the USE, consequently reduce logistic costs, and to comply with the set response time in the transfer of policemen to not crowded people concentration points of sector health in the case it would develop this type of protests in Metropolitan Lima.

It was concluded the Savings Algorithm reduces distances by 40% from the initial distances of the USE and the vehicles to 4 units. Moreover, it was proven the programmed heuristic has an acceptable quality for not exceeding the limit that some authors say concerning the optimal solution.

Keywords: Vehicle Routing Problem (VRP), Savings Algorithm or Clarke and Wright Algorithm, police transfer, Unidad de Servicios Especiales (USE), Policía Nacional del Perú (PNP)

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I – INTRODUCCIÓN 1

1.1. Situación problemática 2

1.2. Formulación del problema 3

1.3. Justificación 3

1.4. Objetivos 5

1.4.1. Objetivo principal 5

1.4.2. Objetivos específicos 5

CAPITULO II – DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA 6

2.1. Policía Nacional del Perú (PNP) 6

2.2. Unidad de Servicios Especiales (USE) 7

CAPITULO III - MARCO REFERENCIAL 10

3.1. Antecedentes 10

3.2. Marco teórico 13

3.2.1. Logística de distribución 13

3.2.1.1. La logística de transporte en la USE - PNP 13

3.2.1.2. La logística de operaciones en la USE-PNP 13

3.2.2. Problema del Ruteo de Vehículos (VRP) 14

3.2.2.1. Conceptos 14

3.2.2.2. Elementos del VRP 15

3.2.2.3. Modelo matemático del VRP 16

3.2.2.4. Variantes del VRP 20

3.2.2.5. Complejidad del VRP 21

3.2.3. Heurística y Metaheurística 22

3.2.3.1. Métodos de solución del VRP 23

3.2.3.2. ¿En qué casos usar un método heurístico? 24

3.2.3.3. Clasificación de los métodos heurísticos 25

3.2.3.4. Heurísticas para resolver el VRP 26

3.2.4. Heurística del Ahorro (Heurística de Clarke y Wright) 26

3.2.4.1. Pasos a seguir para su ejecución 28

3.2.4.2. Pseudocódigo 29

3.3. Marco conceptual 30

CAPITULO IV - MÉTODO 31

4.1. Diseño metodológico 31

4.1.1. Descripción del escenario 31

4.1.2. Elementos 31

4.2. Variables 31

4.3. Técnicas de recolección de datos 32

4.4. Técnicas para el procesamiento de la información 35

4.5. Herramientas 38

4.5.1. Microsoft VBA 38

4.5.2. Microsoft Visual Studio 38

4.6. Método 39

4.6.1. Modelar el grafo y construir la matriz de distancias 39

4.6.1.1. Cálculo de distancias en Google Maps 41

4.6.1.2. Elaboración de matriz de distancias 43
4.6.2. Diseñar, programar y validar el software que implementa la heurística del Ahorro 43
4.6.2.1. Rutas generadas por el algoritmo del Ahorro 45
4.6.2.2. Validación de la heurística programada 55
4.6.2.3. Análisis mediante un software libre: GRAFOS 58
4.6.3. Mostrar ventajas sobre el método exacto 65
CAPITULO V – ANÁLISIS DE RESULTADOS 67
5.1. Resultados 67
CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 72
6.1. Conclusiones 72
6.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros 73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74
ANEXO 76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Variables de Estudio* 32
Tabla 2 *Recolección de datos* 34
Tabla 3 *Nombre de nodos y direcciones* 37
Tabla 4 *Distancia del depósito "Q" hacia todos los clientes* 41
Tabla 5 *Distancia del cliente "A" hacia todos los nodos* 42
Tabla 6 *Matriz de distancias* 43
Tabla 7 *Matriz de ahorros* 44
Tabla 8 *Ahorros listados en orden decreciente* 45
Tabla 9 *Rutas iniciales* 52
Tabla 10 *Cuadro resumen Heurística del Ahorro* 55
Tabla 11 *Cuadro resumen Software GRAFOS* 65
Tabla 12 *Comparación de rutas obtenidas* 66
Tabla 13 *Resultado de ruteo empírico* 67
Tabla 14 *Resultado de ruteo por la Heurística del Ahorro* 69
Tabla 15 *Resultado de ruteo por software GRAFOS* 71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Organigrama de la PNP* 7
Figura 2 *División de la Policía Nacional del Perú* 8
Figura 3 *División de la Región Policial de Lima* 9
Figura 4 *División de la USE* 9
Figura 5 *Funcionamiento del Algoritmo del Ahorro* 27
Figura 6 *Recorrido inicial* 27
Figura 7 *Nuevo recorrido* 28
Figura 8 *Cuestionario* 33
Figura 9 *Mapa con rutas, caso 1* 36
Figura 10 *Mapa con rutas, caso 2* 36
Figura 11 *Nodos del grafo* 40
Figura 12 *Funcionamiento del programa del algoritmo del ahorro* 53
Figura 13 *Datos de librería en el programa algoritmo del ahorro* 57
Figura 14 *Tabla de distancias* 59
Figura 15 *Gráfica de nodos* 60
Figura 16 *Flota de vehículos* 60
Figura 17 *Declaración del nodo Origen* 61
Figura 18 *Declaración de clientes* 61
Figura 19 *Datos de entrada* 62
Figura 20 *Ventana de Resultado* 62
Figura 21 *Ruteo empírico* 68
Figura 22 *Ruteo mediante la heurística en mapa base* 69
Figura 23 *Ruteo mediante la heurística en mapa satelital* 70
Figura 24 *Ruteo mediante GRAFOS-V.1.3.5* 71

CAPITULO I – INTRODUCCIÓN

Desde sus comienzos e incluso en la actualidad la Unidad de Servicios Especiales (USE) de la Policía Nacional del Perú (PNP) hace uso de su experiencia para las tareas que le corresponden, logrando ser eficaces pero no eficientes, ya que cumplen con la inmediatez, mas no con el óptimo uso de sus recursos logísticos.

Un proceso muy importante dentro de la USE es la planificación de logística y operaciones, ya que es dónde se detalla la razón de ser de la institución, siendo esta garantizar, mantener y restablecer el orden público en control de multitudes y disturbios civiles.

Para llevar a cabo su función, la USE debe trasladar personal de la institución a los puntos de concentración de masas, es por tal motivo que necesita vehículos y un plan de operaciones que indique las rutas a seguir. Sin embargo, como ya se mencionó, el traslado se realizaba empíricamente dificultando un óptimo uso de sus recursos.

Es por ello que el presente trabajo tiene como objetivo minimizar las distancias de recorrido de la USE, cumpliendo con los tiempos de respuesta establecidos, en un escenario crítico donde se traslada policías a manifestaciones del sector salud, solucionando el problema de ruteo de vehículos.

Para un mejor desarrollo de la tesis el supuesto con el que se trabajó fue una manifestación avisada. Las manifestaciones avisadas a la PNP ocurren en un 50% del total.

El problema planteado se identificó como un Problema de Ruteo de Vehículos (VRP), este consta de 1 depósito (centro de USE) y 13 clientes (concentración de manifestantes no multitudinaria), que demandan recursos humanos (policías agrupados de 12 en 12), además se dispone de vehículos (buses) con flota homogénea, es decir con capacidad de 50 policías cada uno.

Se desea determinar el número de rutas óptimas y por consiguiente el número de buses a emplear. Para resolver el problema de ruteo de vehículos (VRP) se empleó la Heurística del Ahorro.

A diferencia de otras investigaciones acerca de ruteo de vehículos resueltos por heurísticas, el presente trabajo de investigación tiene una aplicación a una situación social de protestas en el área específica del sector salud.

El trabajo de investigación se estructura de la siguiente manera: En el primer capítulo se describe el problema, la justificación y los objetivos a alcanzar. En el segundo capítulo se presenta la descripción del sistema. En el tercer capítulo se exponen los fundamentos teóricos y los conceptos necesarios del problema. Más adelante, en el cuarto capítulo, se desarrolla el trabajo especificando el método utilizado. Luego en el quinto capítulo se presenta el análisis de los resultados. Finalmente, en el sexto capítulo se muestra las conclusiones y recomendaciones.

1.1. Situación problemática

En el Perú las manifestaciones se presentan en diferentes sectores sociales como: educación, trabajo, ambiente, agroindustria, judicial, salud; siendo esta ultima la que se va trabajar.

Para concentraciones multitudinarias y simultaneas (como mínimo 70 manifestantes por grupo) la USE traslada 50 policías (capacidad máxima): 48 policías (40 escuderos, 4 escopeteros y 4 granaderos), 1 oficial y 1 comunicante; en este escenario el traslado de policías no involucra un diseño de ruteo porque no es necesario, ya que la capacidad de los buses es de 50 policías cada uno, entonces proceden a asignar todas las unidades vehiculares que tienen disponibles, para que en simultáneo puedan cubrir todos esos puntos de manifestantes.

Además, en escenarios de mucha demanda de policías y varios puntos de concentración alejados por cubrir, la USE no utiliza solo un depósito es decir una de sus sedes, si no todas las que sean necesarias que se ubican en Lima Metropolitana, contando cada una con vehículos propios.

Sin embargo, para concentraciones no multitudinarias (30 a 40 manifestantes por grupo) solo es necesario el número mínimo de presencia policial que consiste en 12 policías (10 escuderos, 1 escopetero, 1 granadero), no se permite fraccionarse más porque no serían eficaces.

La investigación se desarrolla en el sector Salud ya que las manifestaciones y huelgas provocadas por el Sindicato Nacional Médico (Sinamssop), el Sindicato Nacional de Enfermeras (Siness) del Seguro Social y otros gremios, son no multitudinarias y por consiguiente se puede realizar un ruteo de vehículos.

El ruteo que realiza la USE para concentraciones no multitudinarias es empírico, cumpliendo con la inmediatez, pero no con el óptimo uso de sus recursos logísticos.

Se debe determinar el número de vehículos necesarios y suficientes para trasladar a los policías, que permita minimizar los gastos de transporte, y por tanto un ruteo efectivo.

1.2. Formulación del problema

Luego de analizar la problemática se plantea la siguiente pregunta de investigación:

Pregunta principal

¿Cómo minimizar las distancias de recorrido de la USE, cumpliendo con los tiempos de respuesta establecidos para concentraciones no multitudinarias?

1.3. Justificación

El presente trabajo es necesario porque al solucionar el problema de ruteo de vehículos se intenta optimizar el uso de los recursos logísticos beneficiando de esa manera a la USE - PNP. Como dice Ballou (Citado en Hernández, 2016) “Dado que los costos de transporte normalmente se hallan entre un tercio y dos tercios de los costos logísticos totales”.

Para toda empresa o institución cuya razón de ser involucra el transporte o distribución de bienes, según Golden, Assad y Wasil (Citado en Hernández, 2016) “Es esencial la disminución de los costos de los procesos logísticos relacionados con el transporte. Dicha disminución puede lograrse, administrando mejor los recursos existentes”.

Por otro lado el presupuesto que se asigna para el Ministerio del Interior es priorizado para capacitaciones continuas y cursos a los policías, así como dotar de armamento y equipos de última tecnología, y el mantenimiento de estos, por lo que no es factible permitirse gastos innecesarios.

Debido a la naturaleza del problema se podría usar el modelo del Agente Viajero (*Travel Salesman Problem*), no obstante, no se tiene un vehículo que pueda albergar la cantidad necesaria de policías y que pueda trasladarlos simultáneamente. Por este motivo, el modelo recomendado a aplicar es el VRP, detallado posteriormente en el Capítulo III, ya que se determinan rutas utilizando la cantidad de vehículos necesarios y que no excedan la capacidad máxima de espacio.

Sustentando los resultados en que la Heurística del Ahorro; llamada así ya que en su desarrollo se van generando ahorros de distancias al combinar rutas que inicialmente estaban separadas; es una poderosa herramienta que brinda soluciones factibles para este tipo de problemas.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo principal

El objetivo de esta investigación es minimizar las distancias de recorrido de la USE, por consecuencia reducir costos logísticos, cumpliendo con los tiempos de respuesta establecidos, para concentraciones no multitudinarias en Lima Metropolitana.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Modelar el problema construyendo un grafo representativo de la realidad sobre las concentraciones no multitudinarias en Lima Metropolitana, con su correspondiente matriz de distancias.

2. Diseñar, programar y validar el software que implementa eficazmente la heurística del Ahorro.

3. Mostrar que el código elaborado obtiene resultados cercanos a los de un método exacto, y a su vez resuelve el problema en un tiempo mínimo.

CAPITULO II – DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se describe cómo funciona la PNP y la USE, para analizar posteriormente como la Investigación de Operaciones resolverá el problema en los siguientes capítulos.

2.1. Policía Nacional del Perú (PNP)

Este apartado tiene como finalidad explicar el rol de la Policía Nacional del Perú (PNP), así como sus divisiones.

La PNP es una entidad que corresponde al estado peruano cuya misión es garantizar, mantener y restablecer el orden interno, así como brindar protección y ayudar a la población, todo ello con el único fin de desarrollar una cultura de paz y de acatamiento a los derechos humanos.

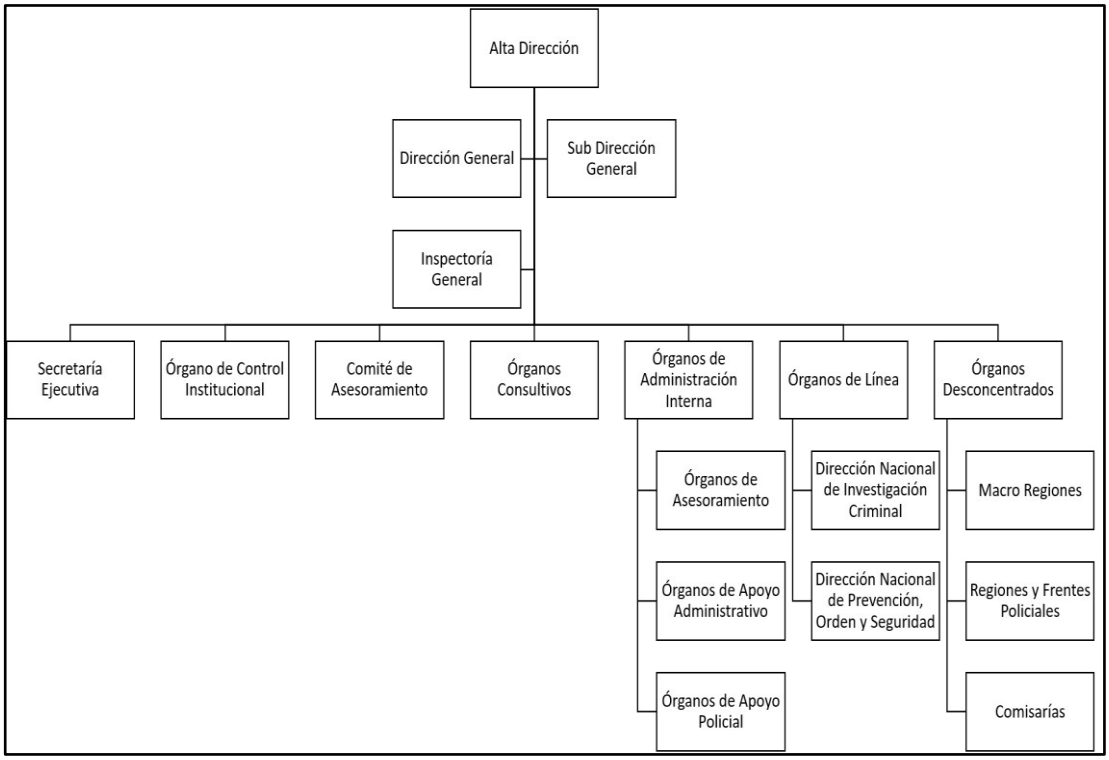
Algunas funciones principales de la PNP son: “Mantener la seguridad, tranquilidad pública y garantizar el libre ejercicio de los derechos consagrados en la Constitución Política del Perú”, también es importante rescatar el rol de “garantizar y controlar la libre circulación vehicular y peatonal en la vía pública y en las carreteras” (Policía Nacional del Perú, 2019).

La PNP cuenta con una misión y visión muy amplia con muchas más obligaciones, pero ambas funciones mencionadas en el párrafo anterior son de gran importancia para la comprensión del presente trabajo de investigación

Se puede observar en la Figura 1 el organigrama de la PNP, mostrando la división y estructura que la compone. El estudio se centra en la USE, que posteriormente será descrita, pero es necesario conocer que se encuentra dentro de la Región Policial de Lima, que pertenece a las Macro Regiones y este a su vez dentro de los Órganos Desconcentrados.

Figura 1

Organigrama de la PNP



Nota. Adaptada de La Ley de la Policía Nacional del Perú, Título III Organización, Capítulo I Estructura Orgánica

2.2. Unidad de Servicios Especiales (USE)

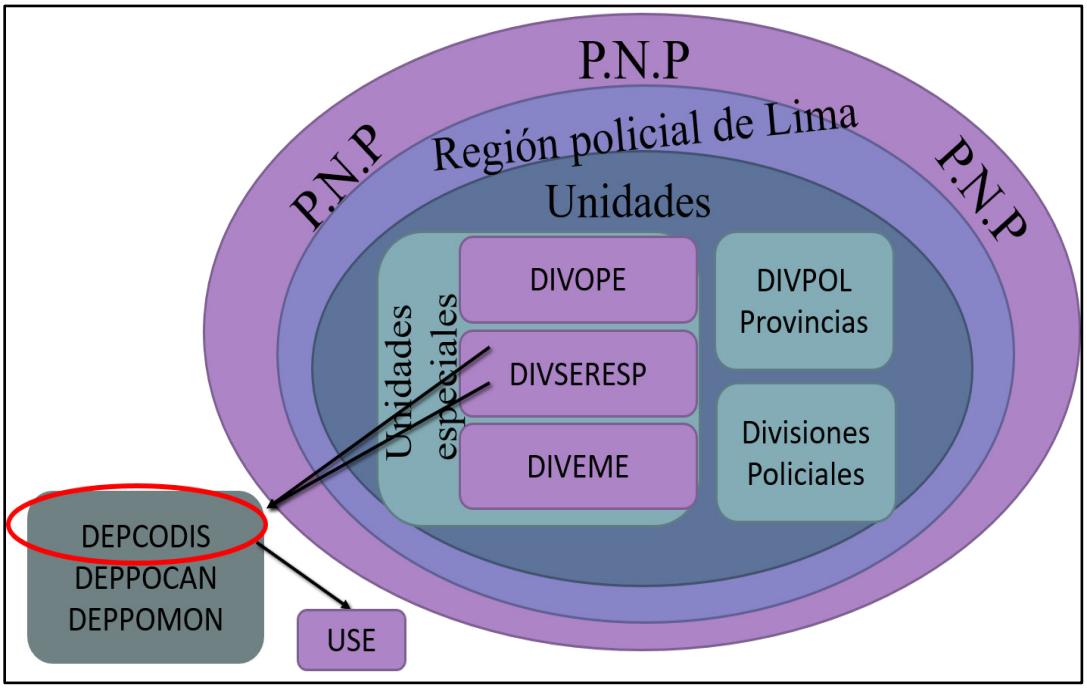
El sistema en estudio es la Unidad de Servicios Especiales (USE) de la Región Policial de Lima de la Policía Nacional del Perú (PNP), cuya función principal consiste en mantener la seguridad y tranquilidad pública en la jurisdicción de su responsabilidad, que permita el libre ejercicio de los derechos fundamentales de la persona, presentes en la Constitución Política de Perú.

A continuación, se muestra los siguientes gráficos sobre la descripción del sistema.

En la Figura 2 se describe el universo de la PNP, en seguida la Región Policial de Lima, ya que el trabajo se centra en la capital, luego se muestra las Unidades que hay dentro de la Región como por ejemplo las Unidades Especiales, por ultimo dentro de ellas la División de Servicios Especiales (DIVSERESP) que tiene a su cargo tres departamentos, siendo de nuestro interés el Departamento de Control de Disturbios (DEPCODIS) que es dónde se encuentra los policías de la USE.

Figura 2

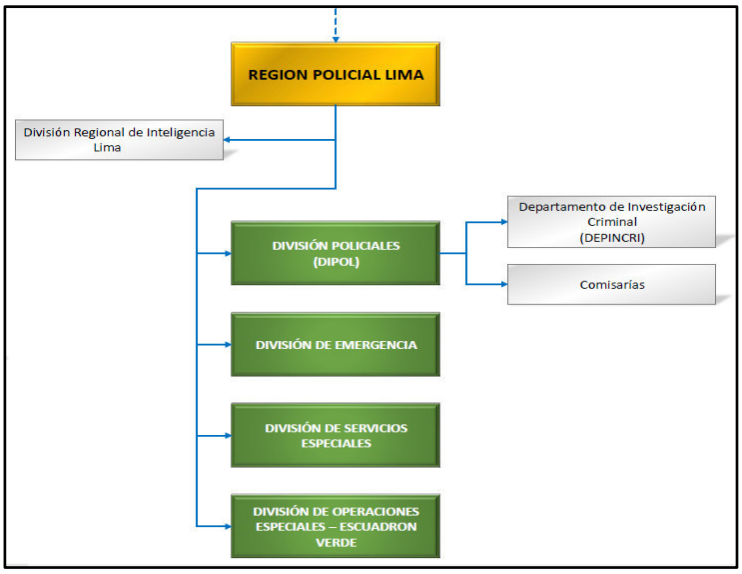
División de la Policía Nacional del Perú



En la Figura 3 se muestra un fragmento del organigrama general de la PNP, la Región Policial de Lima, en dónde se puede ver como parte de su estructura a la División de Servicios Especiales.

Figura 3

División de la Región Policial de Lima

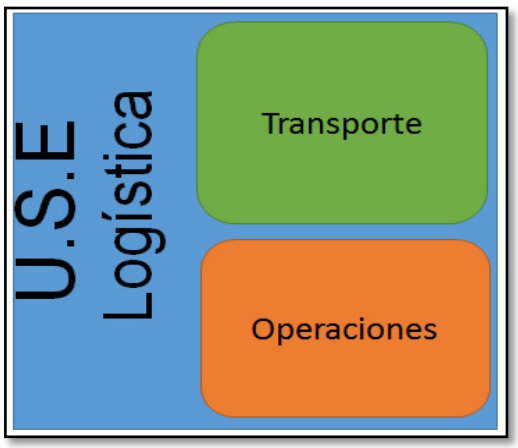


Nota. Adaptada de División de la Región Policial de Lima, de Pág. web, Portal de la PNP 2019

Como se indicó en el Capítulo I, la gran importancia de administrar la logística de transporte, dentro del DEPCODIS es fundamental, ya que para cumplir con su objetivo: Garantizar, mantener y restablecer el orden público en control de multitudes y disturbios civiles, el personal de la USE debe tener las rutas establecidas y los vehículos listos para su funcionamiento. En el Capítulo III se menciona con más detalle cómo trabajan las dos áreas de la USE que se muestran en la Figura 4 de manera gráfica.

Figura 4

División de la USE



CAPITULO III - MARCO REFERENCIAL

Para una mejor comprensión del estudio se presentan algunas investigaciones relacionadas, las bases teóricas de los temas presentados y los conceptos involucrados:

3.1. Antecedentes

Castañeda Jiménez & Cardona Arias (2014) describen el problema ambiental de la ciudad de Pereira en Colombia provocada por el mal uso de aceite vehicular, siendo este el que genere la creación de empresas destinadas a la recolección y correcto uso del desecho. En su investigación presentan la creación de un sistema de logística inversa agrupado a la recolección de aceite vehicular usado desde talleres mecánicos, lubricentros, servitecas, mediante cisternas; que fue planteada como un problema de ruteo de vehículos con capacidad restringida CVRP (Capacited Vehicle Routing Problem).

Los autores solucionan el problema introduciendo una heurística de dos fases, que trata de rutear primero y agrupar después, donde su objetivo fue optimizar costos de transporte de forma tal que la recolección del desecho resulte viable económicamente y ambientalmente.

Según Sánchez Hernández (2015) “las ciudades se componen de una serie de redes logísticas cuya optimización desempeña un papel importante frente a la sostenibilidad de las empresas”. En su trabajo aplicó la Heurística de Clarke y Wright (Heurística del ahorro) para resolver el ruteo de vehículos en una compañía especializada en transportar vinos y licores en México, implementando el algoritmo en una hoja de Excel.

El autor indica que, con otros softwares ya creados se pierde tiempo en analizar cómo funcionan sus comandos, por otro lado, al programar un básico algoritmo de ahorros con las restricciones adecuadas en una hoja de Excel, el resultado que se obtiene es favorable. Una ventaja adicional que se resalta

es que Excel es una herramienta muy accesible en el mercado por lo que se logra una mejor comprensión para el usuario.
Finalmente se obtuvo un ahorro del 17% de los costos variables, que dependen de las distancias que recorre el vehículo, a diferencia de la manera convencional con el que se desarrollaba el ruteo y en un tiempo de ejecución mínima.

Por otra parte Hernández Ortiz (2016) en su tesis, tuvo como objetivo mejorar métricas de operación en empresas de transporte especializadas en carga por carretera, minimizar distancias, tiempos y costos. Diseñó un sistema para múltiples depósitos, para lo cual empleó una metaheurística híbrida llamada *Grasp Clustering & Tabu Routing*, que fue elaborada para desarrollar un algoritmo de dos fases: *clusterizar* primero, donde utilizó el algoritmo de Grasp y rutear después donde empleó la metaheurística de Búsqueda Tabú, todo el programa fue codificado en Visual Basic.

El autor afirma que fue necesario emplear un algoritmo híbrido ya que el programa creado es apto para: 2 a 50 depósitos y 2 a 500 clientes. Para medir el grado de efectividad de su programa, comparó con resultados del mismo tipo de problema disponibles en librerías especializadas, obteniendo soluciones de buena calidad.

Como antecedentes nacionales, Benavente Sotelo (2016) “propone un modelo con fundamento científico que busque optimizar las rutas de distribución de ayuda humanitaria no alimentaria, en menos de 72 horas, plazo máximo definido por INDECI”. En su trabajo recrea un panorama crítico de un terremoto de 8 grados de intensidad con epicentro en Lima, puesto que el Perú pertenece al Cinturón de Fuego del Pacífico.

El estudio plantea un escenario de almacenes que aprovisionarán a subestaciones. Cada subestación dispensará la ayuda a puntos localizados en parques colindantes. La población afectada deberá reunirse al parque asignado para recibir la ayuda. El tipo de problema que identifica el autor es un Ruteo de Vehículos con Ventanas de tiempo (VRPTW), y lo soluciona con

método de dos fases, para *clusterizar* usó el algoritmo del barrido y para rutear el modelo TSP; concluyendo que se cumple con la restricción de horas dadas por la entidad supervisora.

Maguiña Agurto (2016), argumenta que el transporte es fundamental para las empresas que distribuyen productos a clientes. El objetivo que se plantea es utilizar el software “VRP Solver” para reducir las distancias de envío de una empresa que distribuye productos alimentarios. El software escogido se basa en la heurística del ahorro, determinando como datos de entrada la ubicación (longitud y latitud) de cada cliente y otorgando como resultados las rutas óptimas. Finalmente, con los ensayos hechos, la autora pudo minimizar en un 10% la distancia total que utilizaba empíricamente la empresa.

En el XIX Congreso Latino Iberoamericano de Investigación Operativa CLAIO-2018 en Lima, Pedro Ballesteros Silva presentó un problema de ruteo de vehículos multidepósito con entregas y recogidas simultáneas, resolviéndolo con una nueva metodología, un algoritmo híbrido, que mezcla una metaheurística con métodos exactos; para la metaheurística utilizó el Algoritmo Genético especializado de Chu Beasley y para el método exacto de programación lineal entera mixta empleó el método *branch and cut*.

En la investigación se ejecuta primero el algoritmo de Clustering, una vez obtenidos los depósitos con sus clientes, se desarrolla el algoritmo genético por cada clúster y finalmente a ese resultado se aplica el modelo de programación lineal. El autor consideró oportuno emplear una metaheurística debido al tamaño de parámetros: 3 depósitos, 50 clientes y 3 vehículos.

Por otra parte, en el mismo congreso Luis Polanco García, propone la mejoría del sistema de selección de rutas de patrullaje para bajar el índice de criminalidad en el distrito de Independencia en Lima Norte por medio de modelos matemáticos, utilizando el Problema del Agente Viajero (TSP) una vez ubicados los puntos más críticos de crimen organizado. El objetivo fue reducir el índice de criminalidad aumentando la percepción de seguridad.

Se observa que existen muchas aplicaciones y variaciones del problema de ruteo de vehículo, eso demuestra que hoy en día es esencial para las empresas e instituciones públicas o privadas optimizar el uso de sus recursos logísticos, así como ambientales y sociales.

3.2. Marco teórico

3.2.1. Logística de distribución

Hernández Ortiz (2016) afirma que el transporte de bienes cumple un rol indispensable dentro del área de logística de distribución en una empresa, ya que cumple con la necesidad de transportar mercadería desde los centros de producción hacia los puntos de destino final, considerando variables como el tiempo y costo. Para el caso de estudio, la Policía Nacional del Perú-PNP siendo una institución pública del estado peruano, comprende una logística que abarca armamento y transporte, así como las operaciones. Por lo que para esta investigación solo es de importancia la logística de transporte y operaciones.

3.2.1.1. La logística de transporte en la USE - PNP

Consiste en administrar todos los vehículos que trasladan a los policías de la USE hacia los manifestantes, estos vehículos pueden ser:

- Motobombas, motos que trasladan como máximo (2) policías
- Camionetas 4x4 todo terreno, implementadas con canastillas protectoras para transportar (10) policías
- Porta tropas, vehículos especializados para transportar (30) policías
- Buses, trasladan no más de (50) policías

3.2.1.2. La logística de operaciones en la USE-PNP

Consiste en el reconocimiento y estudio de lugares posibles o áreas probables dónde puede desarrollarse disturbios y manifestaciones, especialmente en servicios públicos estratégicos y establecimientos comerciales, etc. Además, cada área cuenta con rutas pre-reconocidas, igualmente vías o caminos son seleccionados con anticipación, esto es válido para escenarios (manifestaciones) que tienen una ocurrencia determinista.

3.2.2. Problema del Ruteo de Vehículos (VRP)

3.2.2.1. Conceptos

A continuación, se presentan algunas definiciones para entender el concepto del VRP. Según Olivera (Citado en Hernández, 2016) el VRP,

> surge como una generalización del problema clásico del agente viajero (TSP) en el que un vendedor tiene que recorrer una serie de lugares para entregar mercadería a sus clientes una sola vez, para luego volver al lugar de partida. El origen del VRP viene desde el año de 1959 y es introducido por Dantzing y Ramser los cuales representaron una aplicación real relacionada con la entrega de gasolina a las estaciones de servicio y propusieron la formulación matemática a este problema.

El VRP al ser una extensión del TSP, considera más de un vehículo para el ruteo, además otra diferencia que no considera el TSP es la capacidad del vehículo y la demanda de los clientes.

Otra definición afirma que el problema de ruteo de vehículo, es consecuencia de combinar dos problemas muy conocidos en la optimización combinatoria, el problema de empaquetamiento (Bin Packing Problem) y el problema del agente viajero (Travelling Salesman Problem). El primero consiste en no exceder la capacidad de carga cuando se asignen clientes a cada vehículo, mientras tanto el problema del agente viajero diseña el camino que tiene que recorrer el vehículo (Jaramillo, 2012).

Por otro lado se considera que:

> El objetivo del VRP es entregar bienes a este conjunto de clientes con demandas conocidas, al mínimo costo, encontrando las rutas óptimas que se originan y terminan en el almacén. Todos los clientes deben ser atendidos una sola vez, para lo cual se los asigna a los vehículos que llevarán la carga (demanda de los clientes que visitará) sin exceder su capacidad máxima de transporte.
>
> Barán & Hermosilla (Citado en Hernández, 2016)

Finalmente, Daza, Montoya, & Narducci (Citado en Hernández, 2016) llegan a la conclusión que un problema de ruteo de vehículos (VRP) consiste en identificar clientes y depósitos dispersos geográficamente y disponer de una flota de vehículos, para hallar rutas de mínimo costo que comiencen y terminen en los depósitos, con la restricción que los vehículos asistan a los clientes una sola vez.

En la presente investigación se considera que el VRP busca las rutas de distancias mínimas que deben recorrer los vehículos capacitados, los cuales tienen que cumplir con satisfacer la demanda de sus clientes, saliendo del depósito, pasando una sola vez por cada cliente y finalmente regresando al mismo depósito.

3.2.2.2. *Elementos del VRP*

En este apartado se hablará de los tres elementos principales que componen el VRP: clientes, depósitos y flota de vehículos.

Los clientes: Son los que demandan recursos materiales o humanos, por lo que estos recursos son entregados por medio de vehículos desde los depósitos hasta el cliente final y se expanden geográficamente en varios puntos de una región. Los clientes esperan que su necesidad sea satisfecha y que se cumpla con su demanda.

Además, es importante mencionar la posibilidad que los clientes cuenten con restricciones adicionales: rango horario de atención, (que se interpretan como ventanas de tiempo), dependencia entre vehículos y clientes (en el supuesto que un tipo de vehículo solo pueda satisfacer la demanda de un determinado cliente), devoluciones (siempre y cuando el cliente retorne mercadería a los depósitos), demanda (si la capacidad de los vehículos no se abastece para la cantidad solicitada por el cliente). (Hernández Ortiz, 2016)

Los depósitos: Son lugares donde salen los vehículos y se almacenan los recursos (bienes) que van a ser distribuidos a los clientes. Existen también problemas con depósitos múltiples, los cuales pueden tener asignada una

flota de vehículos. En el más común de los casos los vehículos deben salir y regresar al mismo depósito.
Hay que agregar que los depósitos cuentan con “restricciones asociadas como ventanas de tiempo, capacidades, distancias de las rutas a recorrer, o simplemente se quiera evitar una congestión de vehículos en el depósito” (Hernández Ortiz, 2016).

Los vehículos: Son el medio por el que se transportan los recursos (bienes) que son demandados desde los depósitos hacia los clientes. Los vehículos pueden ser de carga homogénea si presentan las mismas características o carga heterogénea en caso contrario. El número de vehículos que se debe disponer será igual al número de rutas que se debe generar.

Otro aspecto importante que considera Hernández Ortiz (2016) es que la capacidad de los vehículos puede estar expresada en peso, volumen y otras, dependiendo de la naturaleza del problema. Además, los costos que repercuten en los vehículos suelen ser fijos y variables (que posteriormente sirven para un análisis completo). Adicional estos también cuentan con restricciones como capacidad, horario de servicio y accesibilidad a ciertos lugares.

3.2.2.3. Modelo matemático del VRP

En seguida se muestra la formulación matemática del VRP basado en la publicación de Toth y Vigo (2002), cabe precisar que es el modelo básico.
Sea:

- $V = (0,1,2, \dots, n)$ es el conjunto de vértices, incluidos clientes y depósito
- $i = (1,2, \dots, n)$ son los clientes, que pertenecen al subconjunto N
- A es el conjunto de arcos posibles, donde para cada vértice i existe un conjunto de vértices j, cuyo arco (i, j) pertenece al conjunto A
- C_{ij} es el parámetro positivo, que equivale un monto mayor a cero si el arco (i, j) pertenece a la ruta, o cero en caso contrario

- x_{ij} es una variable binaria, que corresponde a 1 cuando el arco (i, j) pertenece a la ruta es decir transcurre un vehículo, o cero en caso contrario.
- d_i es lo que demanda cada cliente $i = 1,2, \dots, n$
- S es el conjunto de vértices incluido en V, entonces $d(S) = \sum_{i \in S} d_i$ es la demanda total
- K es el número de vehículos disponibles
- C es la capacidad de cada vehículo K
- $r(s)$ es la mínima cantidad de vehículos necesarios para satisfacer a todos los clientes con sus respectivas demandas.

Tenemos:

$$Min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} x_{ij} \qquad (1)$$

Sujeta a las siguientes restricciones:

$$\sum_{j \in V} \boldsymbol{x_{ij}} = \mathbf{1} \qquad \forall \boldsymbol{i} \in \boldsymbol{N} \qquad (2)$$

$$\sum_{i \in V} \boldsymbol{x_{ij}} = \mathbf{1} \qquad \forall \boldsymbol{j} \in \boldsymbol{N} \qquad (3)$$

$$\sum_{\mathbf{i} \in \mathbf{V}} \mathbf{x_{i0}} = |\mathbf{K}| \qquad (4)$$

$$\sum_{i \not\exists S} \sum_{j \in} \boldsymbol{x_{ij}} \geq \boldsymbol{r(s)} \qquad \forall \boldsymbol{S} \in \boldsymbol{N}, \boldsymbol{S} \neq \emptyset \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{x_{ij}} \in \{\mathbf{0}, \mathbf{1}\} \qquad \forall \boldsymbol{i}, \boldsymbol{j} \in \boldsymbol{V} \qquad (6)$$

En la ecuación (1) se representa la función objetivo la cual corresponde al costo total del trayecto y se busca que sea el mínimo. La sentencia (2) propone que para garantizar que todos los clientes sean atendidos, cada cliente debe ser satisfecho solo por un vehículo, no obstante, la restricción (3) indica que el vehículo atiende al cliente una sola vez, así se evita los bucles o ciclos sin sentido. La restricción (4) impone que la misma cantidad de vehículos K que parten del depósito, debe ser la cantidad que retorne finalizando las rutas. La restricción (5) propone la capacidad límite de carga por cada ruta y que este no puede ser superado por la demanda de cada cliente. Finalmente, la ecuación (6) indica que las variables de decisión son de tipo binarias. (Toth & Vigo, 2002).

A continuación, se muestra otro modelo matemático del VRP propuesto por Benavente Sotelo (2016), donde se indica a detalle cada componente del problema, se detallan la función objetivo, las variables de decisión y las restricciones.

Sean los índices:

- K: Conjunto de vehículos que trasladan policías
- A: Conjunto de arcos (distancias de un punto a otro)
- V: Conjunto de nodos (puntos de concentración y el depósito)
- N: Conjunto de nodos en la red, excepto el depósito
- $a+(i)$: Conjunto de nodos alcanzables desde el nodo i
- $b-(i)$: Conjunto de nodos desde los cuales se puede llegar al nodo i
- i: Nodo de origen
- j: Nodo de destino
- k: Vehículo perteneciente al conjunto de vehículos

Sean los parámetros:

- C_{ij}: Costo de traslado del nodo i al nodo j
- d_i: Demanda del nodo i
- C: Capacidad del vehículo homogéneo

Sea la variable de decisión:

- x_{ijk}: Variable binaria, consiste en la elección de pasar del nodo i al nodo j con el vehículo k

Tenemos:

$$Min \sum_{\boldsymbol{k \in K}} \sum_{(i,j) \in A} C_{ij}\, \boldsymbol{x_{ijk}} \qquad (1)$$

Sujeto a

$$\sum_{\boldsymbol{k \in K}} \sum_{\mathrm{j \in a+(i)}} \boldsymbol{x_{ijk}} = 1 \qquad \forall\, \mathrm{i} \in \mathrm{N} \qquad (2)$$

$$\sum_{\boldsymbol{j \in a+(0)}} \boldsymbol{x_{ojk}} = 1 \qquad \forall\, k \in K \qquad (3)$$

$$\sum_{\mathrm{i \in b-(j)}} x_{ijk} - \sum_{\mathrm{i \in a+(j)}} x_{jik} = 0 \qquad \forall\, \mathrm{k} \in \mathrm{K} \qquad (4)$$

$$\sum_{i \in b-(n+1)} x_{i,n+1,k} = 1 \qquad \forall k \in K \qquad (5)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in a+(i)} x_{ijk} \leq C \qquad \forall k \in K \qquad (6)$$

Función objetivo

En la función objetivo (1) se busca minimizar los costos de trasladarse de un lugar a otro. Si el vehículo "k" hace uso del arco "ij", es decir si $X_{ijk} = 1$, entonces es válido el costo C_{ij} porque se multiplica por uno y se incluye en la función de sumatoria. Caso contrario, si $X_{ijk} = 0$, el costo del arco se multiplica por cero, por lo que ese costo no es considerado.

Restricciones

La restricción (2) expresa que cada cliente "i", solo puede dirigirse hacia otro cliente "j" con un vehículo y elegir solo un camino "ij". En pocas palabras un vehículo siempre saldrá de cada cliente, por lo cual garantiza que su demanda sea satisfecha; pero aún existe el riesgo de que los clientes elijan el mismo destino "j".

En la restricción (3) se garantiza que partiendo desde el depósito cada vehículo "k" solo pueda dirigirse a un cliente "j", es decir elija un solo camino. Sin embargo, existe el mismo riesgo que la restricción anterior, que los vehículos se dirijan al mismo cliente "j".

En la restricción (4) se expresa que el número de caminos de un vehículo "k", tanto para salir como para entrar es la misma para llegar a un cliente "j" desde el cliente "i". Con esta restricción se impide lo que faltaba completar en la restricción (2) y (3).

La restricción (5) afirma que por cada ruta hecha por el vehículo "k" para trasladarlo de regreso al depósito solo exista un cliente. Por lo tanto, no quedarán vehículos desamparados que no puedan finalizar las rutas.

La restricción (6) indica claramente que no se debe exceder la capacidad máxima "C" del vehículo "k" cuando se suman las demandas de cada cliente "i", pertenecientes a una ruta.

3.2.2.4. Variantes del VRP

El problema inicial de ruteo de vehículos VRP tiene un amplio conjunto de variantes, pero las principales que Hernández Ortiz (2016) explica son:

- CVRP (VRP capacitado): Es el clásico VRP, su característica principal es que la capacidad del vehículo que se usa para el envío de los bienes es limitada y determinística.
- HVRP (Problema de Ruteo Vehicular con Flota Heterogénea): Este modelo es muy usual cuando se tienen vehículos principalmente de capacidades de carga diferentes, así como un variado tipo de vehículos que por su condición se deben establecer como restricciones.
- VRPTW (VRP con ventanas de tiempo): Para este problema una de las restricciones son los intervalos de tiempo de los clientes, es decir periodos o tiempos fijos en dónde se puede satisfacer la demanda de los clientes, es a este concepto que se le conoce como ventanas de tiempo.
- MDVRP (VRP con múltiples depósitos): La variación más importante de este problema es que ya no se cuenta con un solo depósito sino con varios de estos, cada depósito debe contar con un conjunto de vehículos, quienes deben satisfacer la necesidad de los clientes. Para la solución de este problema se utiliza métodos de dos fases, o algoritmos híbridos.
- SVRP (VRP estocástico): La gran diferencia es que no todas sus variables son constantes como el VRP clásico, por el contrario, más de una variable puede ser aleatoria y transformarse en el tiempo. El nivel de estos problemas se vuelve más complejo por lo cual se resuelven con heurísticas o metaheurísticas como Búsqueda Tabú, Colonia de hormigas y Algoritmos Evolutivos y Genéticos.
- VRPB (VRP con retornos): Consiste en el retorno de algunas mercancías, que hacen los clientes, por lo cual es necesario analizar que los bienes devueltos al vehículo no sobrepasen su capacidad. Este problema se resuelve mayormente con algoritmos genéticos.

- VRP – SDVRP (Problema de entregas divididas con diferentes vehículos - Split Delivery): Esta variante consiste en que un mismo cliente pueda satisfacerse por varios vehículos ya que se busca minimizar los costos totales de operación. Si la demanda del cliente es mayor a la capacidad de los vehículos es cuando se ocasiona este problema. Por lo que se debe cumplir con reducir al mínimo la flota de vehículos.

Existen también versiones del VRP con funciones objetivos particulares, por ejemplo la adaptación del problema cuyo propósito es disminuir las emisiones de C_{O2} como en Castañeda Jiménez & Cardona Arias (2014), otras versiones introducen la dinámica de entregar y recoger mercadería al mismo tiempo.

3.2.2.5. Complejidad del VRP

El VRP es un problema de tipo combinatorio NP-completo (No-determinístico polinomial), que indica que son problemas cuya solución no se puede resolver en un tiempo polinomial, donde este tiempo es un tiempo prudente. A demás se caracteriza por que el número de soluciones crece exponencialmente cuando se agregan más variables al problema, por lo que para este tipo de problemas no existe un algoritmo eficiente que de un resultado óptimo.

Castañeda Jimenez & Cardona Arias (2014) también afirman que gracias a las soluciones optimas que se han presentado con la implantación de modelos que van de acuerdo a la complejidad del VRP, se han desarrollado muchas investigaciones a lo largo de los últimos años con problemas de tipo VRP. Por el cual el mundo de problemas combinatorios sigue siendo todo un reto.

Si el problema de optimización es *NP -Hard*, según Marti (2003) se refiere a:

- El problema es de una naturaleza tal que no se conoce ningún método exacto para su resolución.
- Aunque existe un método exacto para resolver el problema, su uso es computacionalmente muy costoso o no viable.
- El método heurístico es más flexible que un método exacto, permitiendo, por ejemplo, la incorporación de condiciones de difícil modelización.

3.2.3. Heurística y Metaheurística

Seguidamente se presentan definiciones de las heurísticas y metaheurísticas presentadas por diferentes autores:

Riojas Cañari (2005) menciona que el término heurístico significa resolver problemas hábilmente, ayudándose de la información que esté al alcance, afirma que la palabra proviene del griego "*heuriskein"* que indica encontrar o descubrir, y también relata que este a su vez deriva de "*eureka"*, una popular expresión de Arquímedes.

Por otro lado Taha (2012) sostiene que:

> La heurística está diseñada para encontrar buenas soluciones aproximadas de problemas combinatorios difíciles, que de lo contrario no pueden resolverse mediante los algoritmos de optimización disponibles. Una heurística es una técnica de búsqueda directa que utiliza reglas favorables, prácticas para localizar soluciones mejoradas. (pág. 351)

Adicionalmente las Metaheurísticas sirven para "resolver problemas de optimización combinatoria, en que los heurísticos clásicos no son aplicables. (…) proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos, combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos" (Glover , 1986).

Finalmente, en los últimos años los problemas han ido complicándose más, ya sea por el número de variables o por restricciones, por lo que han surgido métodos llamados Metaheurísticas con el fin de obtener mejores resultados que las heurísticas convencionales. Riojas Cañari (2005) declara que "el sufijo *meta* significa *más allá*, a un nivel superior, las metaheurísticas son estrategias para diseñar o mejorar los procedimientos heurísticos con miras a obtener un alto rendimiento".

3.2.3.1. Métodos de solución del VRP

Los algoritmos comúnmente empleados para resolver el VRP son heurísticas y metaheurísticas, ya que debido a su naturaleza carecen de técnicas exactas que puedan garantizar una solución óptima. Sin embargo, para problemas con variables de tamaño moderado se puede obtener una solución óptima, no obstante, los tiempos de ejecución del algoritmo son por lo regular amplios.

Como primera solución se presentan los métodos exactos, por ejemplo, la formulación en programación lineal entera mixta, donde los algoritmos de generación de columnas y los métodos Branch and Bound y Branch and Cut son los ideales como indica Toth y Vigo (2002), estos se pueden resolver con paquetes computacionales conocidos comercialmente como Lingo y/o Lindo o softwares que cuenten con la herramienta de Solver, como Excel, Java, CPLEX y lenguajes como AMPL.

Estas herramientas de solución pueden ser aplicadas para casos limitados de variables, por ejemplo: menos de 4 depósitos y no más de 15 clientes, ofreciendo resultados razonables y aceptables hablando en niveles de tiempo computacional y memoria.

Según Sánchez Hernández (2015) “estos métodos parten de una formulación como modelos de programación lineal y llegan a una solución factible gracias a algoritmos de acotamiento del conjunto de soluciones factibles”.

Por otra parte Jaramillo Posada (2012) indica que se debe aplicar algoritmos heurísticos y metaheurísticas para generar soluciones de calidad en un tiempo aceptable, debido a la dificultad computacional del problema.

Según Olivera (2004) en 1964 Clarke and Wright implementaron el Algoritmo del Ahorro, la primera heurística utilizada para resolver el VRP. Siendo estos los pioneros, se da comienzo a todas las investigaciones que hablan de problemas combinatorios en ruteo de vehículos. Se puede apreciar en la

literatura existente que algunos trabajos encuentran soluciones óptimas y otras solo aproximaciones factibles, como óptimos locales.

Otras heurísticas clásicas para solucionar el VRP son Métodos de asignar primero y rutear después, dentro de ello Heurística de barrido o *sweep*, así como Heurísticas de Inserción.

Del total de las metaheurísticas existentes en la literatura, destaca la Búsqueda Tabú propuesta por Glover en 1986. Por el uso de bajo número de variables y parámetros y su efectividad, la búsqueda tabú es una de las soluciones más empleadas en optimización combinatoria; por lo cual la mayoría de trabajos de investigación sobre VRP emplean este algoritmo.
Otras metaheurísticas que se utilizan con menor frecuencia son Algoritmo genético, Colonia de hormigas y Redes neuronales.

En los últimos años algunos autores se han atrevido a solucionar el VRP con algoritmos híbridos como Hernández Ortiz (2016), es decir mezclar heurísticas o metaheurísticas o incluso con métodos exactos; y de esa manera construir un método más potente que muestre soluciones rápidas y más cercanas al óptimo.

Como observamos varias investigaciones intentan encontrar con diferentes métodos un mejor resultado, sin embargo, por su naturaleza un VRP es complejo, por lo cual siguen las investigaciones en el futuro.

3.2.3.2. ¿En qué casos usar un método heurístico?

Como ha señalado Olivera (2004) el VRP son “Problemas de Optimización Combinatoria y pertenecen, en su mayoría, a la clase *NP -Hard*. La motivación académica para resolverlos radica en que no es posible construir algoritmos que en tiempo polinomial resuelvan cualquier instancia del problema”.

Los problemas que se presentan en nuestra sociedad son complejos (*NP - Hard*) por naturaleza, y estos son la razón principal de que se elija heurísticas o metaheurísticas.

3.2.3.3. Clasificación de los métodos heurísticos

Marti (2003), clasifica a los métodos heurísticos más conocidos de la siguiente manera:

- Métodos de Descomposición.- La idea de este método es descomponer en sub problemas el problema inicial, para que de esa manera los sub problemas sean más sencillos de resolver y finalmente recordar que todas las partes pertenecen a un mismo problema.
- Métodos Inductivos.- Este método similar al anterior empieza por atacar las versiones pequeñas o más sencillas del problema, para terminar de resolver el caso completo.
- Métodos de Reducción.- Consiste en restringir la región de soluciones simplificando el problema, lo más común es identificar propiedades que se cumplan usualmente en soluciones factibles e introducirlas como restricciones del problema. No obstante existe el riesgo de perder soluciones óptimas del problema inicial.
- Métodos Constructivos. - Como su nombre lo indica su fin es construir por pasos la solución del problema. En su totalidad son métodos deterministas y busca la mejor elección en cada iteración. El problema del Agente viajero, es uno de esos problemas clásicos que son resueltos por este método constructivo.
- Métodos de Búsqueda Local. – A diferencia de los otros procedimientos este es un método de mejora local, comienzan con una solución inicial del problema y buscan mejorarla progresivamente en cada iteración. El algoritmo finaliza cuando no existe ninguna solución factible que mejore la anterior. Un ejemplo de este método es la heurística de Búsqueda Tabú.

3.2.3.4. Heurísticas para resolver el VRP

Según Rocha Medina, González La Rotta, & Orjuela Castro (Citado en Sánchez Hernández, 2015) las principales heurísticas utilizadas para resolver el VRP son:

- Heurística de Clarke y Wright o Algoritmo de Ahorros
- Método Rutear Primero – Asignar Después
- Métodos Asignar Primero – Rutear Después
- Algoritmo de Barrido (Sweep Algorithm)
- Heurísticas de Inserción
- Procedimientos de Búsqueda Local

Para este trabajo como se expuso en el capítulo 1.3, se hará uso de la Heurística del Ahorro, seguidamente se describe el método.

3.2.4. Heurística del Ahorro (Heurística de Clarke y Wright)

En el año 1964 Clarke and Wright implementaron el algoritmo del Ahorro, siendo los pioneros en utilizar este método para resolver el VRP. En 1969, cinco años más tarde, Tillman fue el pionero en proponer la heurística de ahorros de Clark and Wright para solucionar el MDVRP. Estas fueron las primeras investigaciones que despertaron el interés en el ruteo de vehículos. La heurística del ahorro se considera un método constructivo de solución.

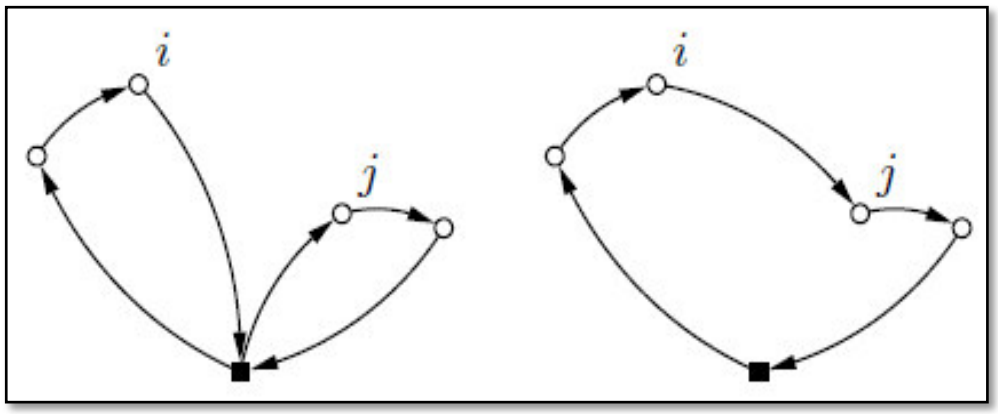
Olivera (2004) muestra que si en una solución dos rutas diferentes $(o, \dots, i, o)$ y $(o, j, \dots, o)$ pueden ser combinadas formando una nueva ruta $(o, \dots, i, j \dots, o)$ como se muestra en la Fórmula I (explicada posteriormente), el ahorro de esa distancia obtenida por dicha unión es:

$$sij = cio + coj - cij \qquad \text{(I)}$$

por lo que en la nueva solución los arcos (i, o)y (o, j) no serán utilizados y se agregará el arco (i, j) como se observa en la Figura 5. En este algoritmo se parte de una solución inicial y se realizan las uniones que den mayores ahorros siempre que no violen las restricciones del problema.

Figura 5

Funcionamiento del Algoritmo del Ahorro



Nota. Reproducida de Funcionamiento del Algoritmo del ahorro, de Olivera, 2004, Heurística para problemas de ruteo de vehículos.

Para aplicar este método es necesario conocer los costos o las distancias que existen de nodo a nodo, es decir el costo de cada trayecto.

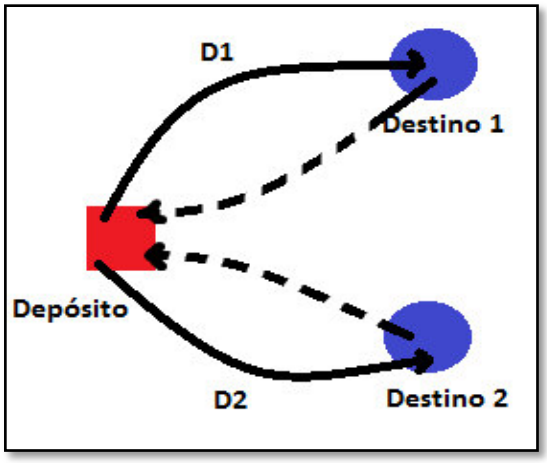
A continuación, se explica cómo se genera la Fórmula I:

Sea un vehículo que sale del depósito y se dirige a los destinos 1 y 2 como se aprecia en la Figura 6, la distancia total (se cuenta tanto la ida como el regreso) que recorre el vehículo es:

$$R = 2D1 + 2D2, \text{ (Ecuación 1)}$$

Figura 6

Recorrido inicial

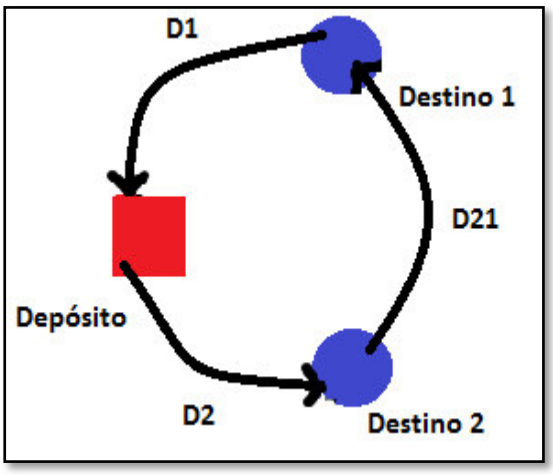


En cambio, si en vez de tener los destinos separados se unen con una ruta intermedia como se aprecia en la Figura 7, la distancia total que recorre el vehículo es:

$$N = D2 + D21 + D1, \text{ (Ecuación 2)}$$

Figura 7

Nuevo recorrido



Por lo tanto el ahorro de cometer esa acción es el resultado de restar la ecuación 1 y la ecuación 2, mostrando el ahorro $S = R - N = D1 + D2 - D21$, generando la Formula I.

3.2.4.1. Pasos a seguir para su ejecución

1. Construir la matriz de costos Cij, que se puede generar también como la distancia de un cliente a otro y conocer la demanda de cada cliente.
2. Generar rutas iniciales (o, i, o), que indica que el vehículo sale del depósito, se dirige hacia el cliente y regresa al depósito.
3. Hallar la matriz de ahorros Sij con la Fórmula I, teniendo como base la matriz de costos.
4. Ordenar los ahorros de mayor a menor en una lista y colocar de que par (i, j) de clientes proceden.
5. Tomar los clientes (i, j) del inicio de la lista y empezar a unir.
6. Unir dos ciclos de clientes (i, j) para generar las rutas si:
   a) Los clientes i tienen el mismo orden de posición
   b) Los clientes j tienen el mismo orden de posición

c) La capacidad máxima del vehículo no es excedida

7. Si hay clientes (i, j) que no han podido ser introducidos a alguna ruta deben unirse para generar otra ruta.
8. Repetir desde el paso 6 hasta atender a todos los clientes.

3.2.4.2. Pseudocódigo

A continuación, se presenta la Heurística del Ahorro en forma de pseudocódigo.

1 $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6 \ldots : extremos\ derecho\ e\ izquiero\ de\ cada\ par\ de\ clientes$

2 $Q : capacidad\ del\ vehículo$

3 $q(r_i): demandadel\ cliente$

4 $Construir\ n\ rutas\ una\ para\ cada\ cliente$

5 $Calcular\ los\ costos\ de\ cada\ ruta\ C_{ij}$

6 $Hallar\ los\ ahorro\ de\ cada\ ruta\ S_{ij}$

7 $Ordenar\ de\ mayor\ a\ menor\ los\ ahorros\ generados\ y\ guardarlos\ en\ una\ lista\ L$

8 ***while*** $L\ es\ no\ vacía$ ***do***

9 $e = (e_1, e_2) \longrightarrow obtener\ cima\ de\ L$

10 $r_1 \longrightarrow ruta\ que\ contiene\ a\ e_1$

11 $r_2 \longrightarrow ruta\ que\ contiene\ a\ e_2$

12 ***if*** $r_1 \neq r_2, e_1\ es\ extremo\ de\ r_1, e_2\ es\ extremo\ de\ r_2\ y$
$q(r_1) + q(r_2) \leq Q$ ***then***

13 $r \longrightarrow Unir(r_1, r_2, e)$

14 $Añadir\ la\ ruta\ r\ y\ eliminar\ las\ rutas\ r_1\ y\ r_2$

15 ***end if***

16 ***end while***

En la línea 8 del pseudocódigo se afirma que se ejecutará el algoritmo hasta que la lista L esté vacía, esta lista contiene a los ahorros ordenados de forma decreciente. Más adelante en la línea 9, 10 y 11 se escoge al par de clientes con el mayor ahorro. Finalmente, en la línea 12 y posteriores se evalúa si la demanda de cada cliente sobrepasa la capacidad del vehículo, si es así se debe seguir iterando hasta que se cumpla la condición tomando en cuenta que no se debe elegir los clientes ya evaluados.

3.3. Marco conceptual

1. **Arco.-** Relación matemática que conecta dos vértices o nodos.
2. **Cliente.-** Concentración de multitudes o grupo de manifestantes que cumplen un fin determinado.
3. **Cluster.-** Término que deriva del inglés y se usa para definir un conjunto, grupo o cúmulo de recursos.
4. **Concentraciones o marchas no multitudinarias**. - Grupo de manifestantes de no más de 40 personas.
5. **Demanda.-** Número mínimo de policías que requiere cada cliente para controlar la manifestación.
6. **Depósito.-** Centros de Unidad de Servicios Especiales (USE)
7. **Manifestación avisada.-** Manifestación que se da a conocer días antes o un día antes de que se produzcan.
8. **MDVRP.-** Multi-Depot Vehicle Routing Problem, traducido como el problema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos.
9. **Nodo. -** Son las unidades que conforman un grafo, clientes y depósito.
10. **Personal de la USE. –** Oficiales, Sub Oficiales de la Policía Nacional del Perú, específicamente del departamento de la Unidad de Servicios Especiales, con funciones como liderar batallones y velar por el cumplimiento de todas las operaciones especiales.
11. **Policía.-** Fuerza de seguridad nacional encargada de mantener el orden público y la seguridad de los ciudadanos que pertenece a la Unidad de Servicios Especiales.
12. **Óptimo.-** Selección del mejor elemento de un conjunto de soluciones en una región factible, con respecto a algún criterio. Se debe entender que no hay una solución mejor a una óptima.
13. **TSP.**- Travel Salesman Problem, traducido como el problema del agente viajero, se debe hallar la secuencia optima de un punto a otro, cuya distancia sea la mínima.
14. **VRP.**- Vehicle Routing Problem, traducido como el problema de ruteo de vehículos.

CAPITULO IV - MÉTODO

4.1. Diseño metodológico

4.1.1. Descripción del escenario

Para el escenario se estudió como referencia las manifestaciones y huelgas provocadas por el Sector Salud del Perú (Sindicato Nacional Médico-Sinamssop, el Sindicato Nacional de Enfermeras-Siness del Seguro Social y los principales sindicatos del sector) , cuyas concentraciones se realizan en Lima Metropolitana.

4.1.2. Elementos

- Los clientes están conformados por grupos de médicos, enfermeros y personal administrativo del sector salud que parten de diferentes lugares y entidades públicas, se cuenta con 13 clientes.
- El depósito, es la Unidad de Servicios Especiales (USE) de la Región Policial de Lima que se encuentra en la Av. Alfonso Ugarte, para este escenario se consideró 1 depósito.
- El vehículo, son los buses especiales que tienen una capacidad de 50 policías cada uno. Para el estudio se utiliza solo buses (vehículos homogéneos), aunque la USE dispone de otro tipo de transportes que intervienen en sus operaciones diarias.

4.2. Variables

La variable y parámetros en estudio se detallan a continuación en la Tabla 1, para posteriormente ser utilizadas en el desarrollo del método.

Tabla 1

Variables de Estudio

Parámetro y variable	Descripción
Vehículos	Son el medio de transporte que traslada policías desde la USE hacia los clientes.
Clientes	Se refiere a las concentraciones de multitudes (manifestantes que se agrupan para un fin).
Depósito	Es el centro USE (Unidad de Servicios Especiales).
Capacidad del vehículo	Es la cantidad máxima de policías que pueden ser trasladados en el vehículo.
Demanda	Es la cantidad de policías que se requieren para cada cliente.
Distancia mínima de ruteo	Es la variable de resultado.

Las constantes son:

- C_{ij}: Costo de traslado del nodo i al nodo j
- d_i: Demanda del nodo i
- Q: Capacidad del vehículo

Los valores de los parámetros para el caso de estudio fueron los siguientes:

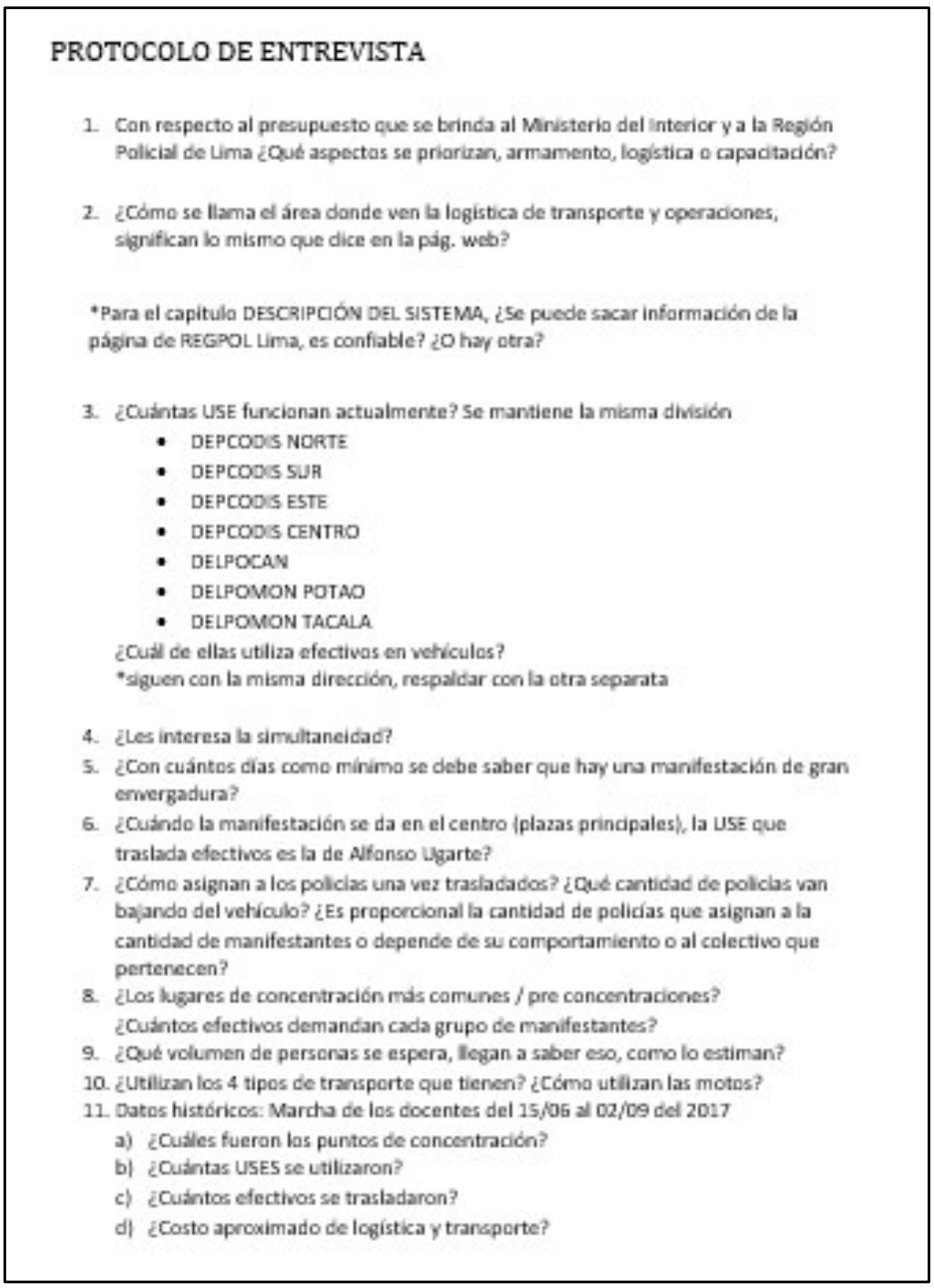
a) N° de clientes: 13
b) N° de depósitos: 1
c) Demanda del nodo i : 12 (demanda constante)
d) Capacidad del vehículo: 50 (capacidad homogénea)

4.3. Técnicas de recolección de datos

Los instrumentos de recolección de datos fueron el cuestionario, que se muestra en la Figura 8 y se aplicó al personal de la USE de la Región Policial de Lima, esto debido al tipo de variables, ya que son datos históricos y empíricos, ver en detalle Anexo 1; y la observación de planos de Lima metropolitana.

Figura 8

Cuestionario



PROTOCOLO DE ENTREVISTA

1. Con respecto al presupuesto que se brinda al Ministerio del Interior y a la Región Policial de Lima ¿Qué aspectos se priorizan, armamento, logística o capacitación?

2. ¿Cómo se llama el área donde ven la logística de transporte y operaciones, significan lo mismo que dice en la pág. web?

*Para el capítulo DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA, ¿Se puede sacar información de la página de REGPOL Lima, es confiable? ¿O hay otra?

3. ¿Cuántas USE funcionan actualmente? Se mantiene la misma división
   - DEPCODIS NORTE
   - DEPCODIS SUR
   - DEPCODIS ESTE
   - DEPCODIS CENTRO
   - DELPOCAN
   - DELPOMON POTAO
   - DELPOMON TACALA

   ¿Cuál de ellas utiliza efectivos en vehículos?
   *siguen con la misma dirección, respaldar con la otra separata

4. ¿Les interesa la simultaneidad?
5. ¿Con cuántos días como mínimo se debe saber que hay una manifestación de gran envergadura?
6. ¿Cuándo la manifestación se da en el centro (plazas principales), la USE que traslada efectivos es la de Alfonso Ugarte?
7. ¿Cómo asignan a los policías una vez trasladados? ¿Qué cantidad de policías van bajando del vehículo? ¿Es proporcional la cantidad de policías que asignan a la cantidad de manifestantes o depende de su comportamiento o al colectivo que pertenecen?
8. ¿Los lugares de concentración más comunes / pre concentraciones?
   ¿Cuántos efectivos demandan cada grupo de manifestantes?
9. ¿Qué volumen de personas se espera, llegan a saber eso, como lo estiman?
10. ¿Utilizan los 4 tipos de transporte que tienen? ¿Cómo utilizan las motos?
11. Datos históricos: Marcha de los docentes del 15/06 al 02/09 del 2017
    a) ¿Cuáles fueron los puntos de concentración?
    b) ¿Cuántas USES se utilizaron?
    c) ¿Cuántos efectivos se trasladaron?
    d) ¿Costo aproximado de logística y transporte?

A continuación, se muestra el cuadro detallado de los instrumentos de recolección de datos que se empleó para el estudio respectivo, ver Tabla 2.

Tabla 2

Recolección de datos

Instrumento de recolección de datos	Variables que recoge	Descripción	¿Fuente primaria o secundaria?	Fuente de información	Tipo de instrumento
Cuestionario y observación de plano	N° de vehículos	El vehículo es el medio de transporte que lleva la demanda del cliente del depósito hacia el cliente	Primaria	Personal de la USE	Entrevista
	Tipos de vehículo		Primaria	Personal de la USE	Entrevista
	N° de grupo de clientes	El cliente se refiere a la concentración de multitudes (manifestantes que se agrupan para un fin)	Primaria	Personal de la USE	Entrevista / base de datos
	N° de personas que conforma cada grupo de cliente		Primaria	Personal de la USE	Entrevista / base de datos
	N° de depósitos	Son los centros USE / Con cuantos vehículos cuenta el depósito	Primaria	Personal de la USE	Entrevista
	Capacidad de c/depósito		Primaria	Personal de la USE	Entrevista
	N° de policías que demanda cada cliente	N° de policías que requiere c/cliente	Primaria	Personal de la USE	Entrevista
	Costo mínimo de ruteo (costo de combustible)	Es la variable de resultado	Secundaria	Personal de la USE	Base de datos

4.4. Técnicas para el procesamiento de la información

Para obtener los parámetros como la matriz de costos, que se traduce a la matriz de distancias de un cliente a otro, se utilizó la herramienta de Google Maps (Google, 2022), para posteriormente ser revisada y validada por el personal de la USE, puesto que hay rutas alternas que recorre el vehículo que Google Maps no los registra.

Esta herramienta en algunas ocasiones muestra hasta 3 distancias en Km diferentes, de un mismo inicio hacia un destino, por lo que se calibrará de acuerdo a la naturaleza de las mediciones obtenidas. Cabe resaltar que se trabaja con la distancia de Manhattan, ya que una distancia Euclidiana no refleja un resultado real.

A continuación, se muestran los dos casos que se emplearon para la tesis.

Caso 1: Cuando los datos resultaron homogéneos, es decir iguales o con una desviación de $\pm 0.1, 0.2\ km$ entre ellos, se aplicó su respectivo promedio (como si los datos cumplieran una distribución normal), ver Figura 9.

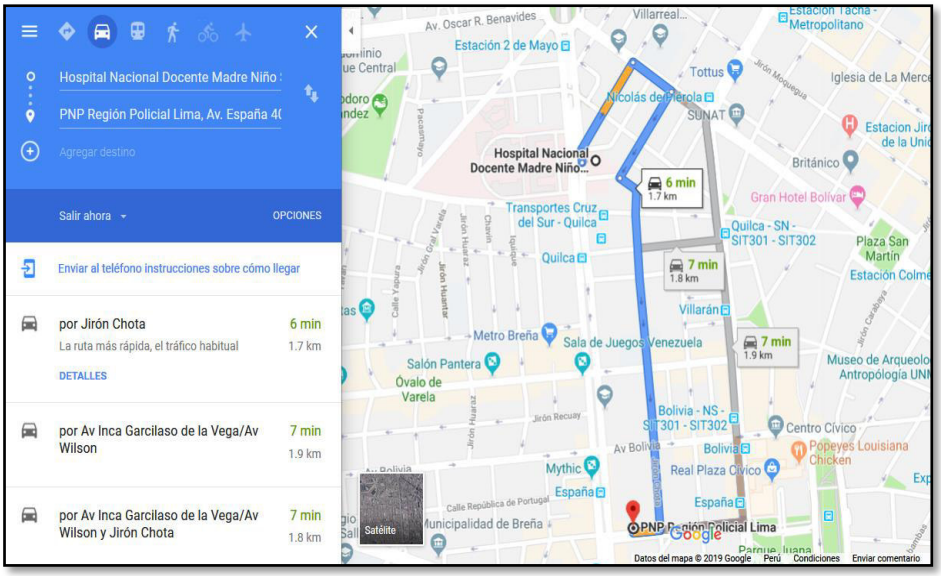
Para algunas distancias en específico el personal de la USE prefirió dar un rango adicional de desviación de $+< 0.2\ , 1 > km$ a la distancia de google maps.

Caso 2: Cuando los datos se presentaron muy dispersos (como una distribución triangular), es decir mayores a $\pm 0.3\ km$ entre ellos, se empleó la distancia que el personal de la USE determinaba, en algunos se escogió la distancia mayor, menor o del medio, según la experiencia del personal de la USE. Para algunas distancias también se le agregó un error de $+< 0.2\ , 1 > km$ para una mayor certeza, ver Figura 10.

La aplicación de estos casos se muestra más adelante en el capítulo 4.6.1.1 Calculo de distancias en Google Maps, en las Tabla 4 y Tabla 5. Es muy importante resaltar que la determinación del personal de la USE fue fundamental para obtener la distancia final.

Figura 9

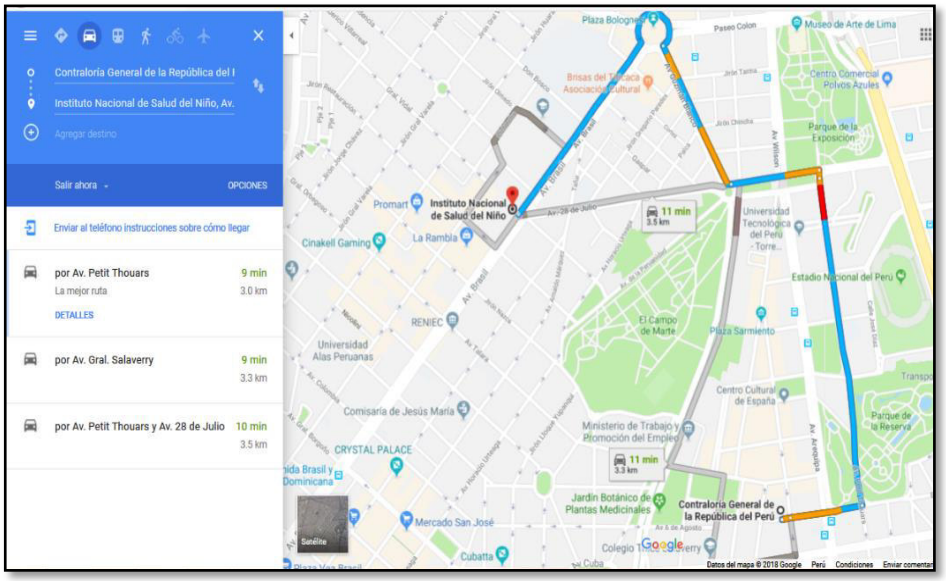
Mapa con rutas, caso 1



Nota. Adaptada de Mapa con rutas, caso 1, de Google Maps, 2019.

Figura 10

Mapa con rutas, caso 2



Nota. Adaptada de Mapa con rutas, caso 2, de Google Maps, 2019.

Se consideran 13 clientes de “A” a “M” repartidos por todo Lima Metropolitana, y el depósito “Q”, seguidamente se muestra en la Tabla 3 el número, nombre y ubicación exacta de todos los nodos.

Tabla 3

Nombre de nodos y direcciones

Nodo	N°	Nombre	Dirección
Q	0	PNP Región Policial Lima	Av. España 400, Cercado de Lima 15001
A	1	MININTER	Av. Enrique Canaval y Moreyra 30
B	2	MINSA	Av. Gral. Salaverry 801, Jesús María 15072
C	3	MEF	Jr. Junín 319, Cercado de Lima 15001
D	4	PCM	Jr. Carabaya, s/n, Cercado de Lima
E	5	Instituto del Niño	Av. Brasil 600, Breña 15083
F	6	H.N Arzobispo Loaiza	Av. Alfonso Ugarte 848, Cercado de Lima 15082
G	7	H.N Dos de mayo	Av. Miguel Grau 13, Cercado de Lima 15003
H	8	H.N Docente madre niño San Bartolome	Av. Alfonso Ugarte 825, Cercado de Lima 15001
I	9	Hospital Guillermo Almenara Irigoyen	Av. Miguel Grau 800, La Victoria 15033
J	10	Hospital Alberto Sabogal Sologure	Jr. Colina 1081, Bellavista 07011
K	11	Hospital Edgardo Rebagliati Martins	Av. Edgardo Rebagliati 490, Jesús María 15072
L	12	Sede principal ESSALUD	Av. Arenales 1302, Lince 15072
M	13	Contraloría General de la República	Jr. Coronel Camilo Carrillo 114, Jesús María 15072

4.5. Herramientas

En esta sección se describe las herramientas que se han empleado en la investigación. Para este proyecto se utilizó el lenguaje de macros Microsoft VBA en un inicio y el entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual Studio.

4.5.1. Microsoft VBA

Consiste en un lenguaje de macros de Microsoft Visual Basic que se utiliza para programar aplicaciones Windows y que se incluye en varias aplicaciones de Microsoft Office, como Outlook, Word, Excel, Access y Power Point.

Este trabajo se desarrolla inicialmente con Microsoft VBA de Excel, ya que la solución del problema de ruteo de vehículo parte por desarrollar matrices, lo cual resultó amigable ejecutarlo en Excel. A medida que seguía incorporándose código, cantidad de variables y sentencias, el programa se vio limitado, por lo que se vio factible emplear la herramienta de Microsoft Visual Studio, para todo el desarrollo del algoritmo. Esta primera fase fue un código de autoría propia.
La versión utilizada es Microsoft Excel 2016.

4.5.2. Microsoft Visual Studio

Se trata de un conjunto de herramientas de programación que permite desarrollar, analizar, depurar, probar, controlar versiones, colaborar y desplegar código, por lo que se le conoce como una IDE-Integrated Development Environment, creado por la compañía Microsoft.

La heurística del Ahorro expuesto en el siguiente capítulo fue programada en esta herramienta, por ser un programa gratuito de descarga, de sencilla codificación y de alto rendimiento, que permite codificar grandes cantidades de variables y restricciones, por lo tanto, las ventajas resultaron muy provechosas. Esta segunda fase fue un código realizado con el Licenciado en Investigación Operativa, Fabio Aylas Barranca.
La versión utilizada es Microsoft Visual Studio 2019 versión 16.8.3.

4.6. Método

Una de las dificultades que resultan de la solución por método exacto es el tiempo que demora el software en obtener la solución óptima, y esto se debe generalmente al gran número de nodos como se detalla en el Capítulo III.

Por lo tanto, se optó por resolver el problema utilizando La heurística del Ahorro, incluso conociendo que no se puede garantizar una solución óptima por no ser este un método exacto.
Para lo cual se dividió el trabajo en tres etapas:

1. Modelar el grafo y construir la matriz de distancias
2. Diseñar, programar y validar el software que implementa la heurística del Ahorro
3. Mostrar que el programa creado tiene ventajas sobre el método exacto

4.6.1. Modelar el grafo y construir la matriz de distancias

Como ya se mencionó antes, el estudio se basa en un supuesto escenario crítico que implica una manifestación avisada y dónde en simultáneo se agrupan los manifestantes en los puntos indicados anteriormente.

Para modelar el grafo es necesario nodos y arcos, los nodos serán los clientes y los arcos para este trabajo no son simétricos, ya que representan la distancia en Km de un cliente a otro de ida y vuelta y estos no siempre son la misma medida en la realidad.

A continuación, se nombra todos los lugares, en dónde se ubicaron los clientes, que se establecieron para el estudio:

- USE-Centro - Región Policial de Lima
- Hospitales nacionales (más recurrentes para manifestaciones)
- Ministerios del poder Ejecutivo, pertenecientes a los sectores de Salud, Interior y Economía
- Instituciones del estado como: Presidencia del Consejo de Ministros-PCM y Contraloría de la República

En la Figura 11 se observa todos los nodos del grafo en Mapa Satelital. En el capítulo 4.4 en la Tabla 3 se explica más a detalle la denominación de los nodos, nombre de los lugares y ubicación.

Cabe indicar que este grafo no se ha completado con los arcos ya que existen infinidad de conexiones entre todos los nodos, por lo que para una mejor presentación se optó por mostrar solo los nodos.

Posteriormente en el capítulo 4.6.2.2 se presenta el grafo completo resultante de la utilización de un software libre que utiliza métodos exactos y en el capítulo 5.1 se presentará también el grafo completo con nodos y arcos, que son los grafos resultantes de la heurística del Ahorro.

Figura 11

Nodos del grafo



Nota. Adaptada de Nodos del grafo, de Google Maps, 2022.

4.6.1.1. Cálculo de distancias en Google Maps

Una vez localizados los nodos que son los puntos de ubicación de los clientes, se procedió a hallar las distancias entre los nodos por medio de Google Maps (Google, 2019), como se mencionó en el Capítulo 4.4. La herramienta resultó ser provechosa para obtener el cálculo real de las distancias.

Las distancias en Km que resultan del depósito "Q" hacia cada cliente se muestran en la Tabla 4, estos son obtenidos por la aplicación de los casos del Capítulo 4.4. No se consideró analizar los tiempos para este estudio, porque eso implica otras variables como el tráfico y el objetivo es minimizar las distancias recorridas para cumplir con el tiempo de respuesta. En la Tabla 5 se muestra las distancias en Km del cliente "A" hacia todos los nodos incluido el depósito.

Tabla 4

Distancia del depósito "Q" hacia todos los clientes

Nodo	Km
A	7.5
B	2.5
C	3.6
D	3.3
E	1.4
F	1.8
G	4.7
H	1.5
I	2.8

Nodo	Km
J	9.4
K	3.4
L	2.8
M	2.9

Tabla 5

Distancia del cliente "A" hacia todos los nodos

Nodo	Km
Q	6.7
B	5.4
C	7
D	6.7
E	6.4
F	7
G	6.5
H	6.7
I	6
J	20
K	4.8
L	4.3
M	5

4.6.1.2. Elaboración de matriz de distancias

Para una mejor presentación gráfica de la matriz se describieron las distancias de un nodo a otro en Excel 2016, como primer paso del Algoritmo del Ahorro. En la Tabla 6 se muestra la matriz de distancias en Km presentado en Excel.

Tabla 6

Matriz de distancias C_{ij}

		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Q	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
0	Q	-	7.5	2.5	3.6	3.3	1.4	1.8	4.7	1.5	2.8	9.4	3.4	2.8	2.9
1	A	6.7	-	5.4	7	6.7	6.4	7	6.5	6.7	6	20	4.8	4.3	5
2	B	2.6	6.3	-	5	4.5	2.5	3.8	5	2.9	3.5	10	2	1.5	1.5
3	C	3.1	7.2	5	-	0.16	4	2.6	3	2.5	2.5	15	5.4	5	4.7
4	D	3.3	7	5	1	-	4.2	2.5	7.3	2.5	3	15	5.5	5	4.7
5	E	3	7.6	2.5	5	4.5	-	1.9	4.3	2.6	2.75	9.3	3.5	3.3	2.7
6	F	2.5	6.8	4.2	4.2	3.9	1.9	-	4.9	1	3.4	9.5	4	3.5	3.5
7	G	3.5	7	5	2.5	2.7	4.3	4.3	-	3.7	1.3	16.5	5.2	4.7	5.1
8	H	2.4	7	4	2.8	2.5	2.3	1	4.3	-	3.2	10.3	4.9	4.4	3.7
9	I	3.3	6	5	2.8	3	4	4.6	1.5	4.3	-	16.9	12.5	4.3	4.5
10	J	10	21	10	13	12	9.5	9.9	17	9.7	11.2	-	10.8	11.3	10.4
11	K	3.4	4	0.85	5.5	5.5	3.6	4	5.3	3.8	11.2	10.2	-	1	1.2
12	L	3.5	3.5	2	5.3	5	4.2	4.6	4.9	4.5	3.9	10.9	0.5	-	1.6
13	M	2.5	5	1.2	5	4.7	3.6	4.6	5.5	3.4	3.5	10.7	1	0.55	-

4.6.2. Diseñar, programar y validar el software que implementa la heurística del Ahorro

Para este segundo paso se hizo uso de Microsoft VBA de Excel 2016, puesto que se toma la matriz anterior de distancias y se calcula los ahorros con la fórmula I, generando posteriormente la matriz de ahorros como se observa en la Tabla 7.

$$S_{ij} = C_{0i} + C_{j0} - C_{ij} \qquad \forall\, i \neq j \qquad \text{(I)}$$

Donde:

$$(i, j), \qquad son\ los\ clientes$$

$$0, \qquad es\ el\ depósito$$

$$C_{ij}, costo\ asociado\ al\ arco\ (i, j)$$

$$S_{ij}, ahorro\ asociado\ al\ arco\ (i, j)$$

Como se explicó en el capítulo de Herramientas, es muy sencillo conectar Excel con VBA, se debe compilar conjuntamente el código asociando celdas de una manera muy amigable.

Tabla 7

Matriz de ahorros S_{ij}

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Q	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
0 Q	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1 A	0	0	4.7	3.6	4.1	4.1	3	4.5	3.2	4.8	-2.5	6.1	6.7	5
2 B	0	2.9	0	0.6	1.3	3	1.2	1	2	2.3	2.5	3.9	4.5	3.5
3 C	0	3.1	1.2	0	6.74	2.6	3.5	4.1	3.5	4.4	-1.4	1.6	2.1	1.4
4 D	0	3	0.9	5.4	0	2.1	3.3	-0.5	3.2	3.6	-1.7	1.2	1.8	1.1
5 E	0	0.5	1.5	-0.5	0.2	0	2	0.6	1.2	1.95	2.1	1.3	1.6	1.2
6 F	0	1.7	0.2	0.7	1.2	2.9	0	0.4	3.2	1.7	2.3	1.2	1.8	0.8
7 G	0	4.4	2.3	5.3	5.3	3.4	2.9	0	3.4	6.7	-1.8	2.9	3.5	2.1
8 H	0	1.2	0.1	1.8	2.3	2.2	3	0.7	0	1.6	1.2	-4.441E-16	0.6	0.3
9 I	0	3.5	0.4	3.1	3.1	1.8	0.7	4.8	0.9	0	-4.1	-6.3	2	0.8
10 J	0	-4.9	2	-0.5	0.7	2.9	2	-4.1	2.1	1.5	0	2	1.6	1.5
11 K	0	6.1	5.15	1	1.2	2.8	1.9	1.6	2	-4.5	3.2	0	5.9	4.7
12 L	0	6	3.4	0.6	1.1	1.6	0.7	1.4	0.7	2.2	1.9	5.7	0	3.7
13 M	0	4.6	4.3	1	1.5	2.3	0.8	0.9	1.9	2.7	2.2	5.3	5.85	0

Seguidamente se explica a manera de ejemplo cómo se halló el primer ahorro y el último ahorro de la matriz de la Tabla 7.

- Para el arco 1-2:

  $$S_{ij} = C_{0i} + C_{j0} - C_{ij}$$

  $$i = 1, \qquad j = 2$$

  $$C_{0i} = C_{01} = 7.5$$

  $$C_{j0} = C_{20} = 2.6$$

  $$C_{ij} = C_{12} = 5.4$$

  $$S_{ij} = S_{12} = 7.5 + 2.6 - 5.4$$

  $$S_{ij} = S_{12} = 4.7$$

- Para el arco 13-12:

  $$S_{ij} = C_{0i} + C_{j0} - C_{ij}$$

  $$i = 13, \qquad j = 12$$

  $$C_{0i} = C_{013} = 2.9$$

$$C_{j0} = C_{120} = 3.5$$

$$C_{ij} = C_{1312} = 0.55$$

$$S_{ij} = S_{1312} = 2.9 + 3.5 - 0.55$$

$$S_{ij} = S_{1312} = 5.85$$

4.6.2.1. Rutas generadas por el algoritmo del Ahorro

1. Se ordenó de forma decreciente (de mayor a menor) los ahorros generados en la matriz anterior, estableciendo el ahorro respectivo al arco (i, j) correspondiente, como se aprecia en la Tabla 8. Para este paso se utilizó un algoritmo de ordenamiento muy similar al método Burbuja, pero con variación y se programó en Microsoft VBA de Excel 2016.

Tabla 8

Ahorros listados en orden decreciente

Ahorro	[i,	j]
6.74	3	4
6.7	7	9
6.7	1	12
6.1	11	1
6.1	1	11
6	12	1
5.9	11	12
5.85	13	12
5.7	12	11
5.4	4	3

Ahorro	[i,	j]
5.3	7	3
5.3	13	11
5.3	7	4
5.15	11	2
5	1	13
4.8	9	7
4.7	11	13
4.7	1	2
4.6	13	1
4.5	2	12
4.5	1	7
4.4	7	1
4.4	3	9
4.3	13	2
4.1	3	7
4.1	1	5
4.1	1	4
3.9	2	11
3.7	12	13
3.6	1	3
3.6	4	9

Ahorro	[i,	j]
3.5	9	1
3.5	7	12
3.5	3	8
3.5	3	6
3.5	2	13
3.4	7	5
3.4	12	2
3.4	7	8
3.3	4	6
3.2	11	10
3.2	6	8
3.2	4	8
3.2	1	8
3.1	9	3
3.1	3	1
3.1	9	4
3	8	6
3	4	1
3	2	5
3	1	6
2.9	10	5

Ahorro	[i,	j]
2.9	7	6
2.9	6	5
2.9	2	1
2.9	7	11
2.8	11	5
2.7	13	9
2.6	3	5
2.5	2	10
2.3	7	2
2.3	13	5
2.3	8	4
2.3	6	10
2.3	2	9
2.2	13	10
2.2	8	5
2.2	12	9
2.1	10	8
2.1	7	13
2.1	3	12
2.1	4	5
2.1	5	10

Ahorro	[i,	j]
2	10	2
2	11	8
2	10	6
2	9	12
2	5	6
2	2	8
2	10	11
1.95	5	9
1.9	13	8
1.9	11	6
1.9	12	10
1.8	8	3
1.8	6	12
1.8	9	5
1.8	4	12
1.7	6	1
1.7	6	9
1.6	11	7
1.6	5	12
1.6	12	5
1.6	10	12

Ahorro	[i,	j]
1.6	8	9
1.6	3	11
1.5	10	9
1.5	10	13
1.5	5	2
1.5	13	4
1.4	3	13
1.4	12	7
1.3	5	11
1.3	2	4
1.2	8	1
1.2	3	2
1.2	2	6
1.2	6	11
1.2	6	4
1.2	11	4
1.2	5	13
1.2	5	8
1.2	4	11
1.2	8	10
1.1	12	4

Ahorro	[i,	j]
1.1	4	13
1	13	3
1	11	3
1	2	7
0.9	13	7
0.9	4	2
0.8	13	6
0.8	6	13
0.8	9	13
0.7	12	6
0.7	10	4
0.7	9	6
0.7	8	7
0.7	6	3
0.7	12	8
0.6	12	3
0.6	5	7
0.6	2	3
0.6	8	12
0.5	5	1
0.4	9	2

Ahorro	[i,	j]
0.4	6	7
0.3	8	13
0.2	6	2
0.2	5	4
0.1	8	2

2. Solución inicial:

   Esta solución indica que los vehículos salen del depósito, se dirigen hacia todos los puntos de concentración y regresan al depósito, es decir utilizan un vehículo para cada cliente y emplean 13 buses, ver Tabla 9.

   Tabla 9

   Rutas iniciales

Rutas	Nodos	Km	% cap.
1	Q-A-Q	14.2	24%
2	Q-B-Q	5.5	24%
3	Q-C-Q	6.7	24%
4	Q-D-Q	6.6	24%
5	Q-E-Q	4.4	24%
6	Q-F-Q	4.3	24%
7	Q-G-Q	8.2	24%
8	Q-H-Q	3.9	24%
9	Q-I-Q	6.1	24%

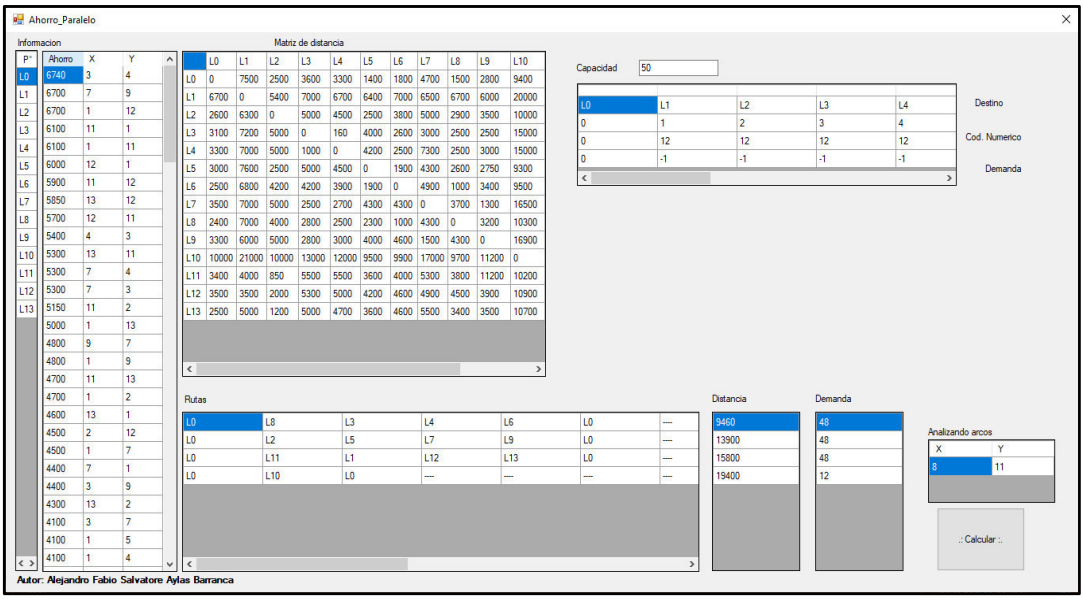
Rutas	Nodos	Km	% cap.
10	Q-J-Q	19.4	24%
11	Q-K-Q	6.8	24%
12	Q-L-Q	6.3	24%
13	Q-M-Q	5.4	24%
Total		97.8	

3. Solución del ahorro

Este paso fue programado en Visual Studio 2019. La metodología para escoger los caminos óptimos fue empezar a unir la ruta que tiene el par con mayor ahorro sea este (i, j), si el siguiente par de componentes tiene en sus índices (k, i) o (j, k) lo une a la primera ruta inicial, caso contrario sigue iterando hasta buscar la coincidencia en los índices de ese primer par o sigue buscando formar otras rutas con el siguiente componente de mayor ahorro, así sucesivamente hasta que la suma acumulada de las demandas de las rutas no exceda la capacidad del vehículo. En la Figura 12 se puede observar el desarrollo de la heurística.

Figura 12

Funcionamiento del programa del algoritmo del ahorro



Los ahorros están ordenados de mayor a menor, el mayor ahorro ocupa la posición $(i = 3, j = 4)$; inmediatamente el algoritmo encuentra la demanda de ambos clientes y evalúa si la suma supera la capacidad del vehículo, si no supera sigue iterando; como el vehículo tiene una capacidad de 50 policías y cada cliente demanda 12 policías la ruta sería la siguiente: $r = 0 - 3 - 4 - 0$, entonces se realiza la siguiente iteración y el componente con el siguiente mayor ahorro resulta $(i = 7, j = 9)$ como $i \neq 4$ y $j \neq 3$ no lo une a la primera ruta formada si no que genera otra ruta, continua con el siguiente componente y este es $(i = 1, j = 12)$ por lo que crea otra ruta y sigue con la iteración, el siguiente par es $(i = 11, j = 1)$ y como el componente $j = i$ del par anterior el algoritmo los une en una sola ruta siendo esta $r = 0 - 11 - 1 - 12 - 0$, como no supera la capacidad se sigue iterando, el siguiente es $(i = 1, j = 11)$ pero como uno de sus componentes ya está involucrado en una ruta que ya generó el algoritmo no lo va tomar en cuenta, de esa manera sigue rechazando hasta llegar al par $(i = 12, j = 13)$ y va unirlo a la ruta que generó anteriormente ya que $j = i$, por lo que la ruta final resulta $r = 0 - 11 - 1 - 12 - 13 - 0$, esta no excede la capacidad del vehículo.

Seguidamente el código va iterando buscando pares de ahorros hasta escoger a todos los clientes, teniendo en cuenta la capacidad del vehículo y que no se puede volver a elegir a los clientes que ya están seleccionados en las rutas creadas. El algoritmo está programado para que respete ese ahorro generado en el par (i, j) por lo que no se puede romper esa unión. Es importante precisar que la matriz de distancias que se genera es asimétrica por lo que una distancia y ahorro (i, j) no es lo mismo que (j, i).

En las tesis revisadas se encontró una variedad de criterios para escoger el par de componentes que se unen a las rutas con mayor ahorro, entre ellas la clásica versión paralela y versión secuencial (Olivera , 2004), por lo que se eligió la versión paralela, pero con un criterio extra autodenominado “componentes cruzadas” por mostrar mejores resultados en esta aplicación.

Las rutas que resultaron de la heurística se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

Cuadro resumen Heurística del Ahorro

Rutas	Nodos	Km	% cap.
1	Q-H-C-D-F-Q	9.46	96%
2	Q-B-E-G-I-Q	13.9	96%
3	Q-K-A-L-M-Q	15.8	96%
4	Q-J-Q	19.4	24%
Total		58.56	

4.6.2.2. Validación de la heurística programada

Con la finalidad de saber qué cantidad de porcentaje se desvía el programa creado de la heurística del ahorro con respecto al valor óptimo, se procedió a validar de la siguiente manera:

a) Se incorpora el problema de una librería de VRP con solución óptima al código programado.
b) Se analiza la desviación con respecto al valor óptimo, tomando como referencia lo escrito en la literatura por algunos autores.

A continuación, se detalla cada punto.

a) Se consideró el problema E-n13-k4 de la librería del Laboratorio de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro.
   - Autores: Dantzig et al, 1959; Eilon, Watson-Gandy and Christofides, 1971
   - Comentario: (Eilon et al, Min no of trucks: 4, Optimal value: 247)
   - Tipo: CVRP
   - Dimensión: 13 (12 clientes + 1 depósito)
   - Capacidad: 6000
   - Vehículos: 4

- Matriz de distancias

  9 14 21 23 22 25 32 36 38 42 50 52

  5 12 22 21 24 31 35 37 41 49 51

  7 17 16 23 26 30 36 36 44 46

  10 21 30 27 37 43 31 37 39

  19 28 25 35 41 29 31 29

  9 10 16 22 20 28 30

  7 11 13 17 25 27

  10 16 10 18 20

  6 6 14 16

  12 12 20

  8 10

  10

- Demanda de nodos

  1 0

  2 1200

  3 1700

  4 1500

  5 1400

  6 1700

  7 1400

  8 1200

  9 1900

  10 1800

  11 1600

  12 1700

  13 1100

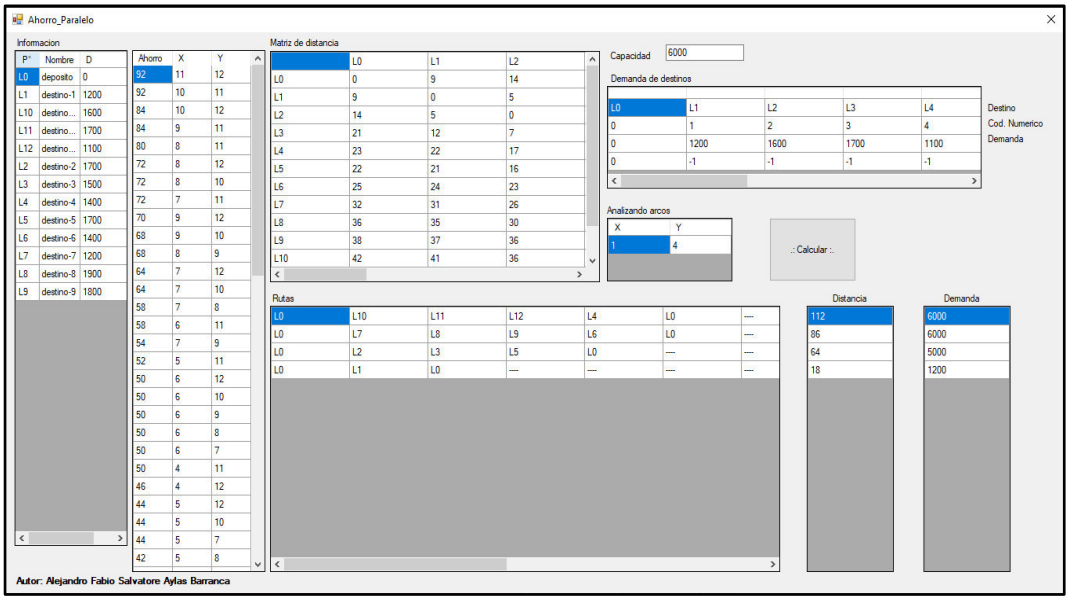
- Número de depósitos: 1
- Ruta 1: 1
- Ruta 2: 8 5 3
- Ruta 3: 9 12 10 6
- Ruta 4: 11 4 7 2
- Costo Óptimo: 247

Se introducen y se corren los datos antes mencionados al algoritmo programado como se evidencia en la Figura 13 y se obtiene el siguiente resultado:

- Ruta 1: 1
- Ruta 2: 10 11 12 4
- Ruta 3: 7 8 9 6
- Ruta 4: 2 3 5
- Costo: 280

Figura 13

Datos de librería en el programa algoritmo del ahorro



b) Con los datos de la heurística programada y del valor óptimo se procede a determinar la desviación del programa. En la literatura de VRP se tiene los siguientes autores, con respecto a Martí (2006) indica que el método de Clarke and Wright tiene una desviación del óptimo del 9.6%. Mientras que en otro artículo Hernández Ortiz (2016) sostiene que se debe obtener un porcentaje de desviación que esté en el rango de 8% y 10% para fijar la calidad de la heurística en relación al mejor resultado.

Se estableció la siguiente ecuación (A) con el fin de hallar el porcentaje de desviación con respecto al valor óptimo.

$$Error = \left|\frac{V_h - V_o}{V_o}\right| * 100 \qquad \text{(A)}$$

Dónde:

Error=porcentaje de desviación

V_h =valor heurístico

V_o =valor óptimo

El valor óptimo corresponde a 247 del ejemplo anterior y el valor heurístico es lo que resultó de correr el programa siendo este 280.

Se reemplazan los valores en la ecuación (A) y se obtiene lo siguiente:

$$Error = \left|\frac{280 - 247}{247}\right| * 100$$

$$Error = 13.36\%$$

El resultado de la desviación con respecto al óptimo, es de 13.36%, lo que indica que la heurística programada no alcanzó al valor óptimo, sin embargo, la desviación sobrepasa de un modo aceptable al óptimo. Esto podría mejorarse, en futuros trabajos, considerando otros criterios, por ejemplo cómo escoger el siguiente par de ahorros.

4.6.2.3. Análisis mediante un software libre: GRAFOS

GRAFOS, es un programa informático que no solo resuelve problemas de teoría de grafos si no que busca la libertad en el usuario para dibujar, modelar, resolver y analizar problemas de redes reales, como caminos, arboles, flujos y rutas; creado por el profesor Dr. Alejandro Rodríguez Villalobos de la Universidad Politécnica de Valencia, es un software que se puede descargar de la misma página del autor gratuitamente, con una interfaz muy amigable, por lo que es un programa descargado en su mayoría por estudiantes.

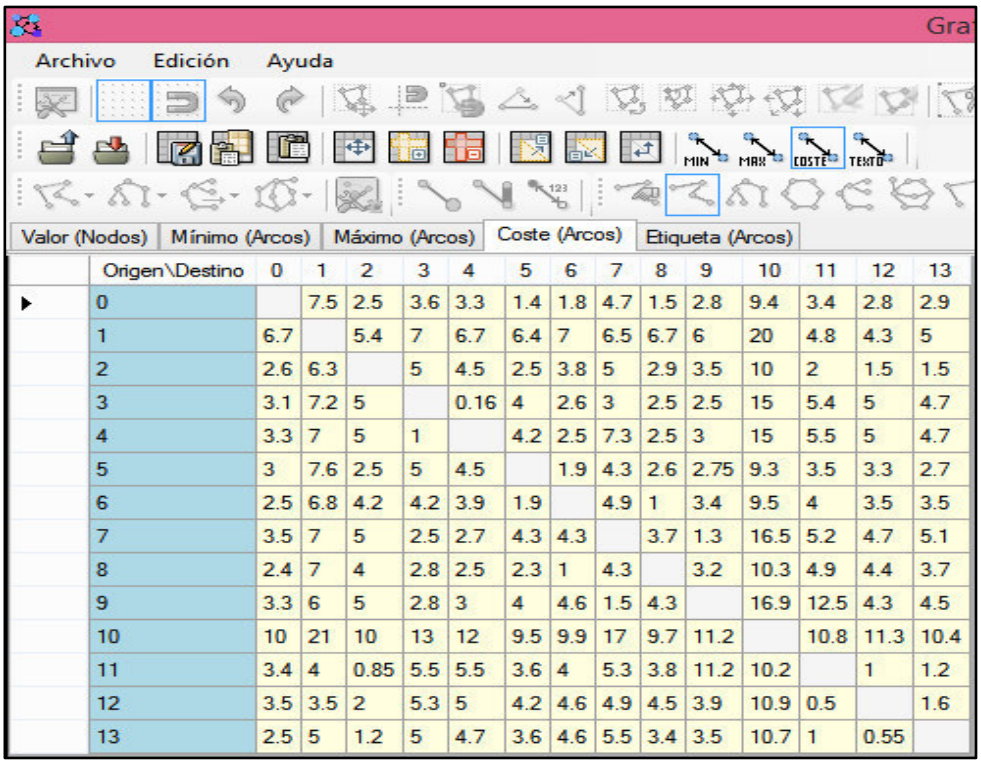
A continuación, se resuelve el problema planteado de esta tesis en el software GRAFOS versión V.1.3.5, con el fin de posteriormente analizar su resultado y tiempo de ejecución para compararlo con el valor final de la heurística programada.

Es necesario precisar que para resolver problemas de VRP, GRAFOS “cuenta con la ayuda de lp_solve; se trata de un solver de programación linear entera mixta de licencia libre (LGPL - GNU lesser general public license). Este solucionador resuelve modelos de programación lineal (mixta) puros, con variables enteras/binarias, …” (Rodríguez Villalobos, 2006)
Esto quiere decir que GRAFOS utiliza métodos exactos para solución de problemas de naturaleza combinatorios como el VRP.

En primer lugar, se introducen los datos en la Edición Tabla que es más accesible como se muestra en la Figura 14, para que luego se muestre inmediatamente en la Edición Gráfica, como la relación entre los clientes y sus respectivas distancias de uno a otro, ver Figura 15.

Figura 14

Tabla de distancias

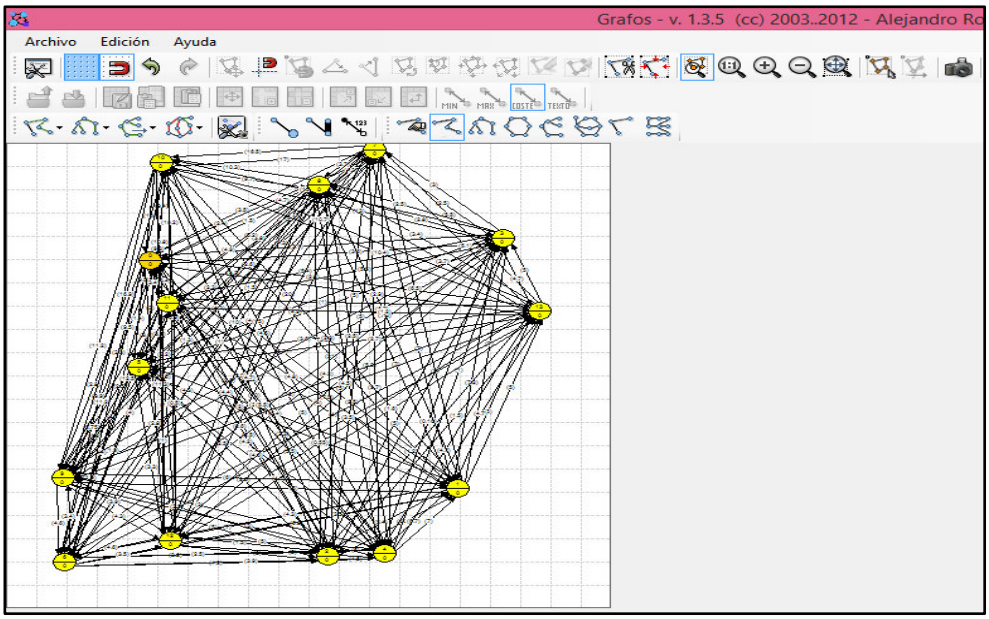


Origen\Destino	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0		7.5	2.5	3.6	3.3	1.4	1.8	4.7	1.5	2.8	9.4	3.4	2.8	2.9
1	6.7		5.4	7	6.7	6.4	7	6.5	6.7	6	20	4.8	4.3	5
2	2.6	6.3		5	4.5	2.5	3.8	5	2.9	3.5	10	2	1.5	1.5
3	3.1	7.2	5		0.16	4	2.6	3	2.5	2.5	15	5.4	5	4.7
4	3.3	7	5	1		4.2	2.5	7.3	2.5	3	15	5.5	5	4.7
5	3	7.6	2.5	5	4.5		1.9	4.3	2.6	2.75	9.3	3.5	3.3	2.7
6	2.5	6.8	4.2	4.2	3.9	1.9		4.9	1	3.4	9.5	4	3.5	3.5
7	3.5	7	5	2.5	2.7	4.3	4.3		3.7	1.3	16.5	5.2	4.7	5.1
8	2.4	7	4	2.8	2.5	2.3	1	4.3		3.2	10.3	4.9	4.4	3.7
9	3.3	6	5	2.8	3	4	4.6	1.5	4.3		16.9	12.5	4.3	4.5
10	10	21	10	13	12	9.5	9.9	17	9.7	11.2		10.8	11.3	10.4
11	3.4	4	0.85	5.5	5.5	3.6	4	5.3	3.8	11.2	10.2		1	1.2
12	3.5	3.5	2	5.3	5	4.2	4.6	4.9	4.5	3.9	10.9	0.5		1.6
13	2.5	5	1.2	5	4.7	3.6	4.6	5.5	3.4	3.5	10.7	1	0.55	

Nota. Datos elaborados en GRAFOS-V.1.3.5

Figura 15

Gráfica de nodos

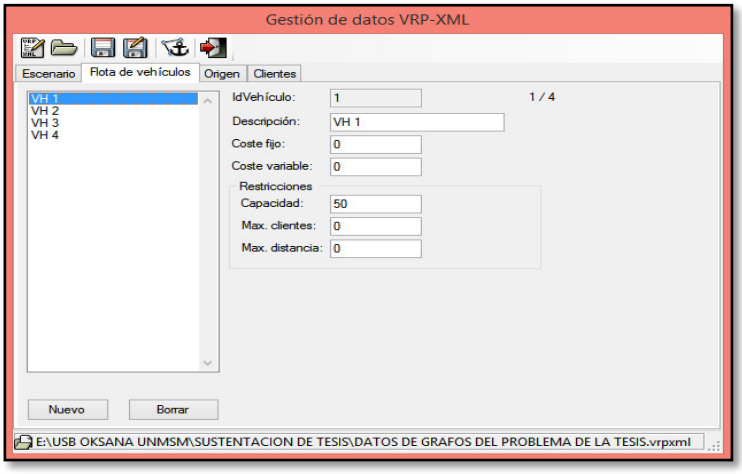


Nota. Datos elaborados en GRAFOS-V.1.3.5

Una vez introducido los datos se procede al *item* Gestión de Datos VRP-XML, en la Figura 16 se muestra la introducción de 4 vehículos que son de tipo bus, con capacidad para 50 policías, ese número de vehículos fue establecido ya que para el software es un dato de entrada obligatorio. El origen sigue siendo la USE, y los destinos son los 13 clientes antes mencionados.

Figura 16

Flota de vehículos

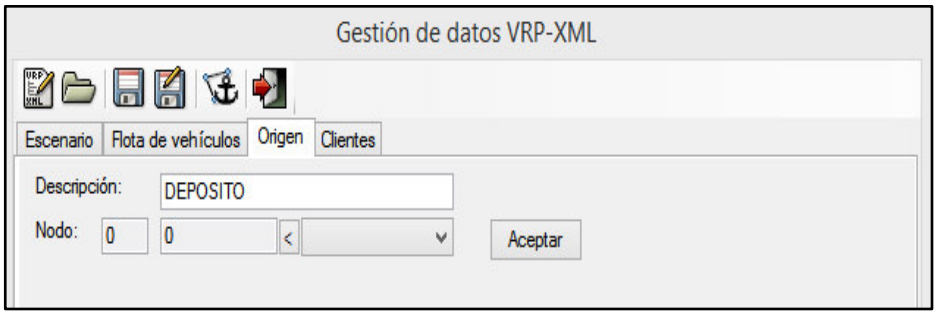


Nota. Datos elaborados en GRAFOS-V.1.3.5

Luego en la Figura 17 se inserta el nodo de origen y en el *item* de clientes de la Figura 18 se establece el número de clientes con sus demandas respectivas siendo 12 para este trabajo, luego siguiendo el orden en que se introducen los datos, el software asigna la cantidad de nodos.

Figura 17

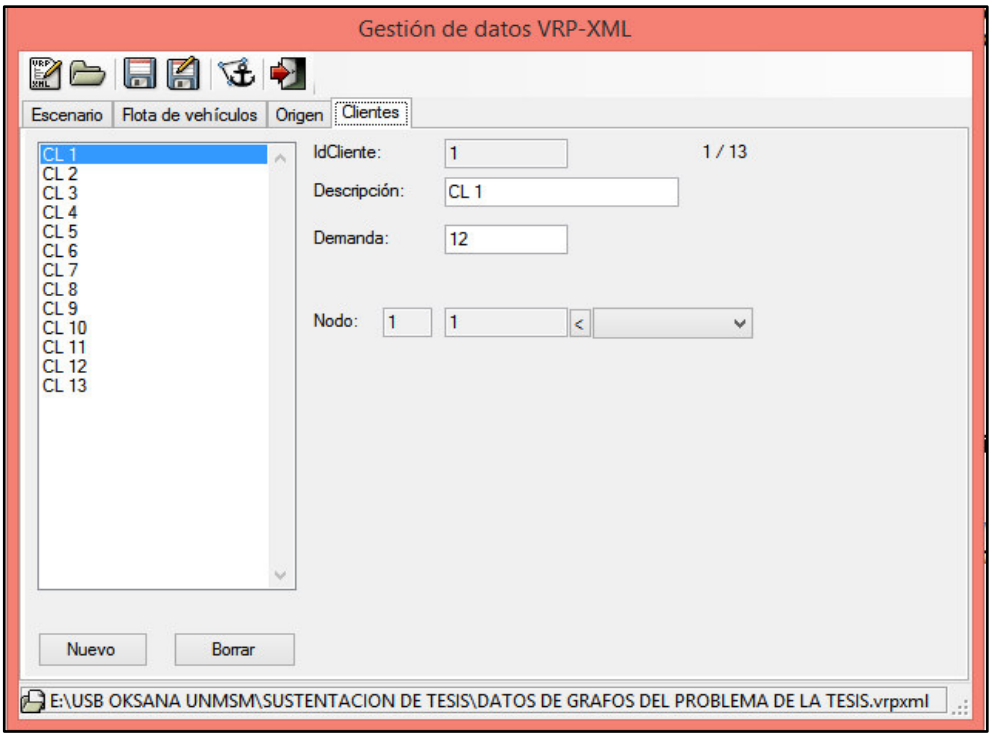
Declaración del nodo Origen



Nota. Datos elaborados en GRAFOS-V.1.3.5

Figura 18

Declaración de clientes



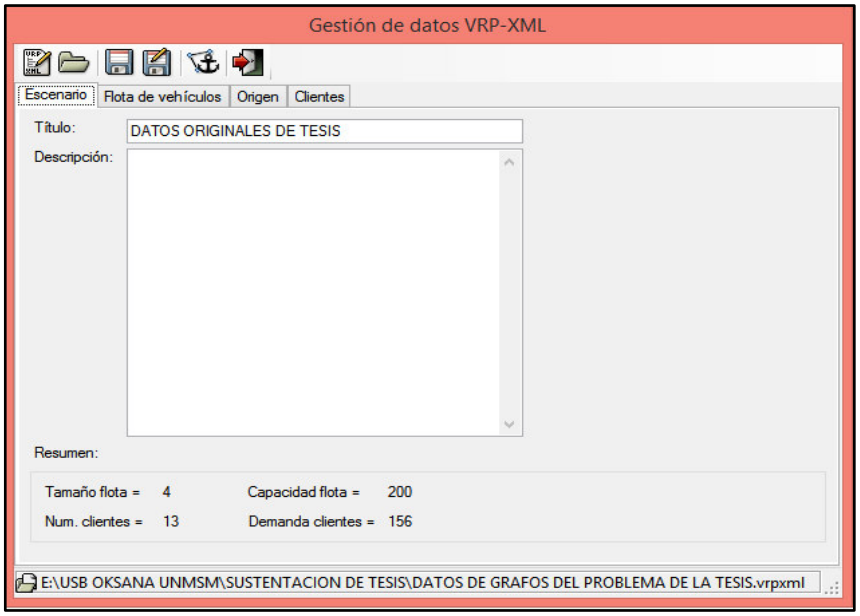
Nota. Datos elaborados en GRAFOS-V.1.3.5

En la Figura 19 se muestra el resumido de los datos de entrada del problema.

Durante el desarrollo para darle la solución al problema, GRAFOS analiza cada nodo y el número de iteraciones que emplea en los 36 767 segundos son 84 333 990 iteraciones, eso equivale a aproximadamente más de 10 horas de corrida del software, que tuvo que detenerse para ver el resultado proporcionado como se observa en la Figura 20.

Figura 19

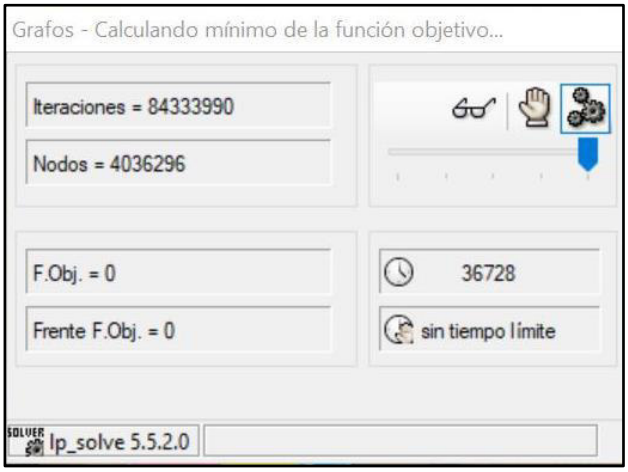
Datos de entrada



Nota. Datos elaborados en GRAFOS-V.1.3.5

Figura 20

Ventana de Resultado



Nota. Datos elaborados en GRAFOS-V.1.3.5

El análisis en GRAFOS proporciona los siguientes resultados:

DISTANCIA TOTAL MÍNIMA (COSTE O TIEMPO) - PROBLEMA DE RUTAS CON VEHÍCULOS CAPACITADOS (CVRP)

Tiempo de proceso = 36767 segundos

RUTA 1 :: IdVehículo 1: VH 1

Distancia = 14.55

(6.3) > 0, 12, 1
(4.3) > 1, 12
(2.6) > 2, 0
(0.85) > 11, 2
(0.5) > 12, 11

Servicio/Capacidad = Aprovechamiento (%): 48/50 = 96 %

(Demanda) Cliente > Ubicación:
(12) CL 1 > 1
(12) CL 2 > 2
(12) CL 11 > 11
(12) CL 12 > 12

RUTA 2 :: IdVehículo 2: VH 2

Distancia = 5

(1.5) > 0, 8
(2.5) > 6, 0
(1) > 8, 6

Servicio/Capacidad = Aprovechamiento (%): 24/50 = 48 %

(Demanda) Cliente > Ubicación:
(12) CL 6 > 6
(12) CL 8 > 8

RUTA 3 :: IdVehículo 4: VH 4

Distancia = 10.26

(2.8) > 0, 9

(0.16) > 3, 4

(3.3) > 4, 0

(2.5) > 7, 3

(1.5) > 9, 7

Servicio/Capacidad = Aprovechamiento (%): 48/50 = 96 %

(Demanda) Cliente > Ubicación:

(12) CL 3 > 3

(12) CL 4 > 4

(12) CL 7 > 7

(12) CL 9 > 9

RUTA 4 :: IdVehículo 3: VH 3

Distancia = 24.1

(9.4) > 0, 10

(2.7) > 5, 13

(9.5) > 10, 5

(2.5) > 13, 0

Servicio/Capacidad = Aprovechamiento (%): 36/50 = 72 %

(Demanda) Cliente > Ubicación:

(12) CL 5 > 5

(12) CL 10 > 10

(12) CL 13 > 13

Distancia total = 53.91 unidades

Resuelto con:

Grafos - v.1.3.5

(cc) 2003..2012 - Alejandro Rodríguez Villalobos

http://arodrigu.webs.upv.es/grafos

En la Tabla 11 se observan las rutas que se generaron con sus respectivas distancias y porcentajes de aprovechamiento del vehículo.

Tabla 11

Cuadro resumen Software GRAFOS

Rutas	Nodos	Km	% cap.
1	Q-A-L-K-B-Q	14.55	96%
2	Q-H-F-Q	5.00	48%
3	Q-I-G-C-D-Q	10.26	96%
4	Q-J-E-M-Q	24.10	72%
Total		53.91	

4.6.3. Mostrar ventajas sobre el método exacto

Para proceder a demostrar que el algoritmo del Ahorro programado tiene ventajas sobre el método exacto particularmente encontrado en el software GRAFOS, se comparan resultados, primero se muestra la distancia del ruteo que genera la USE 97.8 Km, que contrastada con la ruta propuesta de la heurística 58.56 Km significa un ahorro del 40.13% en distancia, por lo que resulta ser beneficioso para la entidad por todas las razones que se explican en el Capítulo 1.3 Justificación.

Además, por medio del análisis del resultado en GRAFOS, se genera una distancia total de recorrido de 53.91 Km, esta distancia mejora la solución de la Heurística del Ahorro, ver Tabla 12.

Tabla 12

Comparación de rutas obtenidas

Tipo de ruteo	Km	N° de rutas	Tiempo de ejecución (“)
Ruteo de la USE (empírico)	97.8	13	
Ruteo mediante la Heurística del Ahorro	58.56	4	10
Ruteo mediante GRAFOS-V.1.3.5	53.91	4	36767

Si bien es cierto que el resultado obtenido por GRAFOS es ligeramente mejor que el obtenido por el algoritmo programado en este trabajo. Se menciona que no siempre será factible utilizar este software GRAFOS, pues a medida que la cantidad de variables y parámetros aumente necesitará más tiempo de ejecución y memoria que no estará disponible.

Se resalta también que el resultado de la Heurística del Ahorro programada en el software Visual Basic después de 10 segundos, es aceptable respecto a la solución proporcionada después de 36767 segundos (10.21 horas) por el software GRAFOS, siendo la diferencia de distancia de un 8.6%, conforme se observa en la Tabla 12.

Cabe indicar que GRAFOS está suministrando un valor confiable como “mejor valor encontrado”, ya que se indicó anteriormente que usa librerías de métodos exactos en su código, por lo que promete dar el mejor valor.

El programa creado de la heurística del Ahorro se corrió en una computadora I5-1035G1 con 8GB de RAM y un disco HDD de 931.51 GB.
El tiempo que tarda en correr el algoritmo del Ahorro programado son 10 segundos en la laptop.

CAPITULO V – ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Resultados

A continuación, se analizan todos los resultados hallados:

a) Solución de la USE

- Se utilizó 13 vehículos para las 13 rutas que se generan, obteniendo una distancia total de 97.8 Km como figura en la Tabla 13.
- Cabe indicar que esta solución es la metodología de cómo trabajan los policías, por lo cual este es el resultado del ruteo empírico que realiza la USE, ver Figura 21.

Tabla 13

Resultado de ruteo empírico

Rutas	Nodos	Km
1	Q-A-Q	14.2
2	Q-B-Q	5.5
3	Q-C-Q	6.7
4	Q-D-Q	6.6
5	Q-E-Q	4.4
6	Q-F-Q	4.3
7	Q-G-Q	8.2
8	Q-H-Q	3.9
9	Q-I-Q	6.1
10	Q-J-Q	19.4
11	Q-K-Q	6.8
12	Q-L-Q	6.3
13	Q-M-Q	5.4
Suma Total		97.8

Figura 21

Ruteo empírico



Nota. Adaptada de Ruteo empírico, de Google Maps, 2022.

b) Solución del Algoritmo del Ahorro

- Se obtuvo un escenario dónde se cubre con la USE, a todos los clientes esto es: Hospitales y entidades del Sector Público, por lo que cumple con un principio fundamental del ruteo de vehículos.
- Resultó 4 rutas por lo tanto se debe emplear 4 vehículos para satisfacer los 13 puntos de concentración de multitudes de manifestantes del sector salud, ver Tabla 14, Figura 22 y Figura 23.
- Resultó un total de 58.56 km que es la distancia total que deben recorrer los vehículos para satisfacer a todos los puntos de concentración, cumpliendo con el tiempo de respuesta y con la mínima distancia a recorrer que se traduce posteriormente a costos.

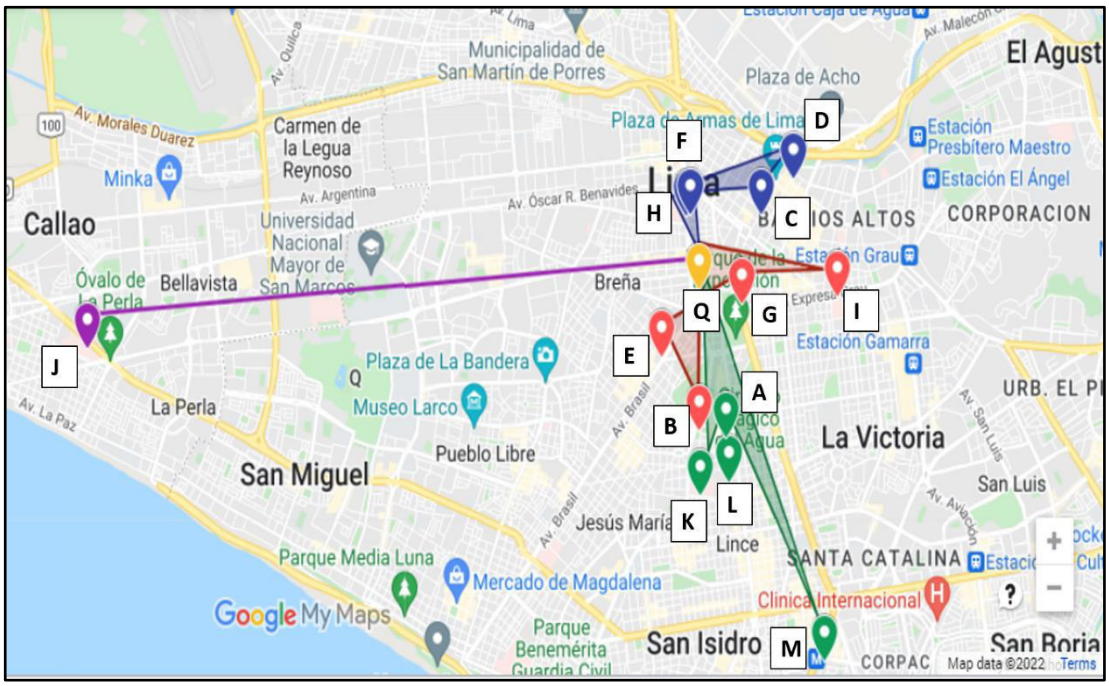
Tabla 14

Resultado de ruteo por la Heurística del Ahorro

Rutas	Nodos	Km
1	Q-H-C-D-F-Q	9.46
2	Q-B-E-G-I-Q	13.9
3	Q-K-A-L-M-Q	15.8
4	Q-J-Q	19.4
Suma total		58.56

Figura 22

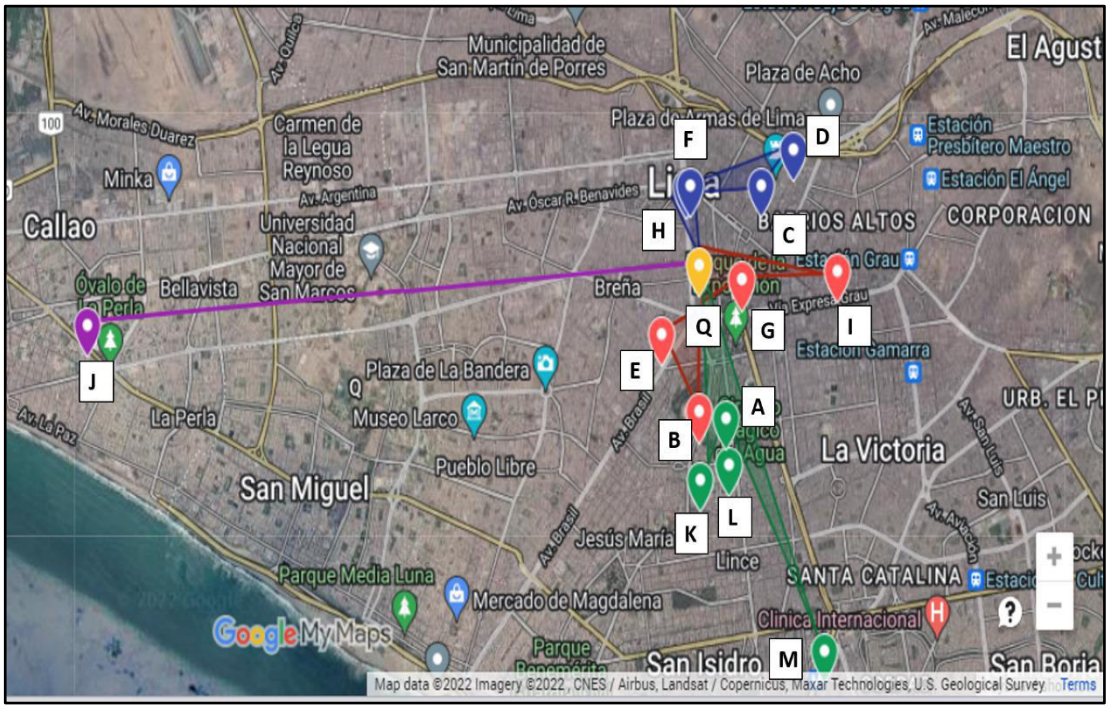
Ruteo mediante la heurística en mapa base



Nota. Adaptada de Ruteo mediante la heurística en mapa base, de Google Maps, 2022.

Figura 23

Ruteo mediante la heurística en mapa satelital



Nota. Adaptada de Ruteo mediante la heurística en mapa satelital, de Google Maps, 2022.

c) Solución por el software GRAFOS

- Se obtuvo un escenario dónde igualmente que la heurística se cubre con todos los clientes, pero al ser resuelto por métodos exactos brinda un mejor ruteo dentro del clúster que arma, algo en lo que se ve limitado el algoritmo programado.
- Resultó 4 rutas por lo tanto se debe emplear 4 vehículos para satisfacer los 13 puntos de concentración de multitudes de manifestantes, ver Tabla 15, Figura 24
- Resultó un total de 53.91 km, que es la distancia total mínima que deben recorrer los vehículos.

Tabla 15

Resultado de ruteo por software GRAFOS

Rutas	Nodos	Km
1	Q-A-L-K-B-Q	14.55
2	Q-H-F-Q	5.00
3	Q-I-G-C-D-Q	10.26
4	Q-J-E-M-Q	24.10
Total		53.91

Figura 24

Ruteo mediante GRAFOS-V.1.3.5



Nota. Adaptada de Ruteo mediante GRAFOS, de Google Maps, 2022.

CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se demostró lo que la teoría afirma, el modelo VRP es *NP-hard*, puesto que se comprobó con el software GRAFOS (que emplea programación lineal entera) un tiempo mayor de ejecución para calcular la solución más cercana a la óptima. Por esta razón fue necesario programar la heurística del Ahorro.

- Se determinó que la heurística del Ahorro permite solucionar de manera sencilla el problema del Ruteo de Vehículos, dando una solución factible, cumpliendo con el rango de desviación cercano al porcentaje promedio con respecto al resultado óptimo que varios autores afirman.

- Se concluyó que el programa de ruteo programado resuelto mediante la Algoritmo del Ahorro, reduce las distancias en Km a un 40% de las distancias iniciales y actuales que presenta la USE, por lo que se presenta como una gran propuesta para la institución.

- Se minimizó el uso de vehículos de 13 buses a 4 buses de policías.

- Se cumplió con el tiempo de respuesta que la USE establece como límite; ya que la Heurística del Ahorro forma los clústeres con el mayor ahorro posible, es decir la mínima distancia de un lugar a otro.

- Se deduce que al reducirse los vehículos y las distancias entre los clientes se reduce la contaminación ambiental, como por ejemplo emisiones de CO_2.

- Se concluye que la casuística expuesta en esta tesis es distinta a otras investigaciones del campo de ruteo de vehículos y optimización combinatoria, por tener un marco social y de servicio, no obstante, aporta a estas y las complementa.

6.2. Recomendaciones y/o trabajos futuros

- Se propone a la USE emplear el trabajo propuesto en la tesis cuando se presente el escenario crítico en Lima Metropolitana.

- Desarrollar e implementar un programa de ruteo de vehículos para más casuísticas de manifestaciones en los diferentes sectores del país, y que este ayude a la PNP y USE a tomar mejores decisiones y optimizar recursos.

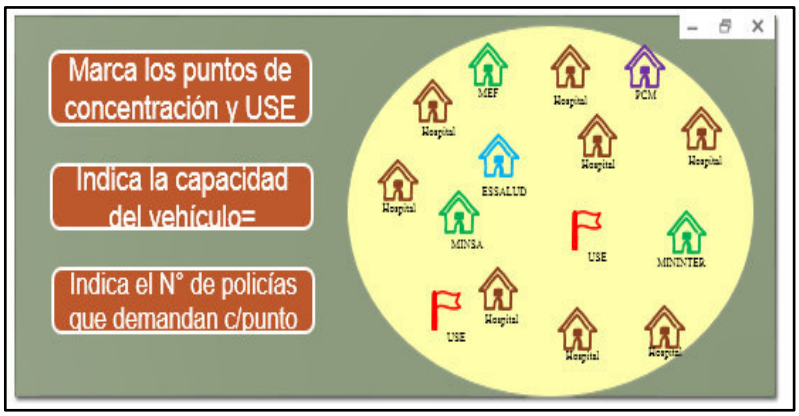
- Adaptar la realidad del problema, como por ejemplo incluir ventanas de tiempo y variables de tráfico en tiempo real, principalmente para casos donde el tiempo sea una constante crítica y principal de optimizar.

- Emplear flota de vehículos heterogénea, como otro ejemplo, donde sea necesario utilizar la capacidad total de los vehículos que porta la Policía Nacional del Perú, como buses, carros porta tropas, motos lineales.

- Diseñar una interfaz gráfica de fácil acceso y uso, para que el personal de la USE pueda emplearlo sin inconvenientes. El diseño debe ser dinámico y ágil de usar, además debe contemplar escenarios de manifestaciones de todos los sectores y múltiples casuísticas críticas, por lo tanto, un programa completo. La interfaz tendría el siguiente aspecto como se aprecia en la Figura 25.

Figura 25

Interfaz referencial



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Benavente Sotelo, R. A. (2016). *Plan de ruteo para la distribución de ayuda humanitaria no alimentaria ante un terremoto de gran magnitud en Lima metropolitana y Callao.* Tesis de licenciatura, PUCP, Facultad de Ciencias e Ingenería , Lima.

Carlos Basombrio Iglesias . (18 de Diciembre de 2016). Decreto Legislativo N°1267, Ley de la Policía Nacional del Perú. *Diario Oficial del Bicentenario, El Peruano*, págs. 606853-606862.

Castañeda Jimenez, J., & Cardona Arias, J. (2014). *Implementación del método del ahorro para resolver el VRP aplicado al diseño de una red de logística inversa para la recolección de aceite vehicular usado generado en los puntos de acopio ubicados en Pereira.* (Tesis de licenciatura), Universidad Tecnológica De Pereira, Facultad de Ingeniería Industrial , Pereira. Obtenido de http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/4395/6587882C346.pdf?sequence=1

Christofides, & Eilon. (1969). *CVRPLIB*. Obtenido de Capacitated Vehicle Routing Problem Library: http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/index.php/en/

Crnel Zanabria Angulo, V. J. (Enero de 2017). Cómo funciona la logística en la USE-PNP. (O. M. Ricra Tambra, Entrevistador) Región Policial de Lima.

Glover , F. W. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research, 13*(5), 533-349.

Hernández Ortiz, Y. (2016). *Diseño de un sistema de ruteo de vehículos con múltiples depósitos en empresa de transporte de carga por carretera.* (Tesis de Maestría), Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingenería, Bogotá. Obtenido de http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3600/1/Hern%C3%A1ndezOrtizYimyAlexander2016.pdf

Jaramillo Posada, J. R. (2012). Búsqueda tabú para el ruteo de vehículos. *Revista Científica de Ingeniería Industrial*, 29-43. Obtenido de http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing30Busqueda/$file/02-ingenieria30-produccion-JARAMILLO.pdf

Maguiña Agurto, L. L. (2016). *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.* UNMSM, Facultad de Ingenería de sistemas e Informática, Lima.

Marti, R. (2003). *Rafael Marti (Universidad de Valencia)*. Obtenido de Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria: https://www.uv.es/rmarti/paper/docs/heur1.pdf

Olivera , A. (2004). Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos. *Reportes Técnicos - Instituto de Computación*.

Policía Nacional del Perú. (2019). *Portal de la PNP*. Obtenido de https://www.policia.gob.pe/home/Nosotros

Riojas Cañari, A. C. (2005). *Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N –reinas.* (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional Mayor de San Marcos , Facultad de Ciencias Matemáticas , Lima.

Rodríguez Villalobos, A. (2006). *Grafos: herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos.* X Congreso de Ingeniería de Organización, Valencia.

Sánchez Hernández, F. (2015). *Aplicación del Modelo Vrp (Vehicle Routing Problem) para la optimización de una red de distribución.* (Tesis de licenciatura) , Universidad Nacional Autónoma De México, Facultad de Ingenería . Obtenido de http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/7969

Taha, H. A. (2012). *Ivestigación de Operaciones.* Mexico: Pearson .

Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem.* Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM).

ANEXO

Anexo 1

PROTOCOLO DE ENTREVISTA

1. Con respecto al presupuesto que se brinda al Ministerio del Interior y a la Región Policial de Lima ¿Qué aspectos se priorizan, armamento, logística o capacitación?

2. ¿Cómo se llama el área donde ven la logística de transporte y operaciones, significan lo mismo que dice en la pág. web?

*Para el capítulo DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA, ¿Se puede sacar información de la página de REGPOL Lima, es confiable? ¿O hay otra?

3. ¿Cuántas USE funcionan actualmente? Se mantiene la misma división
    - DEPCODIS NORTE
    - DEPCODIS SUR
    - DEPCODIS ESTE
    - DEPCODIS CENTRO
    - DELPOCAN
    - DELPOMON POTAO
    - DELPOMON TACALA

    ¿Cuál de ellas utiliza efectivos en vehículos?
    *siguen con la misma dirección, respaldar con la otra separata

4. ¿Les interesa la simultaneidad?
5. ¿Con cuántos días como mínimo se debe saber que hay una manifestación de gran envergadura?
6. ¿Cuándo la manifestación se da en el centro (plazas principales), la USE que traslada efectivos es la de Alfonso Ugarte?
7. ¿Cómo asignan a los policías una vez trasladados? ¿Qué cantidad de policías van bajando del vehículo? ¿Es proporcional la cantidad de policías que asignan a la cantidad de manifestantes o depende de su comportamiento o al colectivo que pertenecen?
8. ¿Los lugares de concentración más comunes / pre concentraciones? ¿Cuántos efectivos demandan cada grupo de manifestantes?
9. ¿Qué volumen de personas se espera, llegan a saber eso, como lo estiman?
10. ¿Utilizan los 4 tipos de transporte que tienen? ¿Cómo utilizan las motos?
11. Datos históricos: Marcha de los docentes del 15/06 al 02/09 del 2017
    a) ¿Cuáles fueron los puntos de concentración?
    b) ¿Cuántas USES se utilizaron?
    c) ¿Cuántos efectivos se trasladaron?
    d) ¿Costo aproximado de logística y transporte?