

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que los autores han autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

**Algoritmo memético para la localización de albergues y rutas de distribución de recursos
humanitarios para el post-desastre en la ciudad de Bucaramanga**

Andrea Alejandra Simanca Amaris, Ferney Mauricio Medina Cárdenas

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial

Director

Msc. Karin Julieth Aguilar Imitola

Universidad Santo Tomas, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería industrial

2021

Contenido

Introducción	11
1. Planteamiento del Problema	13
2. Justificación	15
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo general	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. Marco teórico.....	17
4.1 Optimización combinatoria	17
4.2 Modelo matemático.....	17
4.3 Complejidad computacional.....	17
4.4 Problema P	18
4.5 Problema NP	18
4.5.1 NP-completos.....	18
4.5.2 NP-Hard	19
4.6 Problema de optimización combinatoria.....	19
4.7 Problema de ruteo de vehículos - VRP	19
4.8 Problema de localización de instalaciones - FLP.....	20
4.9 Problema de localización y ruteo - LRP.....	21
4.10 Métodos de solución de la optimización combinatoria.....	22
4.10.1 Métodos Exactos.....	23
4.10.2 Métodos Heurísticos	23
4.10.3 Métodos Metaheurísticos	23

4.10.4	Métodos evolutivos.....	24
4.11	Algoritmo genético.....	25
4.12	Operadores genéticos	26
4.13	Algoritmo memético	26
4.14	Logística humanitaria.....	26
4.15	Desastre	28
5.	Estado del arte.....	29
6.	Modelo matemático	32
6.1	Supuestos.....	33
6.2	Índices	33
6.3	Conjuntos	34
6.4	Parámetros.....	34
6.5	Variables de decisión	34
6.6	Función objetivo.....	34
7.	Diseño Del Algoritmo.....	36
7.1	Población Inicial.....	38
7.2	Heurística del vecino más cercano (Nearest Neighbor)	39
7.3	Operadores Genéticos	42
7.3.1	Operador de selección.....	42
7.3.2	Operador de cruce	46
7.3.3	Operador de mutación.....	46
7.4	Operador de mejora (memético)	47
8.	Caso de estudio	50

8.1	Cálculo de la demanda	54
9.	Resultados	56
10.	Conclusiones	73
11.	Recomendaciones	75
	Referencias.....	76

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Demanda de los albergues</i>	40
Tabla 2. <i>Matriz de tiempos</i>	40
Tabla 3. <i>Intervalos de los individuos.</i>	43
Tabla 4. <i>Selección de individuos</i>	44
Tabla 5. <i>Niveles de afectación de un sismo.</i>	50
Tabla 6. <i>Zonas afectadas por nivel de intensidad de Mercalli</i>	55
Tabla 7. <i>Cantidad de habitantes por comuna en las zonas afectadas.</i>	55
Tabla 8. <i>Escenario de intensidad VII (A. Genético)</i>	56
Tabla 9. <i>Escenario de intensidad VII (A. Memético)</i>	57
Tabla 10. <i>Rutas iteración 1</i>	59
Tabla 11. <i>Rutas iteración 2.</i>	60
Tabla 12. <i>Rutas iteración 3.</i>	61
Tabla 13. <i>Rutas iteración 4.</i>	62
Tabla 14. <i>Rutas iteración 5.</i>	63
Tabla 15. <i>Rutas iteración 6.</i>	64
Tabla 16. <i>Rutas iteración 7.</i>	65
Tabla 17. <i>Rutas iteración 8.</i>	66
Tabla 18. <i>Ruta iteración 9.</i>	67
Tabla 19. <i>Rutas iteración 10.</i>	68
Tabla 20. <i>Ruta recorrido vehículo 1</i>	69
Tabla 21. <i>Ruta recorrido vehículo 2.</i>	71
Tabla 22. <i>Número de albergues habilitados en cada iteración.</i>	73

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Fases de un algoritmo genético.</i>	25
Figura 2. <i>Diagrama de flujo Algoritmo Memético</i>	37
Figura 3. <i>Habilitación de albergues</i>	38
Figura 4. <i>Red de transporte – vecino más cercano.</i>	39
Figura 5. <i>Diseño de la ruta</i>	41
Figura 6. <i>Albergues asignados por vehículo.</i>	42
Figura 7. <i>Operador de selección por ruleta.</i>	43
Figura 8. <i>Ruleta de individuos (padres).</i>	44
Figura 9. <i>Operación de cruce en dos puntos.</i>	46
Figura 10. <i>Operador de mutación por intercambio.</i>	47
Figura 11. <i>Cromosomas hijo 1 – hijo 1 mutado.</i>	47
Figura 12. <i>Identificación de la ruta con mayor tiempo.</i>	48
Figura 13. <i>Identificación y exclusión del albergue más lejano de la ruta.</i>	48
Figura 14. <i>Identificar la posición de incorporar el albergue en la nueva ruta.</i>	49
Figura 15. <i>Inclusión del albergue en la nueva ruta.</i>	50
Figura 16. <i>Comunas de Bucaramanga.</i>	52
Figura 17. <i>Zonificación geomórfica de Bucaramanga.</i>	53
Figura 18. <i>Albergues ubicados en la ciudad de Bucaramanga.</i>	54
Figura 19. <i>Tiempo total algoritmo genético por iteraciones.</i>	57
Figura 20. <i>Tiempo total algoritmo memético por iteraciones.</i>	58
Figura 21. <i>Primera parte ruta en mapa del vehículo 1 desde el deposito hasta el albergue UIS.</i>	70

Figura 22. Segunda parte, ruta en mapa del vehículo 1 desde la UIS hasta terminar el recorrido.

..... 70

Figura 23. Primera parte ruta en mapa del vehículo 2, desde el deposito hasta Nuestra Sra. del

Pilar sede E..... 72

Figura 24. Segunda parte, ruta en mapa del vehículo 1, desde Nuestra Sra. del Pilar Sede E hasta

terminar el recorrido. 72

Resumen

El presente proyecto de investigación aborda el problema de localización-ruteo (LRP) para la distribución de recursos humanitarios en un escenario post-desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga. El objetivo del problema es localizar albergues que se encuentren en óptimas condiciones para habilitarlos y seguido diseñar las rutas óptimas que permitan satisfacer la demanda de kits que requieran los habitantes albergados. Para la solución del problema se elabora un algoritmo memético, el cual combina operadores genéticos con un operador de búsqueda local, este algoritmo memético es adaptado a un modelo matemático que tiene como objetivo minimizar los tiempos de entrega de los recursos humanitarios (kits).

El algoritmo memético fue programado por medio del lenguaje de programación Python y ejecutado a través del software Pycharm.

Se evalúa el caso de estudio propuesto del escenario sísmico de intensidad VII según la escala de Mercalli, determinando los respectivos albergues a habilitar y sus respectivas rutas, teniendo en cuenta las demandas requeridas y la capacidad del depósito y los vehículos.

Palabras clave: LRP, algoritmo memético, localización, ruteo, albergues.

Abstract

This research project addresses the location-routing problem (LRP) for the distribution of humanitarian resources in a post-seismic disaster scenario in the city of Bucaramanga. The objective of the problem is to locate shelters that are in optimal conditions to enable them and then to design the optimal routes that allow meeting the demand for kits that the sheltered inhabitants require. To solve the problem, a memetic algorithm is developed, which combines genetic operators with a local search operator, this memetic algorithm is adapted to a mathematical model that aims to minimize delivery times for humanitarian resources (kits).

The memetic algorithm was programmed through the Python programming language and executed through Pycharm software.

The proposed case study of the intensity 7 seismic scenario is evaluated according to the Mercalli scale, determining the respective shelters to be set up and their respective routes, considering the required demands and the capacity of the tank and vehicles.

Key words: LRP, memetic algorithm, location, routing, shelters.

Introducción

En la última década el mundo se ha visto impactado de forma significativa a casusa de terremotos, causando millones de pérdidas humanas y graves daños materiales; estas actividades sísmicas comúnmente son producidas por disturbios tectónicos o volcánicos, estas actividades sísmicas también se nombran comúnmente como sismo, temblor y terremotos, esto dependiendo del nivel de intensidad con el que se presente, yendo de menor a mayor intensidad.

Colombia se encuentra en una zona geográfica particular, ya que se encuentra ubicada en el cinturón de fuego del pacífico, una zona sísmica activa la cual genera fallas geológicas. En Santander podemos encontrar una de las zonas más activas, la cual es denominada El Nido Sísmico de Bucaramanga, la cual es la segunda zona de mayor sismicidad intermedia en el mundo, aunque la intensidad de los sismos es pequeña, esto no deja de representar un malestar para los ciudadanos y tampoco es garantía de que un futuro se presente un sismo de mayor intensidad; por lo tanto el gobierno ha diseñado el Plan Municipal de Gestión del riesgo de Desastre, PMGRD de Bucaramanga; este PMGRD indica cómo se debe gestionar ante, durante y después de presentarse un fenómeno sísmico, sin embargo, su diseño se basa en un modelo sistemático que no tiene en cuenta variables que cambian constantemente, como por ejemplo, el aumento progresivo de la población Bumanguesa.

En vista de la problemática anterior, se busca contribuir al enriquecimiento de este PMGRD y así ayudar a la toma de decisiones en un escenario post-desastre; para esto se plantea un modelo matemático de optimización combinatoria (combina problemas de localización y problemas de ruteo), cuyo objetivo es habilitar los albergues óptimos y minimizar los tiempos de distribución de los recursos humanitarios (kits).

Para dar solución al problema matemático es necesario adaptar a este un algoritmo, pero debido a la complejidad y el gran número de variables que influyen en este, se debe utilizar un algoritmo de mayor nivel como los son los algoritmos NP-Hard. En este tipo de algoritmos podemos encontrar los algoritmos meméticos, los cuales se componen de un algoritmo genético y un operador de mejora.

El algoritmo genético simula tal como lo dice su nombre a la genética, por lo tanto, se compone de una población inicial que se llaman coloquialmente padres y estos serán cruzados y posteriormente modificados para así tener una población nueva que se llamarán hijos, la cual sería la población final.

El operador de mejora utilizado en este proyecto de investigación es del tipo de búsqueda local, más específicamente, la heurística llamada El Vecino Más Cercano; como su nombre lo indica, su función es buscar los individuos más cercanos entre sí para crear una red con estos.

Una vez obtenidos los resultados se comparan y se concluye sobre estos y los posibles aportes al PMGRD de Bucaramanga.

1. Planteamiento del Problema

La exposición a las amenazas por desastres ya sean naturales o de origen antropogénico son inminentes y más en un país en vía de desarrollo como lo es Colombia donde sus exigencias geográficas son complejas y su infraestructura no se encuentra condicionada para amortiguar dichas amenazas que garanticen la seguridad de la población; a esto se suma la falta de conocimiento y capacitación que se tiene para prevenir y/o saber cómo actuar ante una emergencia o desastre, los cuales causan pérdidas lamentables de vidas, de infraestructuras y medios.

Actualmente el 86% de la población colombiana se localiza en zonas de amenaza sísmica alta y media. El 44% del territorio colombiano se encuentra expuesto a amenaza sísmica alta e intermedia, principalmente en las regiones Pacífica y Andina, lo cual significa que 960 municipios, entre ellos los de mayor población, están expuestos. A nivel municipal, Cali representa la mayor población expuesta a amenaza sísmica alta, seguido por otras capitales como Cúcuta, Bucaramanga, Pereira, Villavicencio, Pasto y Manizales. Los municipios con más concentración de riesgo relativo, desde el punto de vista económico, respecto al PIB y por exposición a la amenaza sísmica, corresponden a Cali, Bogotá, Villavicencio, Medellín y Bucaramanga. [1]

La ciudad de Bucaramanga fue construida sobre un abanico aluvial, esto ha determinado la dinámica de crecimiento de la ciudad y la búsqueda de espacios estables que permitan la construcción de la infraestructura propia para atender las necesidades de toda una sociedad urbana [2]. De acuerdo con las tasas anuales intercensales, a mitad del siglo XX la ciudad mostraba una tasa de 6,2%, que luego redujo a 3,2% en los años setenta y de acuerdo con las proyecciones de población estaría creciendo desde 1993 a una tasa del 1,7% [3] contando hoy (2019) con una población equivalente a 528 mil habitantes. En vista del fuerte crecimiento poblacional que ha tenido Bucaramanga, los riesgos de la población a estar expuestos han aumentado debido a

diversos factores tales como por ejemplo el asentamiento de barrios de carácter informal en zonas de alto riesgo de desastre natural, entre otros.

Como medida de contingencia el gobierno ha diseñado el Plan Municipal de Gestión del riesgo de Desastre, PMGRD de Bucaramanga en el cual se priorizan e identifican los posibles escenarios de riesgos como lo es el de riesgo por sismo, riesgo por erosión y remoción en masa, y riesgo por inundación [4]. La Gestión de Riesgo de Desastres cuenta con un Sistema Logístico de Emergencias de la Unidad Nacional que se encuentra compuesto por una serie de fases: Gestión de suministros, sistema de control de suministros, almacenamiento, y distribución. [5]

Sin embargo, el aumento progresivo de la población en Bucaramanga genera un sin fin de variables que no se pueden trabajar con un modelo sistemático como lo es el planteado en el PMGRD, dejando el Plan de Gestión de Riesgos parcialmente desarrollado. En un escenario post desastre lo ideal es dar seguimiento a la logística humanitaria, donde se busca localizar de manera oportuna los albergues habilitados para que las personas se instalen allí de manera temporal y posteriormente realizar la distribución y entrega de suministros necesarios para la supervivencia de estos; como ya se ha mencionado el PMGRD vigente en la ciudad de Bucaramanga no permite atender en su totalidad un escenario de desastre, lo cual genera vacíos que nos permiten plantear la siguiente problemática: ¿dónde se deben localizar los albergues y cuáles son las rutas más adecuadas para distribuir los recursos?

El enfoque del presente proyecto busca dar respuesta a la pregunta problema propuesta a través de un problema de localización y ruteo o también llamado LRP (por sus siglas en inglés). Este modelo permite reunir las dos variables (localización y ruteo) planteadas en la pregunta problema y busca hallar la solución óptima de este. Debido al gran número de variables y restricciones que conlleva dar solución al modelo LRP en un escenario post desastre en

Bucaramanga, no se puede trabajar con métodos exactos; debido a que el problema planteado es de tipo NP-hard (de mayor complejidad), esta clase se describe como aquella que contiene a los problemas de decisión que son como mínimo tan difíciles como un problema de NP (tiempo polinomial no determinista); por consiguiente para dar solución al problema planteado se requiere de algoritmos de mayor complejidad, como lo son los algoritmos heurísticos. Entre estos se encuentra el algoritmo genético el cual trabaja con problemas de optimización combinatoria, como lo es el LRP, por consiguiente, se considera adecuado para desarrollar el problema y dar solución satisfactoria.

2. Justificación

El aumento progresivo de la población Bumanguesa y la inminente exposición a desastres conllevan al desarrollo de una gestión del riesgo de desastre, este se puede encontrar en el PMGRD, sin embargo, este plantea un modelo sistemático que no es resulta muy viable debido al cambio constante en las variables implicadas en un fenómeno natural como el sísmico; por consiguiente este carencia resulta un estímulo para la comunidad académica a participar en el desarrollo de actividades que contribuyan como posible solución a los problemas generados en el entorno; por lo tanto, es crucial poder configurar un sistema de respuesta eficiente para proporcionar los servicios requeridos de una manera adecuada cuando sea necesario.

Para abordar este proyecto inicialmente se realiza la revisión de la literatura para poder contar con un conocimiento más detallado sobre la temática a trabajar, luego de esto se da inicio al planteamiento del problema LRP donde se combinan las dos problemáticas a abordar, localización y ruteo. Continuando con el hilo de la investigación se prosigue a adaptar un algoritmo memético al modelo matemático anteriormente planteado; seguido de esto se investiga sobre la

literatura de este algoritmo memético. Una vez investigado el algoritmo se procede a ejecutarlo en un escenario de post desastre hipotético en la ciudad de Bucaramanga. Los resultados obtenidos del proyecto de investigación se documentan en un artículo de carácter publicable.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Adaptar un algoritmo memético para la localización de albergues y rutas de distribución de recursos humanitarios en un escenario post-desastre en la ciudad de Bucaramanga.

3.2 Objetivos específicos

- Revisar la literatura acerca de problemas de localización-ruteo (LRP) y su aplicación en la gestión de desastres.
- Formular un modelo matemático para el problema de localización de albergues y rutas de distribución de recursos humanitarios en un escenario post-desastre en la ciudad de Bucaramanga.
- Adaptar el algoritmo memético para solucionar el modelo matemático planteado.
- Ejecutar un escenario de prueba en un escenario post-desastre en la ciudad de Bucaramanga.
- Documentar los resultados del proyecto de investigación mediante un artículo de carácter publicable.

4. Marco teórico

4.1 Optimización combinatoria

Es un problema de optimización en el cual el espacio de soluciones posibles es discreto. Esta es una rama de la optimización de las matemáticas aplicadas fuertemente relacionada con la investigación operativa, la teoría algorítmica y la teoría de la complejidad computacional. Es decir, el óptimo se podría alcanzar mediante la enumeración de todas las soluciones, aunque esta posibilidad está restringida a tamaños muy pequeños de problema. Los algoritmos de optimización combinatoria resuelven problemas que se creen difíciles en general, lo logran por la vía de reducir el tamaño efectivo del espacio a buscar y explorando de modo eficiente dicho espacio [6].

4.2 Modelo matemático

Un modelo matemático es un esquema teórico, que generalmente se realiza en forma matemática. Representa un sistema o una realidad compleja simplificada. Este es elaborado para facilitar su comprensión y su posterior estudio, ya que el objetivo es abordar el problema específico el cual ya fue modelado [7].

4.3 Complejidad computacional

La Teoría de la Complejidad Computacional es la parte de la teoría de la computación que estudia los recursos requeridos durante el cálculo para resolver un problema. Un cálculo resulta complejo si es difícil de realizar. En este contexto podemos definir la complejidad de cálculo como la cantidad de recursos necesarios para efectuar un cálculo. Los recursos comúnmente estudiados son el tiempo (número de pasos de ejecución de un algoritmo para resolver un problema) y el

espacio (cantidad de memoria utilizada para resolver un problema). Un algoritmo que resuelve un problema pero que tarda mucho en hacerlo, difícilmente será de utilidad. Igualmente, un algoritmo que necesite un gigabyte de memoria no será probablemente utilizado [8].

4.4 Problema P

Son todos aquellos con los cuales habitualmente las ciencias y disciplinas normales trabajan, las profesiones y los que son habituales en la vida cotidiana. En matemáticas, esta clase de problemas se dice que son fáciles porque se resuelven o porque se pueden resolver. Y, en consecuencia, se trata de problemas triviales, es decir, aquel que se resuelve o que puede resolverse.

4.5 Problema NP

Son todos aquellos que son no-polinomiales y que, en consecuencia, ni se abordan ni se resuelven descomponiendo los mismos en los términos que los componen. Y, sin embargo, esta clase de problemas se resuelven y deben resolverse en un tiempo polinomial, esto es, en el tiempo práctico que caracteriza a todas las actividades normales de los seres humanos [9].

4.5.1 NP-completos

Se caracteriza por no tener un algoritmo que sea capaz de resolverlos en un tiempo polinómico, son un subconjunto de los problemas NP, esto quiere decir que existe un algoritmo polinómico que puede determinar si el valor obtenido es la solución al problema.

4.5.2 NP-Hard

Son aquellos problemas que son al menos tan difíciles como los NP-Complejos sin embargo estos no cuentan de un algoritmo polinómico que nos permita verificar una solución dada, ya que requieren un tiempo exponencial para ser solucionados [10].

4.6 Problema de optimización combinatoria

Los problemas de optimización en los que las variables de decisión son enteras, es decir, donde el espacio de soluciones está formado por ordenaciones o subconjuntos de números naturales, reciben el nombre de problemas de optimización combinatoria. En este caso, se trata de hallar el mejor valor de entre un número finito o numerable de soluciones viables. Sin embargo, la enumeración de este conjunto resulta prácticamente imposible, aún para problemas de tamaño moderado [11].

4.7 Problema de ruteo de vehículos - VRP

El problema de VRP es uno de los más comunes en la optimización de operaciones logísticas y uno de los más estudiados; plantea la búsqueda de la solución óptima con diferentes restricciones tales como: número de vehículos, su capacidad, lugares de destino (clientes) y demanda de los clientes, entre otras. Una formulación de este tipo puede incluir un amplio número de variables y diversos parámetros. Este tema presenta un interés práctico y académico por constituirse en un problema de optimización combinatoria y pertenecen en su mayoría a la clase NP-Hard, pues no es posible resolverlos en tiempo polinomial [12].

Para esto tenemos en cuenta uno de los problemas básicos y estándar llamado el “el problema del agente viajero” el cual dispone de un vehículo que debe visitar a todos los clientes

con una sola ruta y al menor costo. En este no hay deposito, ni demanda y tampoco restricciones temporales y es formulado como [13]:

$$\min \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$s. a. \sum_{j \in \Delta^+(i)} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Delta^+(j)} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S, j \in \Delta^+(i) \setminus S} x_{ij} \geq 1 \quad \forall S \subset V \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E \quad (5)$$

Las variables binarias x_{ij} indican si el arco (i, j) es utilizado en la solución. La función objetivo (1) establece que el costo total de la solución es la suma de los costos de los arcos utilizados. Las restricciones 2 y 3 indican que la ruta debe llegar y dejar cada nodo una vez. Finalmente, las restricciones 4 son llamadas restricciones de eliminación de sub-tours e indican que todo subconjunto de nodos S debe ser abandonado al menos una vez.

4.8 Problema de localización de instalaciones - FLP

El problema de localización de instalaciones (*Facility Location Problem* - FLP) es un problema macro logístico que consiste en determinar el local adecuado para posicionar estratégicamente algunas facilidades, tales como: instalaciones industriales, centros de distribución, instalaciones de asistencia médica, instalaciones indeseables, entre otros. Para cualquier tipo de instalación a ser localizada, diferentes variables y objetivos deben ser considerados simultáneamente. Particularmente, la localización de centros de distribución es un problema discreto que relaciona un conjunto de locales (alternativas) que deben ser evaluados contra un conjunto de criterios ponderados independientes uno del otro [14].

4.9 Problema de localización y ruteo - LRP

El problema de localización y ruteo (LRP por sus siglas en inglés, *Location- Routing Problem*), se analizan conjuntamente las decisiones estratégicas de localización y tácticas de rutas al menor costo posible. Este problema contempla restricciones tales como: Cada ruta es realizada por un vehículo de capacidad limitada, cada cliente debe ser atendido por un sólo depósito, las rutas deben iniciar y terminar en un mismo depósito, los depósitos tienen capacidad limitada y se debe satisfacer la demanda de los clientes [15].

Los entornos logísticos de hoy a menudo se caracterizan por la desregulación y la globalización. A raíz de la desregulación y la globalización, muchos gerentes de logística se enfrentan a problemas difíciles de ubicación, asignación y transporte. A medida que los gerentes se enfrentaban a estos problemas, los científicos de gestión han desarrollado técnicas más eficientes de resolución de problemas utilizando el concepto de sistemas logísticos integrados. La esencia de estas técnicas es el modelo de enrutamiento de ubicación combinado. En términos generales, el modelo de enrutamiento de ubicación combinado resuelve el problema conjunto de determinar el número óptimo, la capacidad y la ubicación de las instalaciones (domicilios) que atienden a más de un cliente / proveedor, y encontrar el conjunto óptimo de horarios y rutas de vehículos. Su principal objetivo es capitalizar la eficiencia de distribución que resulta de una serie de movimientos y transferencias de bienes coordinados y no fragmentados.

Combined location-routing problems: a synthesis and future research directions

El LRP tiene como objetivo principal resolver un problema de ubicación de instalaciones, pero para llevar esto a cabo esto, se debe resolver simultáneamente un problema de ruteo de vehículos; para ser catalogado como LRP debe tener dos componentes:

- Dos o más problemas (FLP por sus siglas en inglés)

- Ruteo (VRP por sus siglas en inglés), adicional a esto,

El problema de enrutamiento de ubicación (LRP) aparece como una combinación de dos problemas difíciles: el problema de ubicación de la instalación (FLP) y el problema de enrutamiento del vehículo (VRP), con formulación matemática: [16]

$$\text{Min } \sum_i \sum_j \sum_k C_{ijk} * X_{ijk} \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{k=1} \sum_{j=1} \sum_k X_{ijk} \leq M; i = 0 \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_i X_{ijk} = 1, \forall j \neq \text{Depósito} \quad (3)$$

$$\sum_k \sum_j X_{ijk} = 1, \forall i \neq \text{Origen} \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_j X_{ijk} * D_j \leq \text{Cap} \quad (5)$$

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad (6)$$

Donde, i es el conjunto de nodos de partida, j es conjunto de nodos de llegada, k es conjunto de vehículos, C es costo de ir de nodo a nodo, d es cantidad almacenada en un depósito, cap. es capacidad del vehículo k.

La función objetivo (1) minimiza la distancia total recorrida por las rutas, disminuye el tiempo de transporte y así mismo el coste. La restricción (2) indica que del origen solo parten cierta cantidad de vehículos M para realizar las rutas. La restricción (3) asegura que cada vehículo k salga solo una vez del nodo i de partida. La restricción (4) asegura que el vehículo k llegue al nodo j una sola vez. La restricción (5) asegura que no se exceda la capacidad del vehículo. La restricción (6) evita que se realicen subtour en las rutas, es decir, que solo hay único camino.

4.10 Métodos de solución de la optimización combinatoria

4.10.1 Métodos Exactos

Son aquellos que garantizan una solución óptima de los resultados, pero no tienen tiempo de complejidad polinómica para resolver los problemas de tipo NP o NP-Duros, ya que este crece exponencialmente con el tamaño del problema. En esta categoría están el método simplex y el algoritmo de ramificación y acotamiento [17].

4.10.2 Métodos Heurísticos

Esta técnica son algoritmos que encuentran la solución a problemas combinatorios complejos, estos son fáciles de implementar y encuentran soluciones buenas con pequeños esfuerzos computacionales, sin embargo, no encuentran la solución óptima del problema, rara vez un algoritmo heurístico encuentra la solución óptima a un problema de gran tamaño.

4.10.3 Métodos Metaheurísticos

Son una clase de método aproximado que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos no son efectivos, proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos [17].

Categorías de los métodos heurísticos más conocidos:

4.10.3.1 Métodos de Descomposición. El problema original se descompone en subproblemas más sencillos de resolver.

4.10.3.2 Métodos Inductivos. La idea es generalizar de versiones pequeñas o más sencillas al caso completo.

4.10.3.3 Métodos de Reducción. El objeto es restringir el espacio de soluciones simplificando el problema. El riesgo obvio es dejar fuera las soluciones óptimas del problema original.

4.10.3.4 Métodos Constructivos. Consisten en construir literalmente paso a paso una solución del problema. Usualmente son métodos deterministas y suelen estar basados en la mejor elección en cada iteración.

4.10.3.5 Métodos de Búsqueda Local. Los procedimientos de búsqueda o mejora local comienzan con una solución del problema y la mejoran progresivamente. El método finaliza cuando, para una solución, no existe ninguna solución accesible que la mejore [18].

4.10.4 Métodos evolutivos.

Los métodos evolutivos están basados en poblaciones de soluciones, en cada iteración del algoritmo no se tiene una única solución sino un conjunto de éstas. Estos métodos se basan en generar, seleccionar, combinar y reemplazar un conjunto de soluciones. Dado que mantienen y manipulan un conjunto en lugar de una única solución a lo largo de todo el proceso de búsqueda, suelen presentar tiempos de computación sensiblemente más altos que los de otros metaheurísticos [18].

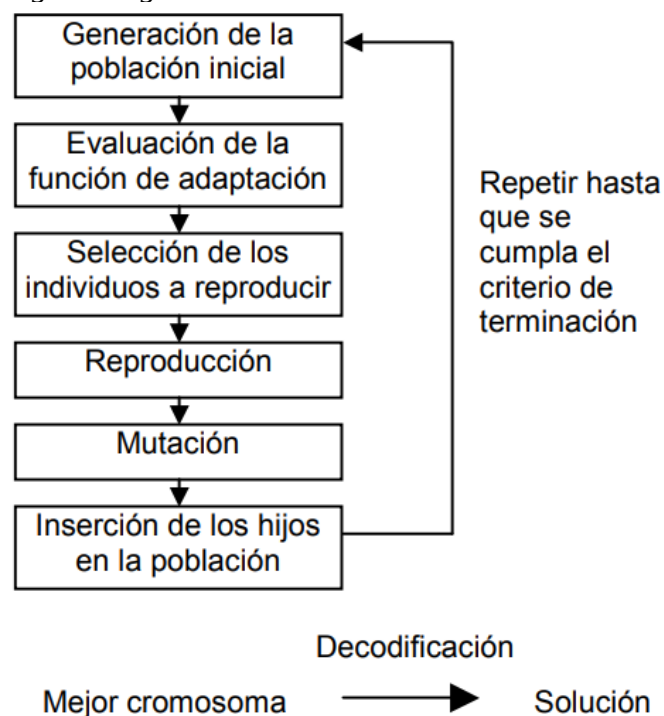
4.11 Algoritmo genético

Dentro de las técnicas evolutivas están los algoritmos genéticos que combinan las nociones de supervivencia del más apto con un intercambio estructurado y aleatorio de características entre individuos de una población de posibles soluciones, conformando un algoritmo de búsqueda que puede aplicarse para resolver problemas de optimización en diversos campos. Estos trabajan sobre una población de individuos. Cada uno de ellos representa una posible solución al problema que se desea resolver. Todo individuo tiene asociado un ajuste de acuerdo con la bondad con respecto al problema de la solución que representa [19].

Cada individuo de la población se denomina “cromosoma”. Un cromosoma representa en el algoritmo genético una posible solución y su codificación es llamado “representación”.

La figura 1 representa el esquema de funcionamiento de un algoritmo genético [20].

Figura 1. Fases de un algoritmo genético.



Fuente “Algoritmos genéticos aplicados a la categorización automática de documentos” por Yolis, E et al, (2003).

4.12 Operadores genéticos

Los operadores son objetos cuyo comportamiento es el de una función a la que se pasa el objeto a modificar. Los operadores genéticos se encuentran agrupados en dos clases principales (unarios y binarios) que descienden de una común [21]. un algoritmo genético consiste en hallar de qué parámetros depende el problema, codificarlos en un cromosoma, y aplicar los métodos de la evolución: selección y reproducción sexual con intercambio de información y mutaciones que generen diversidad [22]. Los más empleados son los operadores de selección, cruce y mutación.

4.13 Algoritmo memético

Es una población de agentes que alternan períodos de auto-mejora (mediante búsqueda local) con periodos de cooperación y competición (mediante selección). El objetivo de los algoritmos meméticos es hacer que ambos componentes: La Búsqueda Local y el Algoritmo Poblacional trabajen de forma cooperativa para conseguir una sinergia entre ambos que permita mejorar el proceso de búsqueda [23].

4.14 Logística humanitaria

Logística en su origen fue la técnica militar de transporte de aprovisionamiento y movimiento de tropas, está junto a una buena planificación y previsión basada en un contexto geográfico, social, político y físico de la zona abre paso a la logística humanitaria, es el proceso de planificación, ejecución, y control eficiente y efectivo del flujo y almacenamiento de recursos, que tiene como objetivo prestar asistencia a personas afectadas por un desastre, teniendo en cuenta

un entrega proporcional, equitativa y controlada para evitar desperdicios desde el punto de origen hasta los puntos de destino [24].

Esta rama de la logística se encarga de evaluar las necesidades tanto de la población como de las operaciones, también evalúa las capacidades de la infraestructura y la disponibilidad local de los recursos teniendo en cuenta medidas de restricción o facilitación.

Algunos de los organismos internacionales que intervienen en caso de emergencias son: Programa de naciones unidas para el desarrollo (PNUD), Oficina de las naciones unidas para coordinación de asuntos humanitarios (OCHA), UNDAC, Programa mundial de alimentos (PMA), Alto comisionado de las naciones unidas para los refugiados (ACNUR), Fondo de las naciones unidas para la infancia (UNICEF), Organización mundial de la salud (OMS), Federación Internacional de la Cruz Roja y la Media Luna Roja (IFRC), Médicos sin fronteras (MSF), Médicos del mundo (MDM) [25].

El término de logística se usa comúnmente para referirse al proceso de coordinación y movimiento de recursos - gente, materiales, inventario y equipos- de un lugar a otro su almacenamiento. El término logística se originó en la milicia, para referirse al movimiento de equipos y suministros a las tropas en el campo de batalla.

Los desastres entendidos como una amenaza o como un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presenta con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales, en este sentido se tiene la necesidad de brindar el apoyo post desastre en el menor tiempo posible, esto llevado a cabo a través de la logística humanitaria [4].

La logística humanitaria se define como el proceso de planificación, implementación y control efectivo y eficiente de los flujos de productos, materiales e información desde los donantes hasta las personas o sector afectados, con el fin de satisfacer las necesidades de supervivencia.

La logística es el elemento más importante en cualquier esfuerzo de ayuda ante un desastre y el que hace la diferencia entre una operación exitosa o fallida. Además, es la parte más costosa de cualquier ayuda ante desastres, se estima alrededor del 80% del costo total de la ayuda

Las operaciones de logística humanitaria son mucho más complejas que las de la logística de negocios o empresariales, por así llamarla. No solo porque se requiere responder inmediatamente a situaciones no predecibles en lo que respecta a la demanda (cuánto), sino también porque no se tiene certeza de cuándo, dónde y cómo se proporcionará la ayuda. Incluso, en los lugares propensos a los desastres naturales, en donde se suele contar con planes de contingencia y evacuación, siempre existen variaciones y eventualidades que escapan a todo pronóstico.

4.15 Desastre

El desastre es un suceso, generalmente inesperado, que ocasiona daños, pérdidas y estancamiento temporal de actividades en cierta área y afecta a una parte importante de la población.

Los desastres pueden clasificarse en dos grandes grupos: aquellos que son causados por fenómenos naturales y los que son derivados de actividades humanas. Los principales efectos de los desastres son: la pérdida de vidas y lesiones en la población, la pérdida y daños de bienes, la desorganización social y física de la comunidad, y las alteraciones orgánicas y conductuales de las personas [26].

5. Estado del arte

Como propuesta para hacer frente a los posibles escenarios post desastre existen modelos como problemas de enrutamiento y localización o LRP (por sus siglas en inglés) que básicamente es la convergencia entre ruteo vehicular VRP (por sus siglas en inglés) y localización de instalaciones FLP (por sus siglas en inglés).

El modelo clásico del problema de ruteo vehicular conocido como VRP (*vehicle route problem*), describe el diseño de rutas donde a partir de un depósito del que sale cada vehículo y al que tiene que regresar, luego de visitar una sola vez a los clientes para satisfacer su demanda conocida, sin violar las restricciones de capacidad de carga de los vehículos, distancia máxima recorrida por éstos, y respetando el horario de trabajo: todo ello con el fin de buscar el costo mínimo.

El modelo de localización de instalaciones conocido como FLP (*facility location problem*) busca ubicar estratégicamente los depósitos para poder satisfacer la demanda de los clientes teniendo en cuenta una serie de restricciones que depende de cada tema a abordar.

En el contexto post desastre las variantes a abordar según el modelo LRP son los albergues que se deben habilitar y cuál es la ruta de distribución más factible para satisfacer la demanda de recursos humanitarios a la población afectada ubicada en dichos albergues. Para poder desarrollar el modelo de LRP se deben tener en cuenta un gran número de variables y restricciones; debido a la magnitud del problema se plantea un algoritmo memético.

En el análisis de la literatura se pueden encontrar diversos trabajos propuestos para hacer frente a la logística humanitaria tales como:

Satish V. Ukkusuri and Wilfredo F. Yushimito: El modelo propuesto tiene como objetivo ayudar a los planificadores durante la etapa de preparación en el diseño de los esfuerzos de logística para la propia red humanitaria. El modelo propuesto explora el pre-posicionamiento del inventario como un problema de LRP y así lograr la selección de ubicaciones para el pre-posicionamiento de suministros humanitarios sobre la base de la confiabilidad de la red de transporte terrestre [27].

Alberto Ceselli, Giovanni Righini, Emanuele Tresoldi: se presenta un modelo para la optimización de las operaciones logísticas en sistemas de atención de salud de emergencia. Diseñaron un algoritmo exacto basado en la generación de columnas con tres tipos diferentes de columnas y ramificación y enlace. El problema comparte algunas características también con el *Multi Depot Heterogeneous VRP*, en el que el punto de partida de cada vehículo es parte del proceso de decisión, y para el cual los algoritmos exactos más avanzados pueden resolver problemas con cientos de clientes en unas pocas horas [28].

ZENG Mingangl, CUI Zengshoul, WU Xiaoyanl: En este documento ellos dividen el problema de enrutamiento de ubicación (LRP) en dos subproblemas: problema de ubicación de instalaciones de emergencia y problema de enrutamiento de recursos de emergencia; luego establecen un modelo de LRP con el objetivo de minimizar el costo total y utilizan un algoritmo heurístico de dos etapas para resolver este modelo. En la primera etapa, utilizan un método de agrupación para resolver el problema de localización de las instalaciones de emergencia con las limitaciones del tiempo de emergencia y en la segunda etapa, utilizan el algoritmo de colonia de hormigas para resolver la función heurística con el tiempo de los objetivos, la probabilidad de paso seguro y la distancia para el problema de enrutamiento de recursos de emergencia [29].

Caroline Prodhon, Christian Prins: el objetivo de su propuesta es combinar el PVRP (problema de enrutamiento de vehículos periódico) y el LRP en un problema aún más realista que

cubra todos los niveles de decisión: el LRP o PLRP periódico. Se propone un algoritmo evolutivo llamado algoritmo memético con gestión de población (MA | PM) para resolver instancias de gran tamaño del PLRP. El algoritmo se detiene cuando se alcanza un número determinado de regeneraciones de la población [30].

Houda Derbel, Bassem Jarboui, Said Hanafi, Habibd Chabchoub: este documento aborda un problema de enrutamiento de ubicación con múltiples depósitos capacitados y un vehículo no capacitado por depósito. Para ello, describen un algoritmo genético (GA) combinado con una búsqueda local iterativa (ILS). La idea principal detrás de la hibridación es mejorar las soluciones generadas por el GA utilizando un ILS para intensificar el espacio de búsqueda [31].

J. Guerrero, C. Prodhon, N. Velasco, A. Amaya: el problema consiste en determinar un conjunto de depósitos candidatos para abrir, las cantidades para enviar de proveedores a depósitos y de depósitos a minoristas por período, y la secuencia en que los minoristas se reponen por una flota homogénea de vehículos. Se propone un modelo de programación lineal de enteros mixtos para describir el problema y proporcionar límites en las soluciones. Se fortalece con dos conjuntos de desigualdades válidas con un análisis de su impacto. Dado que el modelo no puede resolver las instancias específicas exactamente dentro de un tiempo de cálculo razonable, se presenta un método híbrido que incorpora un enfoque exacto dentro de un esquema heurístico [32].

S. R. Parija, P. Addanki, P. K. Sahu, S. S. Singh: en este artículo se presenta el algoritmo BGA como un método heurístico adaptable basado en la población y que ha demostrado ser un método de búsqueda global muy poderoso utilizado para el proceso de optimización. Su problema radica en que los suscriptores móviles aumentaron drásticamente, lo que ha resultado en la explotación de los recursos de la red móvil, que se aplica a otras aplicaciones nuevas y renovadas, como la transferencia de datos. Su objetivo es reducir el costo total en la red móvil utilizando

diferentes técnicas de computación flexible para optimizar la red usando el BGA. La efectividad de la técnica se prueba para la recopilación de datos reales para su validación y se presenta en el documento [33].

A. G. Angarita: en el presente proyecto de investigación se aborda el problema de localización y ruteo de vehículos de dos escalones 2E-LRP (por sus siglas en inglés) aplicado a la gestión de la cadena de suministro humanitaria. Para el problema se asume un comportamiento de tipo determinístico en la demanda de los clientes y flota heterogénea en el escalón. Para dar solución al problema se emplea un algoritmo genético y se propone una nueva codificación de la solución [34].

Barreto Melissa, Niño Paula: el presente proyecto de investigación aborda un problema de localización y ruteo con ventanas de tiempo LRPTW (por sus siglas en inglés) aplicado en la logística humanitaria para la evacuación de afectados en caso de un desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga, para esto se busca identificar una serie de depósitos y establecer una ruta óptima para satisfacer las ventanas de tiempo de los clientes. Para dar solución al problema plantado las autoras proponen la aplicación de un algoritmo memético que hace uso de operadores de búsqueda local, con el objetivo de minimizar el tiempo total de respuesta [35].

6. Modelo matemático

El problema conjunto de localización de albergues y rutas de distribución de recursos humanitarios está compuesto, por un conjunto de albergues que será determinado si están habilitados y en tal caso demandaran unos recursos menores a su capacidad de almacenamiento, que serán satisfechos mediante un conjunto de vehículos homogéneos ilimitados con características ideales, cada uno de ellos tendrá una ruta no afectada por el siniestro, la cual inicia y termina en el

depósito, allí reposan los recursos que serán suministrados a los albergues, compuestos por kits de emergencias de varios elementos; el modelo será enfocado para minimizar el tiempo de las rutas de distribución de recursos sin tener en cuenta el tiempo de cargue y descargue de los vehículos.

6.1 Supuestos

- El número de vehículos disponibles en el depósito es ilimitado y la capacidad de estos es homogénea (necesidades y características).
- Los albergues cuentan con capacidad de almacenamiento de los recursos que sean necesarios, es decir, la capacidad de almacenamiento de los albergues es mayor a su demanda.
- Cada ruta inicia y termina en el depósito.
- La demanda de cada uno de los albergues es conocida.
- Una ruta es realizada por un solo vehículo.
- Los recursos suministrados a los albergues están compuestos por kits de emergencias que a su vez están compuestos de varios elementos.
- Todos los albergues habilitados tendrán demanda de recursos.
- Se conocen las rutas afectadas o no disponibles.
- El tiempo de cargue y descargue de los vehículos es despreciable.

6.2 Índices

$d = \text{deposito} = 0$

$a = \text{albergue}; a \in N_a$

$r = \text{recursos}$

6.3 Conjuntos

D = conjunto de todos los albergues disponibles

N_a = conjunto de todos los albergues habilitados = $\{1, 2, 3, \dots, n\}$

$N = N_a \cup d ; i \in N ; j \in N$

V = conjunto de vehiculos = $\{1, 2, 3, \dots, v\}$

X = conjunto de arco de i a j

6.4 Parámetros

Q = capacidad de vehiculo

D_a = demanda de recursos del albergue a

t_{ij} = tiempo de viaje desde i a j

C_d = capacidad total del deposito

6.5 Variables de decisión

$H_a = 1$ si el albergue a es habilitado; 0 en caso contrario

$X_{ij} = 1$ si el vehiculo viaja de i a j ; 0 en caso contrario

6.6 Función objetivo

$$\text{Min} \sum_i^j X_{ij} * t_{ij} \quad (1)$$

Minimizar el tiempo de las rutas de distribución de recursos.

s.a

$$\sum_{i \in N}^n X_{ij} = 1 \quad (2)$$

Cada vehículo va una única vez al albergue.

$$\sum_{i=1}^n d_a * H_a \leq Q ; \forall v \in V \quad (3)$$

La demanda de los albergues habilitados pertenecientes a la misma ruta no puede exceder la capacidad del vehículo que realiza dicha ruta.

$$X_{ij} = 0; \forall i = 0; \forall j = 0 \quad (4)$$

El vehículo no puede viajar de depósito a depósito.

$$\sum_{a=1}^n d_a * H_a \leq C_d \quad (5)$$

La capacidad del depósito debe ser mayor o igual que la demanda total de todos los albergues habilitados.

$$X_{ij} + X_{ji} \leq 1 \quad (6)$$

Evita que se realicen subtours.

$$H_a \in \{0,1\} \forall i, j \in N \quad (7)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \forall i, j \in N \quad (8)$$

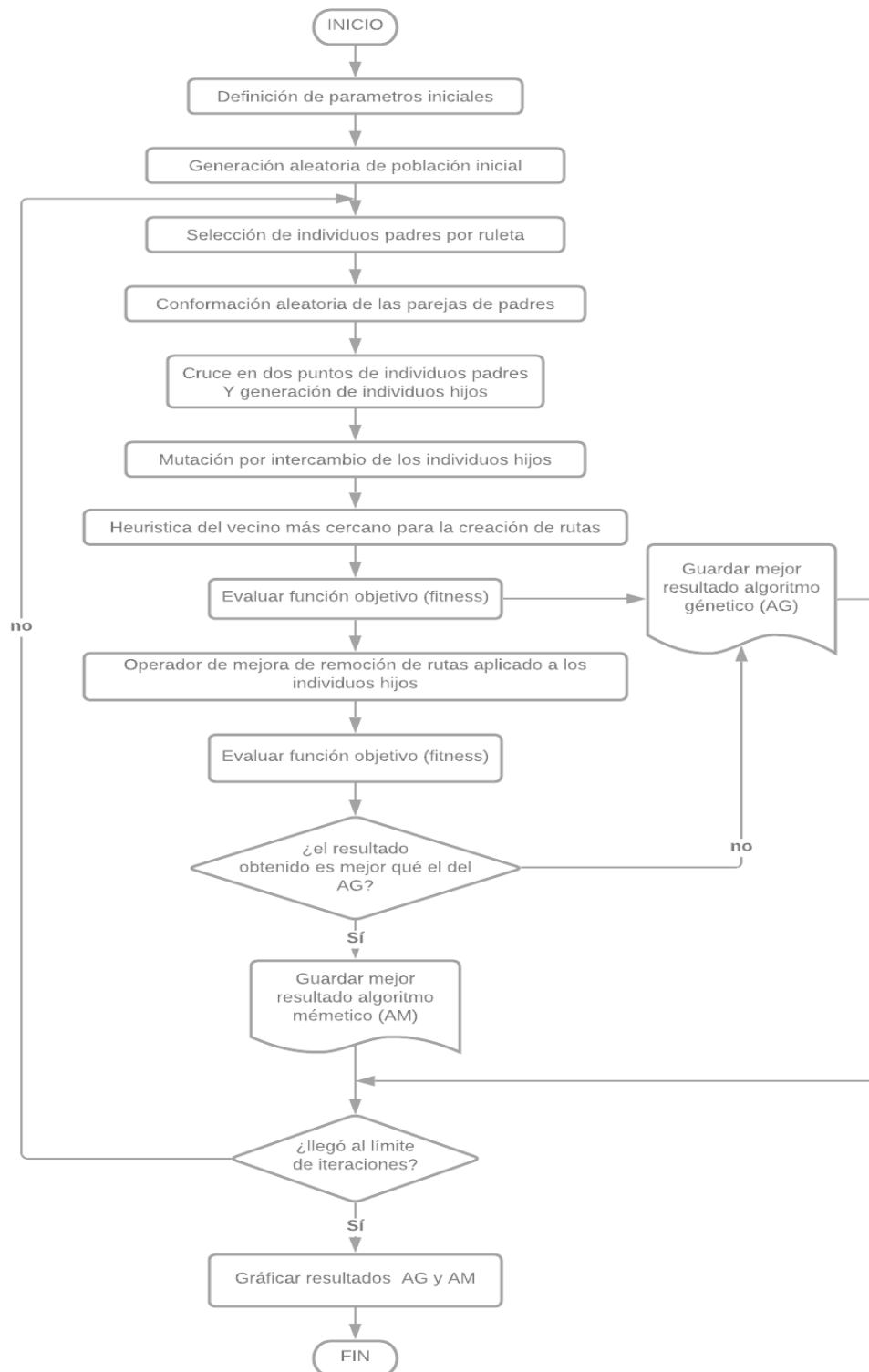
La 7 y 8 se conocen como restricciones de integralidad, que definen la naturaleza de las variables de decisión.

7. Diseño Del Algoritmo

En el presente proyecto de investigación se utiliza un algoritmo memético (AM), el cual se encuentra compuesto por un AG y un operador de mejora.

El AG está compuesto por una población inicial llamados cromosomas, los cuales son los albergues; esta población inicial será sometida al proceso de selección, los cromosomas seleccionados los llamaremos padres, que posteriormente serán reproducidos a través de un método de cruce, dando como resultado a los cromosomas hijos, estos cromosomas hijos serán mutados para tener una mayor variedad en las posibles soluciones; los hijos mutados serán evaluados en la función fitness para conocer cuáles son las soluciones óptimas; hasta aquí termina el proceso del AG.

Una vez evaluados los cromosomas hijos, entra en función el operador de mejora, este busca como dice su nombre mejorar las soluciones ya encontradas y posteriormente evaluarlas nuevamente en la función fitness.

Figura 2. Diagrama de flujo Algoritmo Memético

7.1 Población Inicial

En la codificación que se utilizó se representa gráficamente a un cromosoma a través de un vector horizontal, en el cual cada gen o casilla representa un albergue disponible, donde el valor del gen en la n -ésima posición indica el estado del albergue n , este se maneja con un código binario que define dicho estado; esto es posible teniendo como supuesto que el número de albergues es mayor o igual a la demanda de los afectados. La asignación del vector de albergues se realiza de forma aleatoria una cantidad determinada de veces, llamada población inicial. En la figura 3 se observa el vector D que contiene a todos los albergues disponibles, con la codificación que determina el estado del albergue donde UNO (1) indica que el albergue está habilitado (casillas resaltadas) y CERO (0) indica que está deshabilitado; por último, obtenemos N_a que es el conjunto de todos los albergues habilitados.

Figura 3. *Habilitación de albergues*



Una vez se han habilitados los albergues de forma aleatoria, se diseña la ruta de distribución asignando vehículos a los albergues los cuales cumplan con la restricción de que la demanda de los albergues habilitados pertenecientes a la misma ruta no puede exceder la capacidad del vehículo que realiza dicha ruta; para realizar el diseño de la ruta se utiliza la heurística del vecino más

cercano el cual busca cumplir con la restricción de que los vecinos que se encuentren más lejanos no sean asignados a una misma ruta.

7.2 Heurística del vecino más cercano (Nearest Neighbor)

Este algoritmo inicia una nueva ruta a partir del depósito, desplazándose al cliente o albergue más cercano no visitado, teniendo siempre en cuenta que la capacidad del vehículo pueda abastecer a dicho albergue para que pueda ser añadido a la ruta y el vehículo continúe viajando hacia los siguientes clientes o vuelva al depósito en caso de no contar con la capacidad requerida. Su finalidad es unir un conjunto de clientes distribuidos en un área, de acuerdo con la cercanía de su ubicación y acatando ciertos parámetros preestablecidos.

Como se muestra en la figura 4 una red de transporte formado por el depósito (nodo) 0 y los albergues habilitados (nodos) 2, 3, 5, 7, 8 y 9. En la tabla 1 muestra las demandas de cada uno de los albergues y en la tabla 2 muestra la matriz de tiempos.

Figura 4. Red de transporte – vecino más cercano

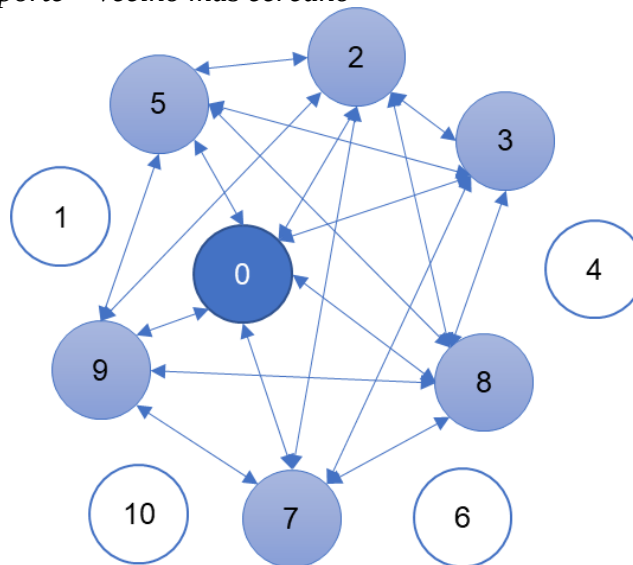


Tabla 1. *Demanda de los albergues*

Albergue	2	3	5	7	8	9
Demanda	18	46	40	23	32	48

Nota: Demanda de cada albergue habilitado.

La capacidad de cada vehículo para el ejemplo es de 112 kits y para cubrir las rutas la cantidad a asignar depende de la demanda de los albergues habilitados, que en el ejemplo es de 207; en consecuencia, se toman dos vehículos que suman 224 kits, número que debe ser igual o mayor a la demanda de los albergues.

Tabla 2. *Matriz de tiempos*

-	0	a2	a3	a5	a7	a8	a9
0	-	32	45	23	40	42	18
a2	30	-	15	22	120	80	86
a3	44	18	-	68	106	36	62
a5	25	20	70	-	68	96	38
a7	45	123	108	65	-	32	28
a8	38	82	38	94	36	-	64
a9	20	88	65	40	26	66	-

Nota: Matriz de tiempos dado en minutos, entre albergues o albergue a deposito.

Para la construcción del diseño de la ruta se llevan a cabo los siguientes pasos:

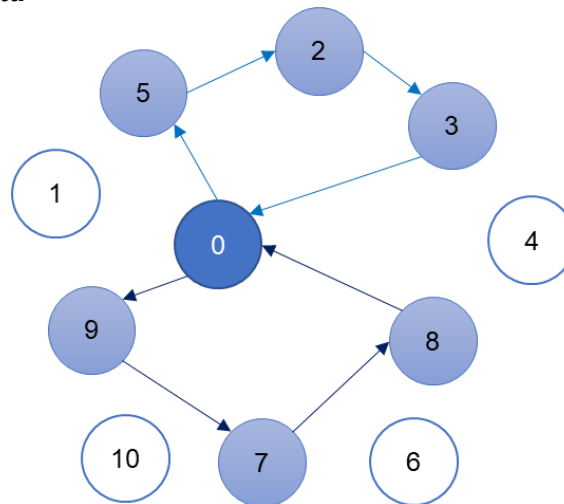
1. Se comienza la ruta tomando como punto de partida el nodo 0 o depósito.
2. El próximo cliente o albergue por visitar es el más cercano, es decir, el que menos tiempo requiera para ir de un albergue habilitado a otro, siempre y cuando este aún no haya sido visitado.
3. En la posición actual, identificar el cliente más cercano y añadirlo a la ruta si el vehículo aún tiene capacidad para satisfacer la demanda.

4. Repetir el tercer paso hasta que todos los albergues sean visitados, verificando antes de desplazarse que en el próximo nodo no sea excedida la capacidad del vehículo, en cuyo caso debe volver al depósito e iniciar una nueva ruta.

En el ejemplo, se comienza la ruta desde el depósito (0), observando la tabla 2 el recorrido con menor tiempo (18 min) es el 0 - a9, es decir, el vehículo uno (v1) debe dirigirse del depósito (0) al albergue 9 (a9) con una demanda de 48. La ruta sigue desde el nodo a9, al observar la tabla nuevamente el próximo albergue más cercano no visitado es el a7 (26 min), teniendo en cuenta la sumatoria de la demanda es de 71. Realizando el mismo procedimiento el siguiente albergue es el a8 (32 min) con una demanda acumulada de 103. Por último y en consecuencia el siguiente vecino más cercano no visitado sería el a3, pero la sumatoria de la demanda es 176, la cual excede la capacidad del vehículo que solo cuenta con un máximo de 112 kits, en cuyo caso el vehículo debe volver nuevamente al depósito (38 min).

En conclusión, la ruta del v1 queda 0 – a9 – a7 – a8 – 0 (Figura 5, recorrido color azul oscuro), con una demanda acumulada de 103 y un tiempo total de 114 min.

Figura 5. *Diseño de la ruta*



Finalmente, cada vehículo se le fue asignada una ruta compuesta por cierta cantidad de albergues como se representa por vectores verticales en la Figura 6, que cumplen con la restricción de capacidad.

Figura 6. Albergues asignados por vehículo.

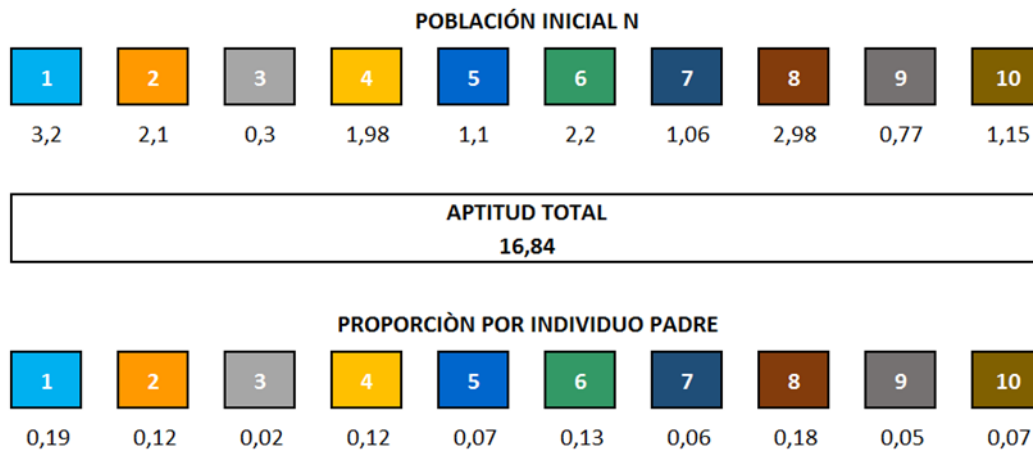
v1	v2
5	9
2	7
3	8

El procedimiento para generar un vector se repite n veces hasta que el tamaño D de la población inicial esté completa, donde N_a es el conjunto de albergues habilitados y t el número de generaciones con $t=0$ para una población inicial $D0$.

7.3 Operadores Genéticos

7.3.1 Operador de selección

El operador de selección a utilizar es selección por ruleta, este consiste en sumar las aptitudes de cada padre (albergue) y dividirlos en su totalidad cada uno, la suma total de la división debe dar como resultado 1.0, ahora se crean intervalos acumulando las aptitudes de estos (resultado división) como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Operador de selección por ruleta.

Las proporciones de los individuos se van acumulando (tabla 3) para poder generar intervalos entre estos, tal como se observa en la figura 8 aquellos individuos con mejor aptitud tienen mayor campo dentro de la ruleta.

Tabla 3. Intervalos de los individuos.

	Proporción	Acumulado	Intervalo	
1	0,190	0,190	0	0,190
2	0,125	0,315	0,191	0,315
3	0,018	0,333	0,316	0,333
4	0,117	0,450	0,334	0,450
5	0,065	0,515	0,451	0,515
6	0,131	0,646	0,516	0,646
7	0,063	0,709	0,647	0,709
8	0,177	0,886	0,710	0,886
9	0,046	0,932	0,887	0,932
10	0,068	1	0,933	1

Nota: Intervalos de los individuos padres.

Figura 8. Ruleta de individuos (padres).

Se procede a generar un número en el intervalo de 0 a 1 de forma aleatoria, este número permite saber cuándo el individuo padre es apto o no para ser seleccionado; este procedimiento se realiza la misma cantidad de veces que el número de la población inicial N y cada pareja dará 2 hijos. La selección se dará hasta que se complete $N/2$. Una vez generado el número se verifica en cuál intervalo se encuentra situado este y se identifica el individuo (padre) Tabla 4.

Tabla 4. Selección de individuos

Numero aleatorio	Individuo correspondiente al intervalo
0,601	6
0,522	6
0,077	1
0,166	1
0,862	8
0,670	7
0,765	8
0,561	6
0,388	4
0,172	1

Nota: Selección de los individuos padres según el intervalo.

Por último, se puede observar que el padre 1 será seleccionado tres veces, el padre 4 una vez, el padre 6 tres veces, el padre 7 una vez y el padre 8 dos veces.

Para agrupar las parejas de padres seleccionados se realiza de forma aleatoria y se deben tener en cuenta las siguientes restricciones:

Los dos padres no pueden ser iguales (ejemplo: 6 con 6)

Varias parejas pueden tener un mismo padre, pero se debe evaluar para que no se repitan los dos padres por estar en diferente orden, se debe anular esa pareja y crear una nueva. (ejemplo: no permitir 6 con 1 y 1 con 6)

Si al hacer todas las posibles combinaciones para las nuevas agrupaciones se siguen violando las reglas 1 y 2 se debe sacar las veces que no cumpla las restricciones dicho padre, excluirlo de la población inicial y volver a realizar el proceso de selección por ruleta, generar la nueva pareja y volver a evaluar las restricciones.

Teniendo en cuenta esto, los resultados arrojados en la tabla 4 pueden quedar agrupados de la siguiente manera:

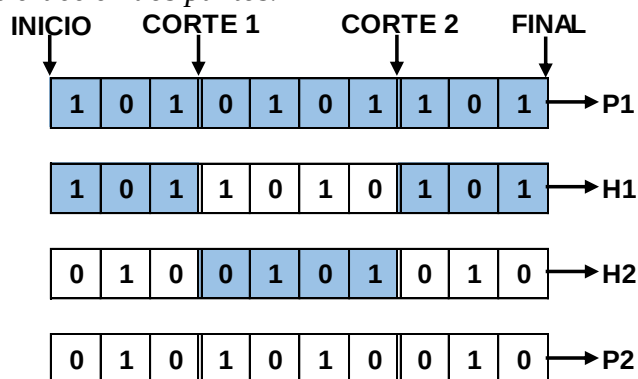
- 6 con 1
- 6 con 4
- 6 con 8
- 1 con 7
- 1 con 8

Este operador de selección tiene la característica que no excluye a los individuos de menor aptitud, por lo tanto, podrán ser seleccionados aun con proporciones bajas dependiendo del número aleatorio obtenido.

7.3.2 Operador de cruce

En esta investigación el operador que se utiliza es el de cruce en dos puntos, es decir, los individuos-padre son cortados en dos puntos. Por ejemplo, tenemos los dos cromosomas denominados progenitores P1 y P2, con 10 genes cada uno, que luego fueron cortados en dos puntos, del cual salen dos individuos-hijo H1 y H2, el primer hijo recibirá los genes del primer padre desde el inicio del cromosoma hasta el primer punto de corte, los genes del segundo padre van desde el primer hasta el segundo corte y finalmente recibirá nuevamente genes del primer padre que van desde el segundo corte hasta el final del cromosoma; este mismo procedimiento se realiza con el segundo hijo con la diferencia que se toma al segundo padre como primera posición, luego al primer padre y por último nuevamente al segundo padre, tal como se muestra en la figura 9, teniendo como resultado dos nuevos cromosomas (H1 y H2).

Figura 9. Operación de cruce en dos puntos.



7.3.3 Operador de mutación

Para evitar que las posibles soluciones converjan en óptimos locales se utiliza un operador genético de mutación que ayuda a diversificar la generación de hijos. Para este proyecto de investigación se utiliza el operador de mutación por intercambio, el cual consiste en seleccionar aleatoriamente un individuo-hijo, seguido se selecciona de forma aleatoria genes o componentes de este, los cuales serán intercambiados entre sí (figura 10).

Figura 10. Operador de mutación por intercambio.

Hijo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hijo mutado	1	2	7	4	5	6	3	8	9	10

De esta forma se intercambian genes dentro del cromosoma (hijo) y así diversificar las posibles soluciones. En términos de nuestro proyecto de investigación se puede decir que, dentro del vector binario (cromosoma), serán intercambiados los genes de este, cada casilla o gen, corresponde a un albergue los cuales podrán ser habilitados o no. Como ejemplo se toma el cromosoma del hijo 1 y se localiza en dos genes o casillas, los cuales serán intercambiados entre sí (figura 11).

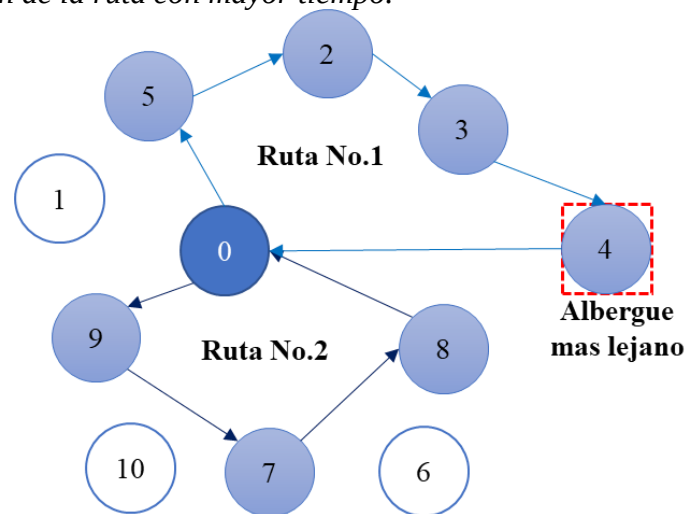
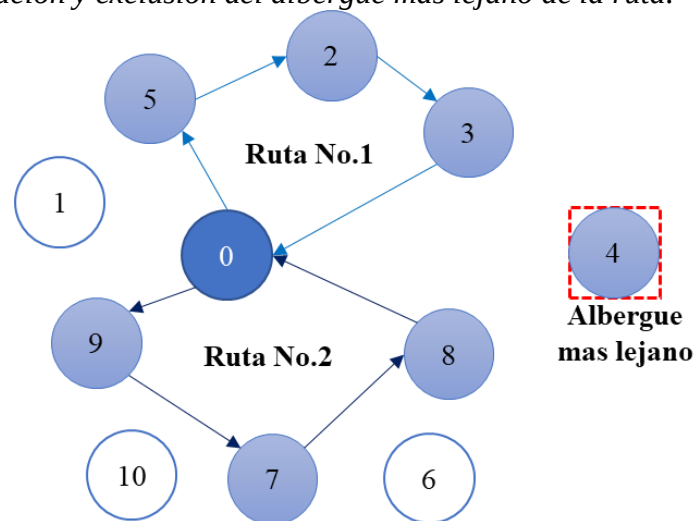
Figura 11. Cromosomas hijo 1 – hijo 1 mutado.

Cromosoma H1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1
Cromosoma H1 mutado	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1

Una vez mutados los individuos (hijos) se debe volver a correr la heurística del vecino más cercano para generar nuevas rutas.

7.4 Operador de mejora (memético)

El operador de mejora a utilizar es de búsqueda local llamado remoción de ruta, este se encarga de identificar la ruta de mayor duración que inicia y termina en el depósito (0), como se observa en la figura 12 la Ruta No.1; seguido de eso, en esta ruta más larga, identifica el albergue más lejano (Albergue 4) al depósito, que ocasiona que esa ruta sea la de mayor tiempo y se procede a excluir dicho albergue de la ruta (Figura 13).

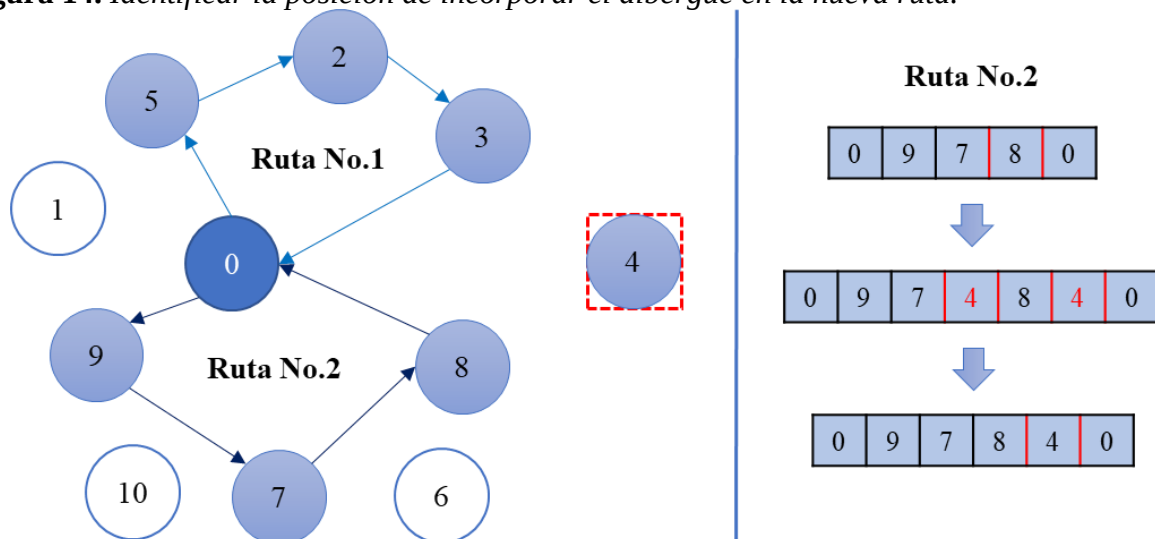
Figura 12. *Identificación de la ruta con mayor tiempo.***Figura 13.** *Identificación y exclusión del albergue más lejano de la ruta.*

Una vez extraído, se tienen en cuenta las rutas restantes con el fin de minimizar el tiempo total de dichas rutas, esto comenzando por la que tenga un menor tiempo, en la figura anterior la Ruta No.2 y en esta se evalúa la capacidad del vehículo que hace el recorrido, con el fin de verificar si al añadir este nuevo albergue el vehículo puede cumplir con la demanda del nuevo recorrido.

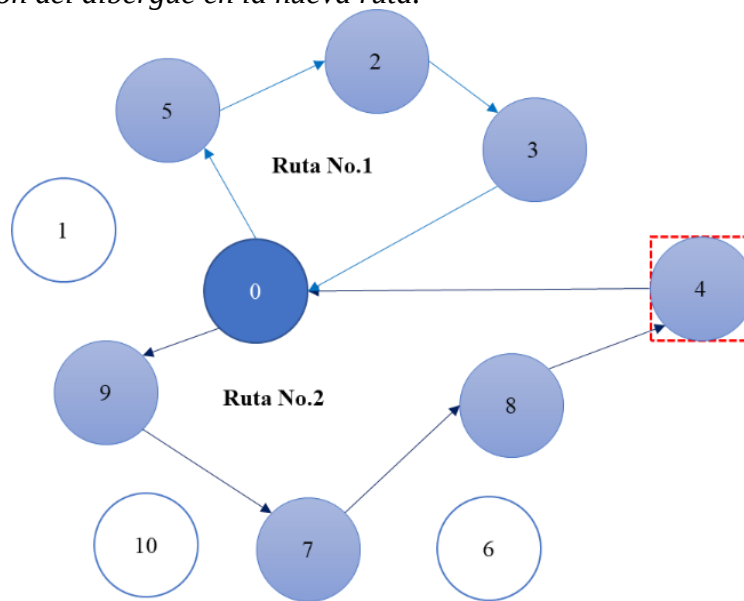
Si la nueva ruta cumple con los requisitos antes descritos, en esta se identifica cuál es el albergue más cercano al removido inicialmente y en qué posición de la ruta se encuentra dentro de

la ruta, en la figura 14 es el albergue 8, el cual se encuentra en la última posición del cromosoma o ruta. Luego de eso se evalúa la posición en la cual debe incorporarse el nodo removido a la ruta nueva, si debe ir antes o después del albergue identificado como más cercano, para esto se tiene en cuenta el tiempo de la ruta, el nodo removido se agrega a cada lado del albergue cercano y es seleccionada la ruta que arroje como resultado un menor tiempo, en el caso del ejemplo estaría el albergue 4 al lado derecho del albergue 8.

Figura 14. Identificar la posición de incorporar el albergue en la nueva ruta.



Finalmente se evalúa nuevamente en la función fitness y si como resultado tiene un menor tiempo comparado con la ruta inicial se procede a dejar incluido el albergue en la nueva ruta como se observa en la figura 15.

Figura 15. *Inclusión del albergue en la nueva ruta.*

De ser el caso contrario, que el resultado de la nueva ruta de mayor o igual tiempo de recorrido, se descarta esa nueva ruta y procede a evaluar el albergue en las distintas rutas restantes, en caso de no encontrar una solución mejor con ninguna ruta nueva el albergue volverá a su ruta original con el fin de mantener el menor tiempo posible.

8. Caso de estudio

Para este proyecto de investigación el objeto de estudio será la ciudad de Bucaramanga capital del departamento de Santander, considerándola ocurrencia de un sismo de intensidad VII. Para estimar el daño ocasionado se tiene en cuenta los niveles de afectación, los niveles de afectación son tomados de la investigación realizada por Maldonado y Chio [36] :

Tabla 5. *Niveles de afectación de un sismo.*

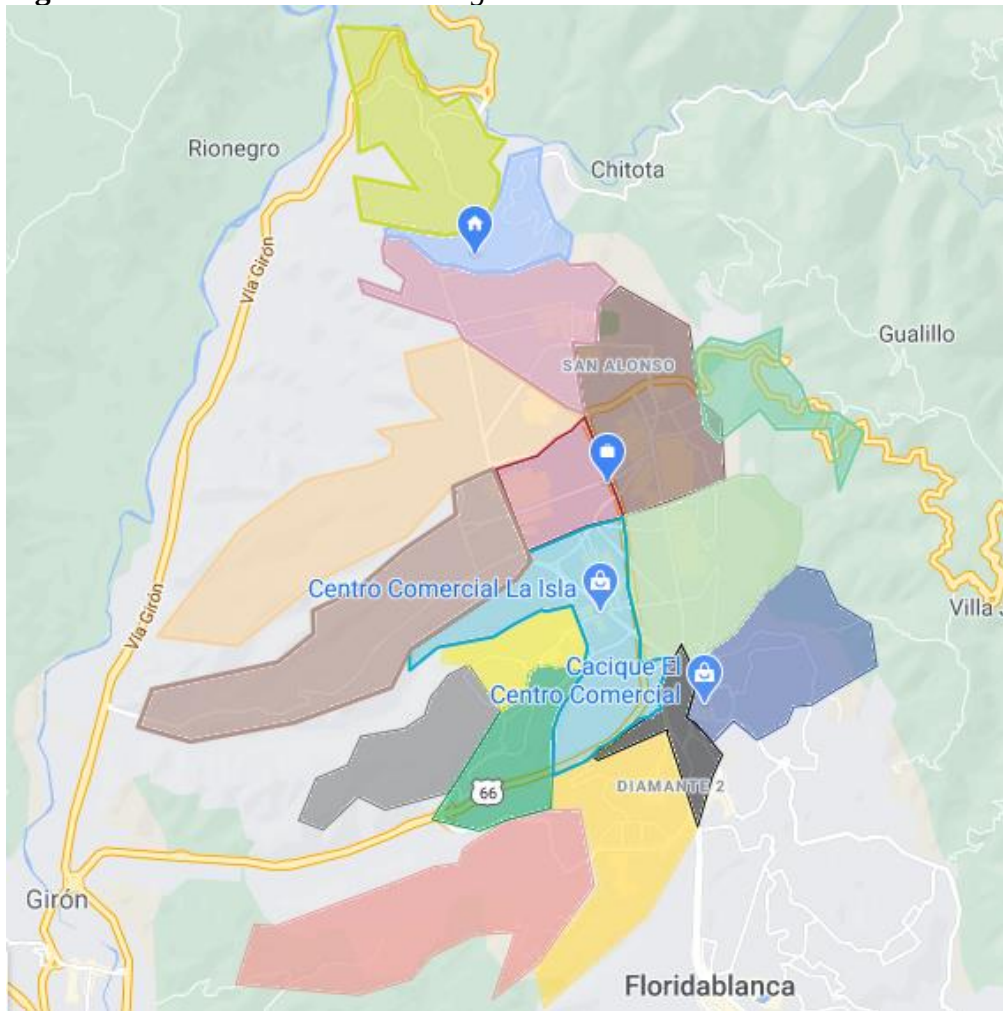
Nivel de afectación	Descripción
Ninguno	Sin daño.
Leve	Daño menor, el cual no requiere reparación.
Ligero	Daño significativo de algunos componentes que generalmente no requieren reparación

Nivel de afectación	Descripción
Moderado	Daño significativo de muchos componentes, los cuales se requieren reparar
Fuerte	Daño que demanda grandes reparaciones
Mayor	Daño tal que puede llevar a la estructura a que sea arrasada, demolida o reparada
Colapso	Destrucción total

Fuente: Maldonado y Chio [36].

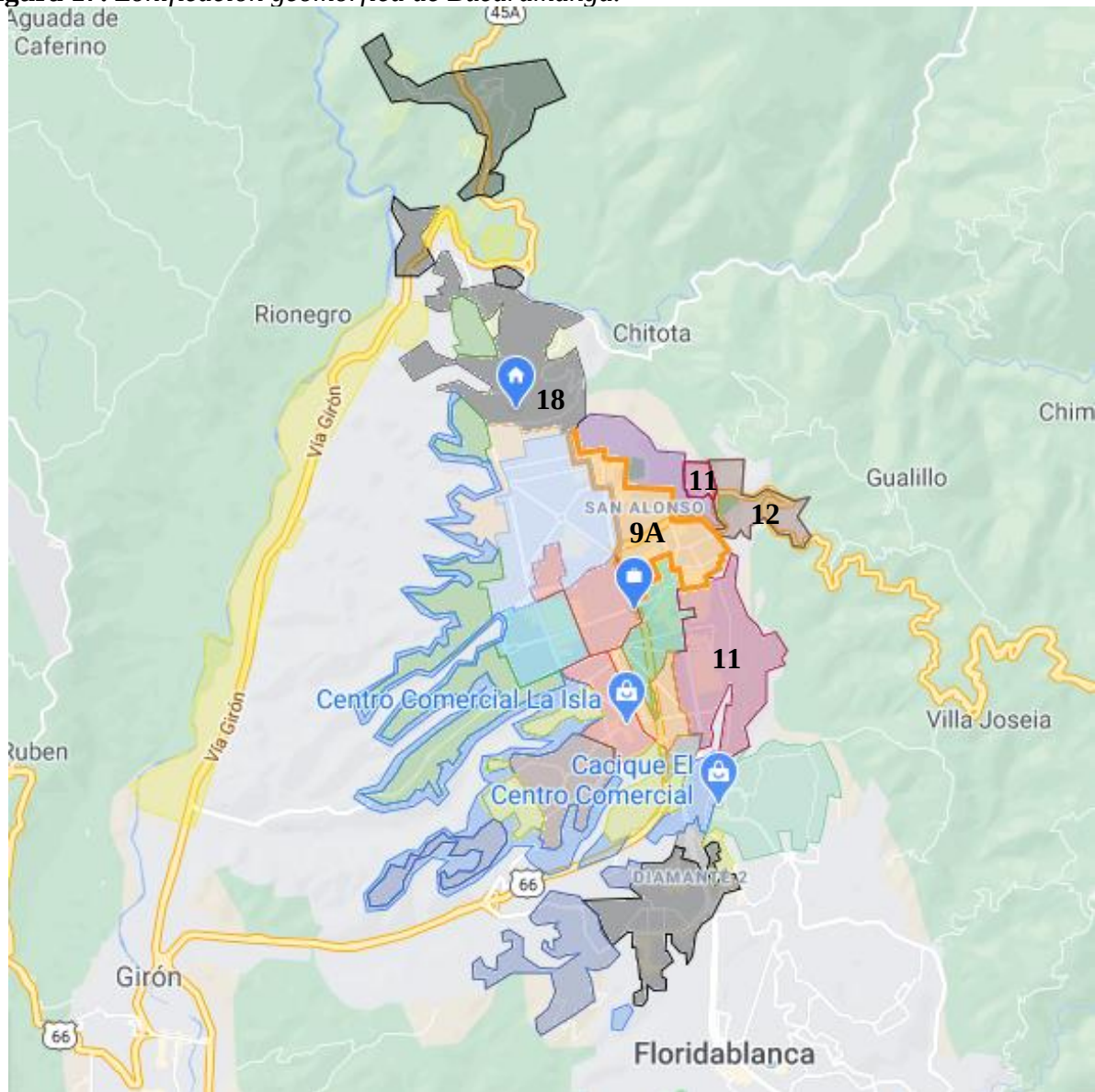
Nota: Muestra los niveles de afectación de las estructuras y la descripción de los daños ocasionados en cada nivel.

La ciudad de Bucaramanga se encuentra conformada según su división política urbana por 17 comunas, las cuales son: comuna Norte (1), Nororiental (2), San Francisco (3), Occidental (4), García Rovira (5), La Concordia (6), La Ciudadela (7), Sur Occidente (8), La Pedregosa (9), Provenza (10), Sur (11), Cabecera del Llano (12), Oriental (13), Morrorico (14), Centro (15), Lagos del Cacique (16) y Mutis (17) [37].

Figura 16. *Comunas de Bucaramanga.*

Fuente: mapa de emergencias Bucaramanga [37]

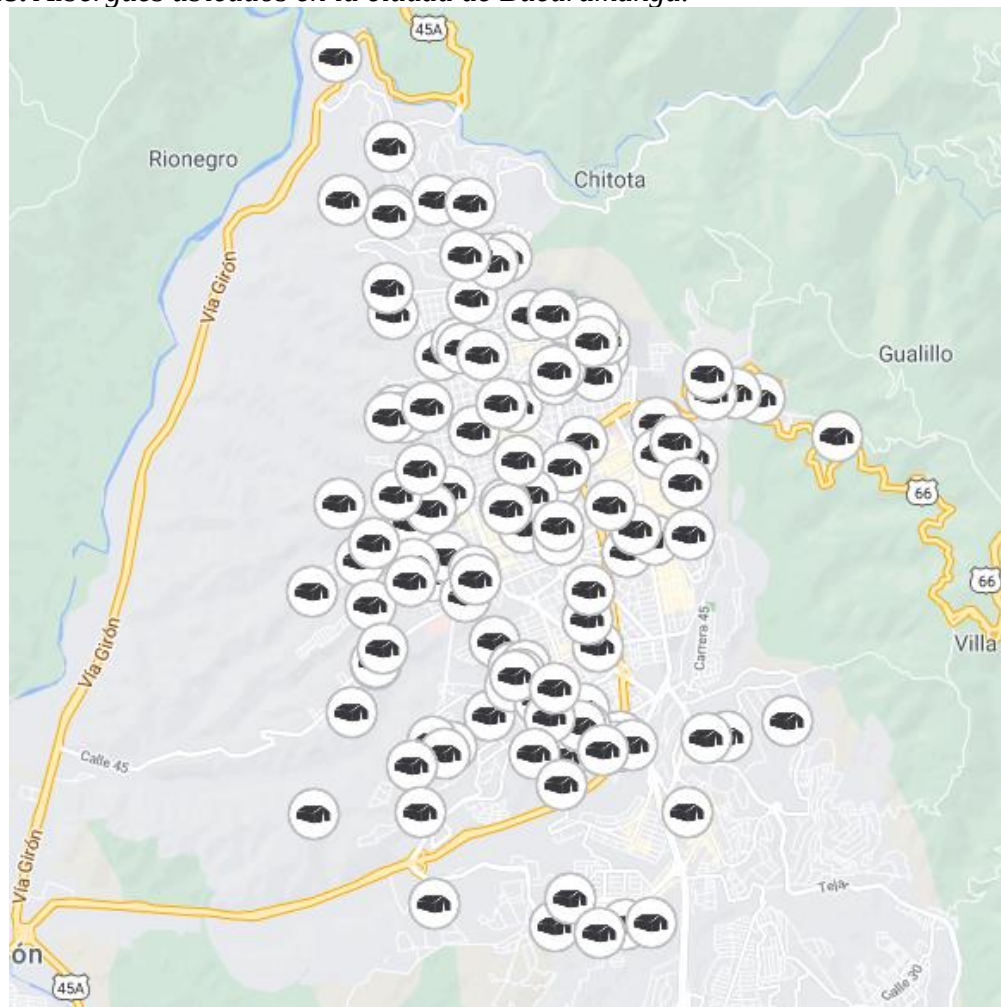
Para el desarrollo de este caso de estudio también es necesario conocer la zonificación geomórfica de la ciudad, esta nos indica cual serán las zonas con mayor afectación según la condición de sus suelos. La ciudad está dividida en 20 zonas según su geomorfología.

Figura 17. Zonificación geomórfica de Bucaramanga.

Fuente: mapa de emergencias Bucaramanga [37]

Nota: El mapa de zonificación geomórfica muestra las zonas de mayor vulnerabilidad sísmica en la ciudad de Bucaramanga según Maldonado y Chio (zonas 9A, 11, 12 y 18)

Se debe tener presente la localización de los potenciales albergues, de los cuales se identificaron como potenciales 124 albergues y de estos solo se pueden habilitar 73 de estos, debido a que cumplen con los requisitos para ser habilitados si se presenta una emergencia como la propuesta en este caso de estudio.

Figura 18. Albergues ubicados en la ciudad de Bucaramanga.

Fuente: mapa de emergencias Bucaramanga [37]

Nota: La figura muestra la distribución de los 124 albergues en la ciudad de Bucaramanga

8.1 Cálculo de la demanda

Para establecer la demanda es necesario conocer el nivel de impacto que puede ocasionar un sismo de intensidad VII; para esto se toma el estudio realizado por Maldonado y Chio, donde se establece que, para una intensidad VII se afectan las zonas en tres niveles de afectación: ligero, moderado y fuerte; también nos indica que el porcentaje de población que afecta es: el 44% presenta un daño ligero, el 43% moderado y el 13% fuerte.

Las zonas afectadas son:

Tabla 6. Zonas afectadas por nivel de intensidad de Mercalli

Nivel de afectación	Niveles de intensidad				
	VI	VII	VIII	IX	X
1	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12	Zona 12
2	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18	Zona 18
3	Zona 9ª y 11	Zona 9ª y 11	Zona 11	Zona 11	Zona 13
4			Zona 9	Zona 13	Zona 11
5				Zona 6 y 4	Zona 6
6					Zona 4
7					Zona 17

Nota: Zonas afectadas según intensidad del sismo y nivel de afectación. Fuente: Maldonado y Chio [36].

Por lo tanto, se toman las zonas afectadas y el grado de afectados, el cual es el 13% (FUERTE) de la población que requiere movilizarse a los albergues debido a que su infraestructura demanda grandes reparaciones.

Tabla 7. Cantidad de habitantes por comuna en las zonas afectadas.

Nivel de afectación	Zonas afectadas	Comunas	Total habitantes	13% de los habitantes
1	Zona 12	Comuna 14	18.227	2.370
2	Zona 18	Comuna 1	66.710	8.672
		Comuna 2	27.515	3.577
3	Zona 9	Comuna 13	27.047	3.516
	Zona 11	Comuna 12	33.825	4.397
Total habitantes a desplazarse				22.532

Nota: Cantidad de habitantes afectados por un sismo de intensidad VII según Mercalli, por comunas. Fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 (Bucaramanga). [38]

Para calcular la demanda se requiere conocer el número total de población a refugiarse en cada albergue y condicionarlo a la cantidad de personas que conforman un núcleo (5 personas)

$$\# Kits = \frac{Total\ habitantes\ a\ desplazarse}{5} = 4.507$$

Se decide habilitar los albergues al 56% de su capacidad con el fin de tener mayor diversidad en la apertura de estos y evitar que tan solo unos cuantos albergues cumplan con la demanda requerida.

Cada kit está contenido en una caja de cartón corrugado con dimensiones de 34,2 cm de ancho, 28,4 cm de alto y 24 cm de profundidad.

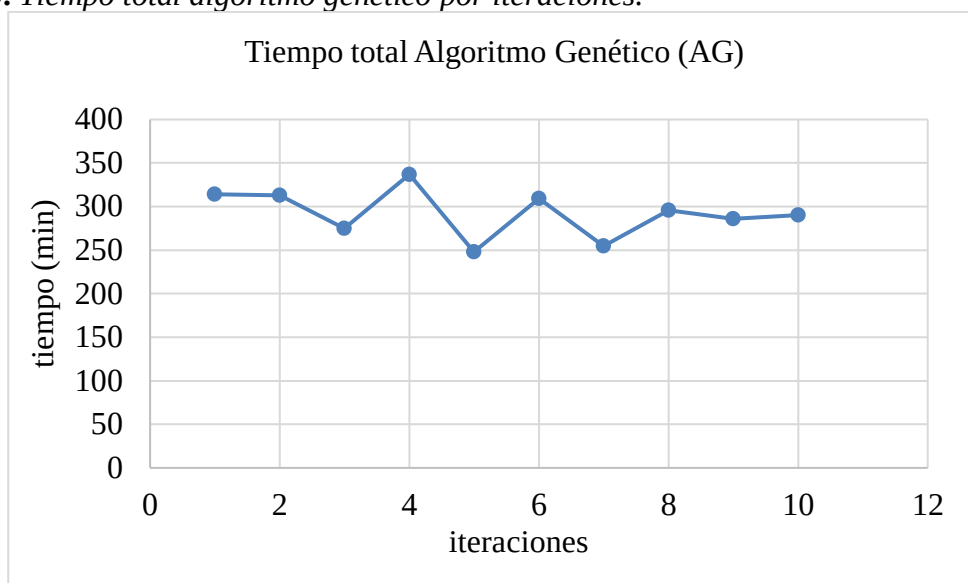
9. Resultados

Para la obtención de resultados los parámetros para correr inicialmente el algoritmo genético se fijaron de la siguiente manera, un número de 10 iteraciones, se habilitaron los 73 albergues con una capacidad del 56% cada una y se toma a una población inicial de 22.532 habitantes teniendo en cuenta el caso de estudio mencionado de un sismo de intensidad VII en la ciudad de Bucaramanga:

Tabla 8. *Escenario de intensidad VII (A. Genético)*

Capacidad del vehículo:			655 KITS	
Iteraciones	Tiempo en rutas (min)			Tiempo total
	1	2	3	
1	139	82	93	314
2	113	94	106	313
3	119	156		275
4	168	130	39	337
5	128	120		248
6	172	137		309
7	123	132		255
8	121	85	90	296
9	94	110	82	286
10	141	81	68	290

Nota: Resultados de la simulación del algoritmo genético, con diez iteraciones, formando las rutas con tiempos independientes y un tiempo total.

Figura 19. *Tiempo total algoritmo genético por iteraciones.*

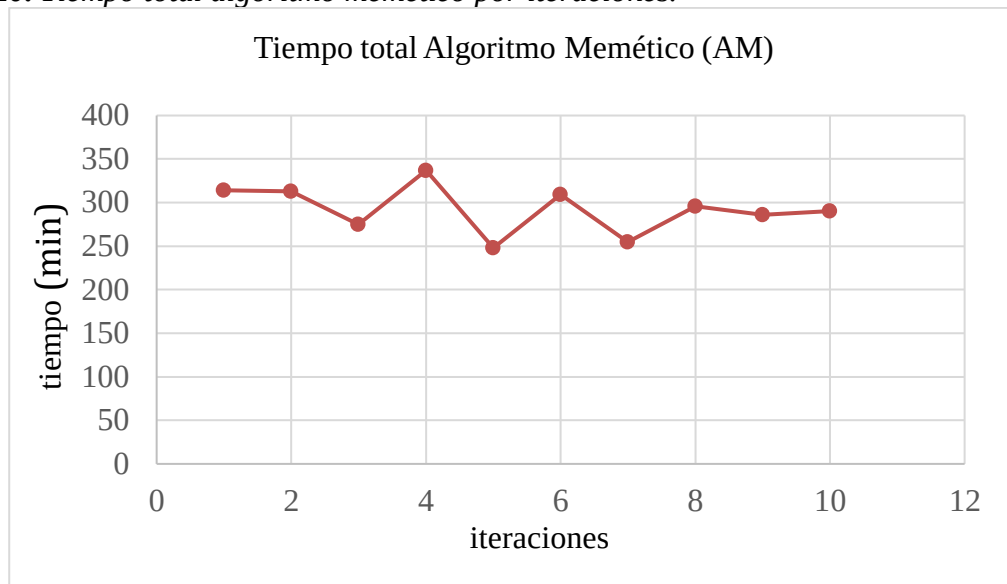
Nota: la figura muestra el tiempo mínimo obtenido en cada una de las 10 iteraciones del algoritmo genético

Luego de obtener resultados del algoritmo genético se procede a aplicar el operador de mejora, es decir probando el algoritmo memético, el cual nos ofrece resultados al finalizar su operación, concluyendo así la totalidad de la programación propuesta en este proyecto de investigación:

Tabla 9. *Escenario de intensidad VII (A. Memético)*

Capacidad del vehículo:				655 KITS
Iteraciones	Tiempo en rutas (min)			Tiempo total
	1	2	3	
1	139	82	93	314
2	113	94	106	313
3	119	156		275
4	168	130	39	337
5	128	120		248
6	172	137		309
7	123	132		255
8	121	85	90	296
9	94	110	82	286
10	141	81	68	290

Nota: resultados de la simulación del algoritmo mejorado memético, con diez iteraciones, formando las rutas con tiempos independientes y un tiempo total.

Figura 20. *Tiempo total algoritmo memético por iteraciones.*

Nota: la figura muestra el tiempo mínimo obtenido en cada una de las 10 iteraciones del algoritmo memético

Como se puede observar, el resultado final del algoritmo memético es igual al tiempo obtenido en el algoritmo genético, por lo tanto, la variación de tiempo entre iteraciones es la misma, al igual que el número de vehículos utilizados y sus respectivas rutas:

Tabla 10. *Rutas iteración 1*

Rutas iteración 1		
V1	V2	V3
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolivar	Colegio de Santander SEDE A	Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A
Colegio Federico Ozanam	Institución Educativa Comuneros	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A
Institución Educativa Provenza - Sede A	Universidad Industrial de Santander	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A
Institución Educativa Jorge Ardila Duarte Sede A	Colegio Bilingüe Divino Niño	Colegio Gimnasio San Sebastián
Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	Colegio De Santander Sede E	Institución Educativa Politécnico Sede A
Institución Educativa Luis Carlos Galan Sarmiento	Institución Educativa Inem Custodio García Rovira Sede A	Institución Educativa La Juventud Sede A
Colegio La Salle Bucaramanga	Servicio Nacional De Aprendizaje - Sena	Colegio De La Santísima Trinidad Bucaramanga
Institución Educativa San José De La Salle SEDE A	Colegio Bilingue La Consolata	Institución Educativa Nuestra Señora Del Pilar SEDE E
Institución Educativa Gabriela Mistral	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Institución Educativa Santo Angel
Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor		Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar		
Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis		
Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B		
Escuela Normal Superior de Bucaramanga SEDE A		
Colegio Psicopedagogico Carl Rogers		
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán		

Nota: La tabla representa la ruta en la primera iteración, esta utiliza 3 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 314 minutos (139, 82 y 93 min respectivamente).

Tabla 11. *Rutas iteración 2.*

Rutas iteración 2		
V1	V2	V3
depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesus	Institución Educativa Camacho Carreño	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A
Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolivar	Colegio Franciscano del Virrey Solis	Colegio de la Santísima Trinidad Bucaramanga
Colegio Federico Ozanam	Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar	Institución Educativa Club Unión SEDE A
Institución Educativa INEM Custodio García Rovira SEDE A	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA	Institución Educativa Santa Maria Goretti SEDE A
Colegio Bilingue la Consolata	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C	Escuela Normal Superior de Bucaramanga SEDE A
Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	Colegio de Santander SEDE E	Institución Educativa Santo Angel
Institución Educativa Jose Celestino Mutis	Colegio de Santander SEDE A	Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia
Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B	Colegio Incades	Institución Educativa Politécnico SEDE A
Colegio Metropolitano Real de Minas	Universidad Industrial de Santander	Institución Educativa La Juventud Sede B
Institución Educativa San José de la Salle SEDE A	Colegio Psicopedagogico Carl Rogers	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E	Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A	
Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor	Colegio Gimnasio San Sebastián	
depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	

Nota: La tabla representa la ruta en la segunda iteración, esta utiliza 3 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 313 minutos (113, 94 y 106 min respectivamente).

Tabla 12. *Rutas iteración 3.*

V1	V2
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesus	INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS
INSTITUCIÓN EDUCATIVA CENTRO PILOTO SIMON BOLIVAR	Institución Educativa Comuneros
Colegio Gimnasio San Sebastián	Institución Educativa Santa Maria Goretti SEDE A
Colegio de la Santísima Trinidad Bucaramanga	Institución Educativa Club Unión SEDE A
Colegio Psicopedagogico Carl Rogers	Colegio Militar General Santander
Escuela Normal Superior de Bucaramanga SEDE A	INSTITUCIÓN EDUCATIVA LA JUVENTUD SEDE A
Colegio San Pedro Claver	Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A
Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A	Institucion Educativa Promoción Social del Norte SEDE A
Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia Gimnasio Superior	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C
Colegio Metropolitano Real de Minas	Institución Educativa La Juventud Sede B
Institución Educativa Gabriela Mistral	Institución Educativa Politécnico SEDE A
Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor	INSTITUCIÓN EDUCATIVA GUSTAVO COTE URIBE
Institución Educativa Camacho Carreño	INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROVENZA - SEDE A
Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar	Institución Educativa Santo Angel
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán

Nota: La tabla representa la ruta en la tercera iteración, esta utiliza 2 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 275 minutos (119 y 156 min respectivamente).

Tabla 13. *Rutas iteración 4.*

Rutas iteración 4		
V1	V2	V3
depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesus	Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis	Institución Educativa Politécnico SEDE A
Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolivar	Institución Educativa Comuneros	Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A
Colegio Federico Ozanam	Institución Educativa Santa Maria Goretti SEDE A	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A
Institución Educativa Provenza - Sede A	Institución Educativa Club Unión SEDE A	Institución Educativa La Juventud SEDE A
Colegio Franciscano del Virrey Solis	Colegio Militar General Santander	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C
Colegio de Santander SEDE E	Colegio Bilingue Divino Niño	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Incades	Colegio Caldas	
Colegio Psicopedagogico Carl Rogers	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A	
Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B	
Institución Educativa Jose Celestino Mutis	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	
Colegio La Salle Bucaramanga		
Institución Educativa San José de la Salle SEDE A		
Colegio Metropolitano Real de Minas		
Gimnasio Superior		
Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E		
Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor		
Institución Educativa Camacho Carreño		
Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar		
depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán		

Nota: La tabla representa la ruta en la cuarta iteración, esta utiliza 3 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 337 minutos (168, 130 y 39 min respectivamente).

Tabla 14. *Rutas iteración 5.*

Rutas iteración 5	
V1	V2
depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesus	Institución Educativa Club Unión SEDE A
Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolivar	Institución Educativa Gustavo Cote Uribe
Colegio Federico Ozanam	Institución Educativa La Juventud Sede B
Colegio Bilingue la Consolata	Institucion Educativa Promoción Social del Norte SEDE A
Institución Educativa Jose Celestino Mutis	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B	Colegio San Pedro Claver
Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A	Colegio Caldas
Colegio de Santander SEDE A	Institución Educativa San José de la Salle SEDE A
Universidad Industrial de Santander	Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E
Colegio de Santander SEDE E	Gimnasio Superior
Colegio Incades	Institución Educativa Santa Maria Goretti SEDE A
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C	Institución Educativa Camacho Carreño
Colegio Gimnasio San Sebastián	Colegio de la Santísima Trinidad Bucaramanga
depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán

Nota: La tabla representa la ruta en la quinta iteración, esta utiliza 2 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 248 minutos (128 y 120 min respectivamente), siendo la más óptima en tiempo.

Tabla 15. *Rutas iteración 6.*

V1	V2
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Franciscano del Virrey Solís	Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolívar
Colegio de Santander SEDE A	Institución Educativa Comuneros
Universidad Industrial de Santander	Colegio Federico Ozanam
Colegio de Santander SEDE E	Institución Educativa Club Unión SEDE A
Colegio Incades	Institución Educativa Provenza - SEDE A
Colegio Psicopedagógico Carl Rogers	Colegio Bilingüe Divino Niño
Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	Colegio Bilingüe la Consolata
Colegio Cafe Madrid	Institución Educativa INEM Custodio García Rovira SEDE A
Institución Educativa Santo Angel	Institución Educativa Jose Celestino Mutis
Institución Educativa Tecnológico	Colegio de la Santísima Trinidad
Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A	Bucaramanga
Institución Educativa Gabriela Mistral	Institución Educativa Santa Maria Goretti SEDE A
Colegio Metropolitano Real de Minas	Colegio San Pedro Claver
Gimnasio Superior	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E	
Institución Educativa San José de la Salle SEDE A	
Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B	
Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor	
Institución Educativa Camacho Carreño	
Institución Educativa Tecnológico	
Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C	
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	

Nota: La tabla representa la ruta en la sexta iteración, esta utiliza 2 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 309 minutos (172 y 137 min respectivamente).

Tabla 16. *Rutas iteración 7.*

V1	V2
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
INSTITUCIÓN EDUCATIVA CENTRO PILOTO SIMON BOLIVAR	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A
Colegio de Santander SEDE A	Institución Educativa Club Unión SEDE A
Universidad Industrial de Santander	Institución Educativa Politécnico SEDE A
Colegio de Santander SEDE E	INSTITUCIÓN EDUCATIVA LA JUVENTUD SEDE A
Colegio Psicopedagógico Carl Rogers	INSTITUCIÓN EDUCATIVA PROVENZA - SEDE A
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A	Institución Educativa Comuneros
Institución Educativa Gabriela Mistral	Colegio Bilingüe la Consolata
Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor	Institución Educativa La Juventud Sede B
Institución Educativa Camacho Carreño	Institución Educativa Jose Celestino Mutis
Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar	Institución Educativa Santo Angel
INSTITUCIÓN EDUCATIVA AURELIO MARTINEZ MUTIS	Colegio La Salle Bucaramanga
Institución Educativa Santa Maria Goretti SEDE A	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C
Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A	
Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia	
Colegio San Pedro Claver	
Gimnasio Superior	
Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E	
Institución Educativa San José de la Salle SEDE A	
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	

Nota: La tabla representa la ruta en la séptima iteración, esta utiliza 2 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 255 minutos (123 y 132 min respectivamente).

Tabla 17. *Rutas iteración 8.*

V1	V2	V3
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesus	Institución Educativa San José de la Salle SEDE A	Colegio Bilingue la Consolata
Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolivar	Institución Educativa Comuneros	Institución Educativa Politécnico SEDE A
Colegio Federico Ozanam	Colegio Militar General Santander	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA
Institución Educativa Provenza - Sede A	Institución Educativa Club Unión SEDE A	Institución Educativa Jose Celestino Mutis
Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A	Colegio Gimnasio San Sebastián	Institución Educativa La Juventud Sede A
Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia	Colegio Bilingue Divino Niño	Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A
Colegio de Santander SEDE A	Colegio La Salle Bucaramanga	Institución Educativa Luis Carlos Galan Sarmiento
Universidad Industrial de Santander	Institución Educativa INEM Custodio García Rovira SEDE A	Institución Educativa Promoción Social del Norte SEDE A
Colegio de Santander SEDE E	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C
Colegio Incades	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar		
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A		
Institución Educativa Gabriela Mistral		
Colegio Metropolitano Real de Minas		
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán		

Nota: La tabla representa la ruta en la octava iteración, esta utiliza 3 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 296 minutos (121, 85 y 90 min respectivamente).

Tabla 18. Ruta iteración 9.

V1	V2	V3
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesus	Gimnasio Superior	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A
Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolivar	Colegio Franciscano del Virrey Solis	Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia
Colegio Federico Ozanam	Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E	Institución Educativa Comuneros
Institución Educativa INEM Custodio García Rovira SEDE A	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA	Institución Educativa Politécnico SEDE A
Colegio Bilingue la Consolata	Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor	Escuela Normal Superior de Bucaramanga SEDE A
Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	Colegio de Santander SEDE E	Institución Educativa Club Unión SEDE A
Institución Educativa Jose Celestino Mutis	Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar	Institución Educativa La Juventud Sede A
Colegio La Salle Bucaramanga	Colegio Incades	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C
Institución Educativa San José de la Salle SEDE A	Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis	Institución Educativa Promoción Social del Norte SEDE A
Colegio Metropolitano Real de Minas	Colegio de Santander SEDE A	Institución Educativa Gustavo Cote Uribe
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
	Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A	
	Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A	
	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	

Nota: La tabla representa la ruta en la novena iteración, esta utiliza 3 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 286 minutos (94, 110 y 82 min respectivamente).

Tabla 19. *Rutas iteración 10.*

V1	V2	V3
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesus	Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A	Institución Educativa Andrés Páez de Sotomayor
Institución Educativa Centro Piloto Simon Bolivar	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA	Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis SEDE B
Colegio Federico Ozanam	Institución Educativa Gabriela Mistral	Colegio de la Santísima Trinidad Bucaramanga
Institución Educativa INEM Custodio García Rovira SEDE A	Institución Educativa Técnico Superior Damaso Zapata SEDE A	Institución Educativa de Audición y del Lenguaje Centrabilitar
Colegio Bilingue la Consolata	Colegio Metropolitano Real de Minas	Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A
Colegio Integrado Nuestra Señora Del Divino Amor	Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A	Colegio Incades
Colegio Cafe Madrid	Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E	Institución Educativa Aurelio Martinez Mutis
INSTITUCIÓN EDUCATIVA GUSTAVO COTE URIBE	Institución Educativa Santa Maria Goretti SEDE A	Institución Educativa Bicentenario de la Independencia de la República de Colombia
Institución Educativa La Juventud Sede B	Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán	Institución Educativa Politécnico SEDE A
Institución Educativa Comuneros		Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Institución Educativa Club Unión SEDE A		
Institución Educativa La Juventud SEDE A		
Institución Educativa Santo Angel		
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán		

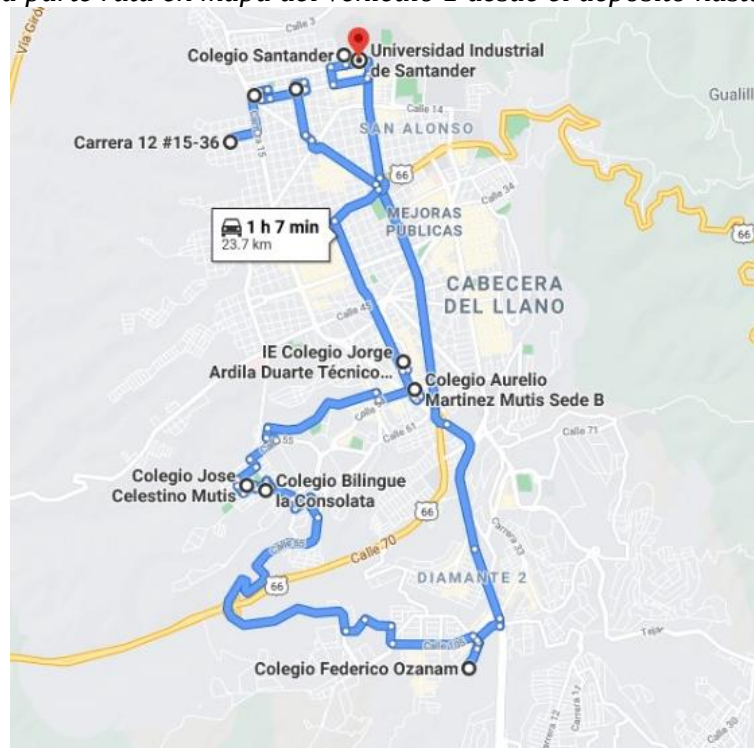
Nota: La tabla representa la ruta en la décima iteración, esta utiliza 3 vehículos para hacer los respectivos recorridos de los albergues seleccionados, con un tiempo total de 290 minutos (141, 81 y 68 min respectivamente).

Como se puede analizar de los resultados, las rutas con el tiempo mínimo corresponden a la quinta iteración. A continuación, se muestra cada vehículo con su respectiva ruta de albergues (nombres) y una figura que señala el recorrido en el mapa de la ciudad de Bucaramanga.

Tabla 20. *Ruta recorrido vehículo 1*

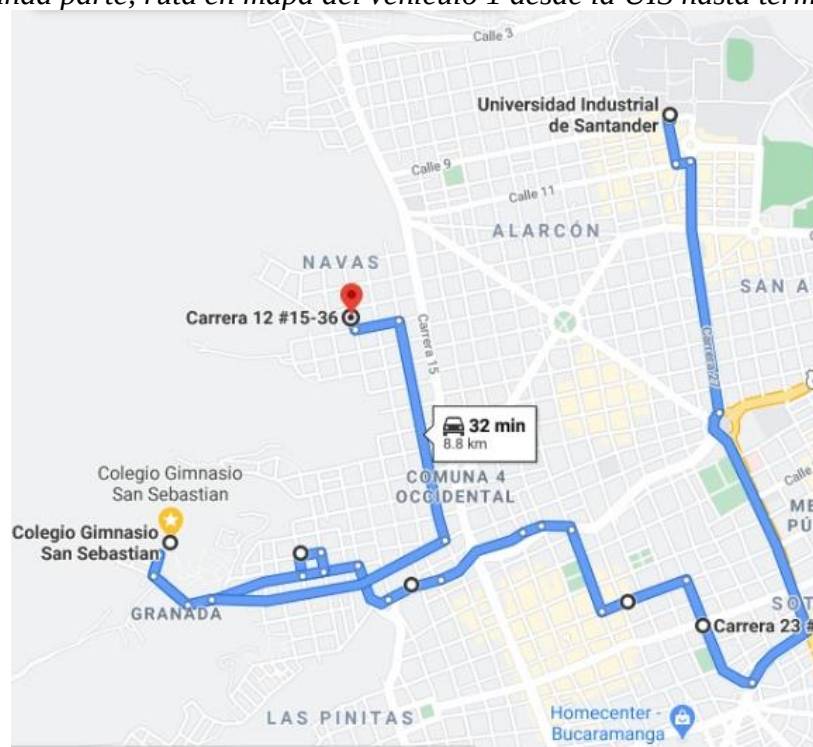
V1
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán
Colegio Del Sagrado Corazón Jesús
Institución Educativa Centro Piloto Simón Bolívar
Colegio Federico Ozanam
Colegio Bilingüe la Consolata
Institución Educativa José Celestino Mutis
Institución Educativa Aurelio Martínez Mutis SEDE B
Institución Educativa Jorge Ardila Duarte SEDE A
Colegio de Santander SEDE A
Universidad Industrial de Santander
Colegio de Santander SEDE E
Colegio Incades
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE A
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela SEDE C
Colegio Gimnasio San Sebastián
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán

Figura 21. Primera parte ruta en mapa del vehículo 1 desde el deposito hasta el albergue UIS.



Nota: figura tomada de mapas de emergencias de Bucaramanga [37]

Figura 22. Segunda parte, ruta en mapa del vehículo 1 desde la UIS hasta terminar el recorrido.

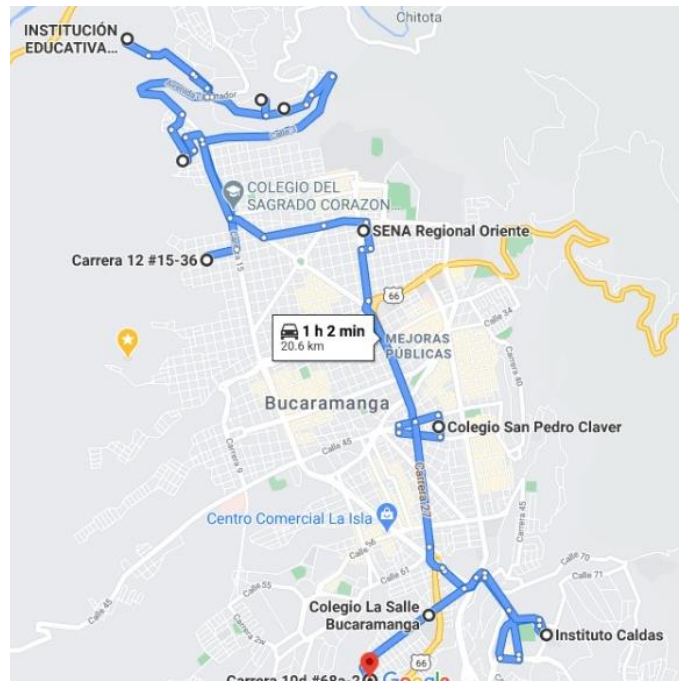


Nota: figura tomada de mapas de emergencias de Bucaramanga [37]

Tabla 21. *Ruta recorrido vehículo 2.*

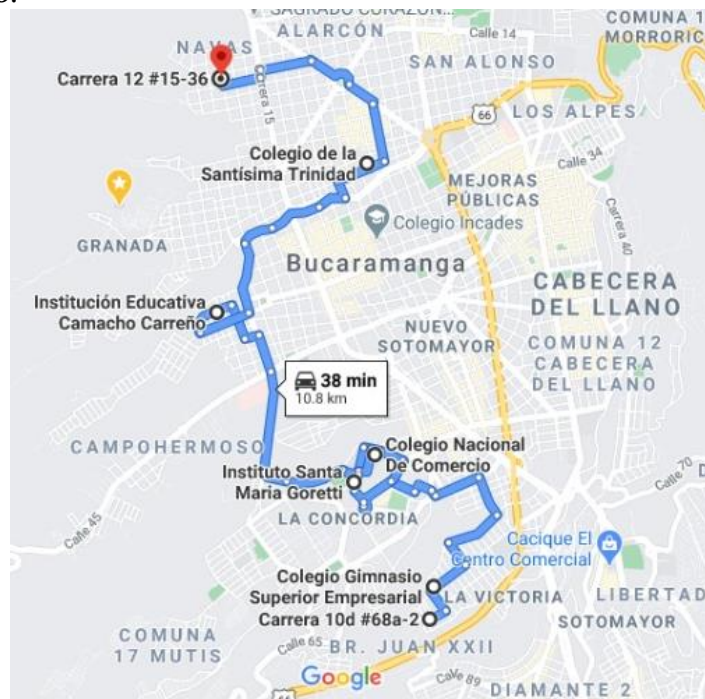
V2
Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán Institución Educativa Club Unión SEDE A INSTITUCIÓN EDUCATIVA GUSTAVO COTE URIBE Institución Educativa La Juventud Sede B Institución Educativa Promoción Social del Norte SEDE A Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Colegio San Pedro Claver Colegio Caldas Institución Educativa San José de la Salle SEDE A Institución Educativa Nuestra Señora del Pilar SEDE E Gimnasio Superior Institución Educativa Santa María Goretti SEDE A Instituto Técnico Nacional de Comercio SEDE A Institución Educativa Camacho Carreño Colegio de la Santísima Trinidad Bucaramanga Depósito - carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán

Figura 23. Primera parte ruta en mapa del vehículo 2, desde el deposito hasta Nuestra Sra. del Pilar sede E.



Nota: figura tomada de mapas de emergencias de Bucaramanga [37]

Figura 24. Segunda parte, ruta en mapa del vehículo 1, desde Nuestra Sra. del Pilar Sede E hasta terminar el recorrido.



Nota: figura tomada de mapas de emergencias de Bucaramanga [37]

El algoritmo ha calculado el tiempo y distancias con base a los datos que brinda Google Maps. La ruta inicia y termina en el depósito ubicado en la carrera 12 # 15 – 36 en el barrio Gaitán, cabe resaltar que el vehículo pasa una única vez por cada albergue asignado en su ruta.

Tabla 22. *Número de albergues habilitados en cada iteración.*

Iteración	Número de albergues habilitados
1	32
2	33
3	29
4	32
5	28
6	31
7	31
8	32
9	33
10	30

10. Conclusiones

Los objetivos propuestos en el algoritmo memético para la localización de albergues y rutas de distribución de recursos humanitarios para el post-desastre en la ciudad de Bucaramanga se han cumplido satisfactoriamente arrojando resultados acordes a lo planteado.

La representación de la solución del algoritmo memético y los resultados permite una rápida y excelente comprensión.

La técnica de inicialización del algoritmo genético propuesta para la diversificación de las soluciones en la población inicial fue favorable esto con el objetivo de evitar una convergencia prematura, al no generar una respuesta con un óptimo local. Dicha técnica se diseñó usando la combinación de aleatoriedad con la heurística del vecino más cercano.

En la literatura se encontró que la heurística del vecino más cercano proporciona óptimos resultados; en el desarrollo del proyecto se evidenció que al utilizar la heurística en la etapa del algoritmo genético arroja los resultados esperados, ya que nos ayuda a encontrar los albergues más

cercanos entre sí; sin embargo, puede resultar contraproducente debido a que en la búsqueda del más cercano puede extender la ruta generando así que esta sufra un incremento en el tiempo de recorrido.

Otra desventaja que se evidencio de la heurística del vecino más cercano en el desarrollo del proyecto fue que las soluciones se encuentran muy restringidas (o limitadas) en el algoritmo genético, es decir, en la etapa del algoritmo memético no genera cambios, ya que no mejora los resultados en el algoritmo genético como se esperaba (mantiene las mismas rutas).

El problema está diseñado para localizar albergues relacionando la capacidad con la demanda de los afectados por la catástrofe; siguiendo la heurística del vecino más cercano el vehículo debe seguir la ruta con el vecino más próximo, sin embargo, si la demanda del albergue más cercano es superior a la capacidad del vehículo, no se asigna dicho albergue a la ruta y procede a buscar otro albergue que si cumpla con la relación demanda capacidad, esto se puede observar en los resultados al encontrar la asignación de algunos albergues lejanos entre sí dentro de la misma ruta.

La construcción de un red de transporte para la distribución de recursos humanitarios en un escenario post-desastre sísmico en la ciudad de Bucaramanga resulta una herramienta importante en la toma de decisiones y así disminuir el impacto generado por dicho fenómeno, sin embargo, en el desarrollo del proyecto de investigación se evidenció la carencia de información con respecto al estudio de zonificación sísmica de la ciudad de Bucaramanga, por lo tanto, no es posible agregar detalles importantes en la realización de la red, por ejemplo, cuáles son las vías con mayor vulnerabilidad, cuál sería la magnitud del daño en las vías, etc.

El proyecto de investigación propuesto de localización y ruteo para distribución de recursos humanitarios en la ciudad de Bucaramanga ha arrojado soluciones óptimas que pueden contribuir

al PMGRD (Plan municipal de gestión del riesgo de desastre de la ciudad de Bucaramanga) que se encuentra vigente actualmente.

El proyecto de grado representó un reto académico debido a que en su desarrollo implementamos y reforzamos conocimientos y habilidades adquiridas en el trayecto de la formación académica, entre esos se ha aplicado en puntos como el planteamiento del modelo matemático, el diseño del algoritmo y el lenguaje de programación utilizado que involucró conocimiento de diferentes áreas de la ingeniería industrial.

11. Recomendaciones

El código del algoritmo utilizado en este proyecto de investigación queda abierto al público para que se use en el desarrollo de otros escenarios y para su libre modificación, con el fin de facilitar las soluciones en distintos escenarios.

Para futuras investigaciones con problemas de LRP o de tipo NP-Hard se sugiere trabajar con metaheurísticas o algoritmos híbridos más agresivos y así evitar posibles soluciones que converjan en óptimos locales.

Es necesario mejorar el diseño de escenarios que incluyan parámetros más reales, confiables y actualizados de las variables que participan en el problema.

Adaptar esta investigación a otras ciudades donde el escenario de prueba sea de igual a mayor amenaza natural.

Referencias

- [1] A. Campos G., N. Holm-Nielsen, C. Díaz G., D. M. Rubiano V., C. R. Costa P., F. Ramírez C. y E. Dickson, *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*, Bogotá, 2012.
- [2] J. G. Concha Sánchez y C. A. Amaya Corredor, *Análisis de las condiciones de entorno próximo, que hacen posible la ocurrencia de factores causales de desastres.*, Manizales, 2013.
- [3] R. Rocha, S. Jaramillo, J. Tovar, L. García, L. Salazar y O. Saboyá, *Informalidad de la vivienda y el suelo en Bucaramanga y Cartagena*, Bogotá, 2006.
- [4] Alcalde Municipio de Bucaramanga, *Plan municipal de gestión del riesgo de desastre, PMGRD de Bucaramanga*, Bucaramanga, 2013.
- [5] U. N. p. l. G. d. R. d. Desastres, *Manual de Logística para la Atención de Emergencias*, Bogotá, 2013.
- [6] J. P. Garcia Sabater, *Modelado mediante Optimización Combinatoria*, 2006.
- [7] M. A. H. Laguado, «Tangara UIS,» 2017. [En línea]. Available: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2017/170623.pdf>. [Último acceso: 08 08 2019].
- [8] A. Cortez, «Teoría de la complejidad computacional y teoría de la computabilidad,» *RISI - Revista de investigación de Sistemas e Informática*, pp. 102-105, 2004.
- [9] C. E. Maldonado, «Un problema fundamental en la investigación: Los problemas P vs $\pm$ NP*,» *Revista LOGOS CIENCIA & TECNOLOGÍA*, vol. 4, n° 2, pp. 10-20, 2013.
- [10] F. J. Díaz Delgadillo, *Planificación óptima discreta para problemas NP-Completo mediante algoritmos inmunológicos artificiales*, Tijuana, México, 2011.

- [11] V. Y. Piqueras, «Universidad Politécnica de Valencia,» 10 09 2014. [En línea]. Available: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/09/10/optimizacion-combinatoria/>. [Último acceso: 03 08 2019].
- [12] L. B. Rocha Medina, E. C. Gónzales La Rota y J. A. Orjuela Castro, «Universidad Distrital Francisco José de,» 2011. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/4988/498850173004.pdf>. [Último acceso: 03 08 2019].
- [13] A. Olivera, *Heurísticas para Problemas de Ruteo de Vehículos*, Montevideo, Uruguay, 2004.
- [14] D. Soto de la Vega, J. G. Vidal Vieira y E. A. Vitor Toso , «Universidad Nacional de Colombia,» 04 2014. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/496/49630405004.pdf>. [Último acceso: 03 08 2019].
- [15] V. Valenzuela Díaz, *Optimización simultánea del problema de localización y ruteo con flota heterogénea*, Bogotá, 2016.
- [16] E. J. o. O. Research, *Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem*, 3 ed., vol. 176, 2007, pp. 968-977.
- [17] R. Martí Cunqueiro, *Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria*, Valencia, España, 2003.
- [18] R. Martí Cunqueiro, *Algoritmos Heurísticos en Optimización Combinatoria*, Valencia, España.
- [19] J. A. Diego-Más, *Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos. Aportación al control de la geometría de las actividades.*, Valencia, 2006.

- [20] E. Yolis, P. Britos, J. Sicre, A. Servetto, R. García-Martínez y G. Perichinsky, «Repositorio Institucional de la UNLP,» 2003. [En línea]. Available: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/22639/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 28 09 2019].
- [21] F. J. G. Castellano, 14 12 2000. [En línea]. Available: <http://flanagan.ugr.es/oep/node21.html>. [Último acceso: 12 08 2019].
- [22] J. Arranz de la Peña y A. Parra Truyol, «Universidad Carlos III de Madrid,» [En línea]. Available: <https://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/practicas/06-07/05.pdf>. [Último acceso: 28 09 2019].
- [23] Ecured, «ECURED,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Algoritmo_mem%C3%A9tico. [Último acceso: 23 10 2020].
- [24] V. A. Luján Gonzáles, *Logística humanitaria: distribución de recursos en situaciones de desastres hidrometeorológicos en Nuevo León*, Nuevo León, 2015.
- [25] O. P. d. I. Salud, *Logística y gestión de suministros humanitarios en el sector salud*, Washington D.C., 2001.
- [26] C. E. p. A. L. y. e. C. -. C. Naciones Unidas, *El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso*, México, 2005.
- [27] S. V. Ukkusuri y W. F. Yushimito, «LOCATION ROUTING APPROACH FOR THE HUMANITARIAN PREPOSITIONING PROBLEM,» National Science Foundation and the Blitman Career Development Chair.

- [28] A. Ceselli, G. Righini y E. Tresoldi, «COMBINED LOCATION AND ROUTING PROBLEMS FOR DRUG DISTRIBUTION,» *ELSEVIER*, p. 16, 2013.
- [29] ZENG Mingangl, CUI Zengshoul y WU Xiaoyan, «Research on Location-Routing Problem of Relief System Based on Emergency Logistics.,» School of Business and Administration, South China University of Technology.
- [30] C. Prodhon y C. Prins, «A Memetic Algorithm with Population Management (MA|PM) for the Periodic Location-Routing Problem».
- [31] H. Derbel, B. Jarboui, S. Hanafi y H. Chamchoub, «Genetic algorithm with iterated local searchfor solving a location-routing problem,» *ELSEVIER*, p. 7, 2012.
- [32] Guerrero, Prodhon, Velasco y Amaya, «Hyybrid heuristic for the inventory location-routing problem with deterministic demand,» *ELSEVIER*, p. 12, 2013.
- [33] P. A. P. K. S. S. S. S. R. Parija, «Cost Reduction in Reporting Cell Planning Configuration Using Soft Computing Algorithm,» de *Proceedings of the 3rd International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications (FICTA) 2014*, Bhubaneswar, Odisha, India, 2014.
- [34] A. G. A. Monroy, «Tangara UIS,» 8 11 2018. [En línea]. Available: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173637.pdf>. [Último acceso: 24 8 2019].
- [35] P. N. Niño Niño y M. A. Barreto Robles, «Tangara UIS,» 9 11 2016. [En línea]. Available: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2016/165444.pdf>. [Último acceso: 31 8 2019].
- [36] E. Maldonado y G. Chio, «Identificación de las zonas sísmicamente mas vulnerables en la ciudad de Bucaramanga,» *UIS Ingenierías* , vol. 4, nº 2, pp. 99-116, 2005.

- [37] «GOOGLE MAPS - MAPA DE EMERGENCIAS BUCARAMANGA,» [En línea]. Available: <https://www.google.com.co/maps/@7.1229675,-73.1342165,14.55z/data=!4m2!6m1!1s12KBhc6C02Z4xFiXX2heEXOA4JZE?hl=es-419&authuser=0>. [Último acceso: 08 02 2021].
- [38] D. A. N. d. Estadística, «DANE,» DANE, 2018. [En línea]. Available: <http://systema59.dane.gov.co/bincol/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CNPVBASE4V2&lang=esp>. [Último acceso: 10 10 2020].
- [39] Organización Panamericana de la Salud, *Albergue Temporal*, Bogotá, 2010.
- [40] A. Idrobo, N. Santos Santos y H. H. Pérez Vega, «Aplicación de algoritmos genéticos como herramienta de optimización en la ubicación de pozos de desarrollo y en el trazado de los canales en yacimientos de depositación fluvial,» *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 3, n° 1, 2005.
- [41] H. Mühlenbein, *Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm*, Germany, 1995.
- [42] M. Gestal Pose, «ResearchGate,» 08 2013. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Marcos_Gestal/publication/237812449_Introduccion_a_los_Algoritmos_Geneticos/links/02e7e520a93bdade8f000000.pdf. [Último acceso: 28 09 2019].
- [43] M. Gestal, D. Rivero, J. R. Rabuña, J. Dorado y A. Pazos, «Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.galeon.com/dantethedestroyer/algoritmos.pdf>. [Último acceso: 28 09 2019].
- [44] F. S. Caparrini, «Fernando Sancho Caparrini,» 04 11 2019. [En línea]. Available: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=65>. [Último acceso: 16 04 2020].

- [45] M. Gestal, «Sabia TIC,» [En línea]. Available: <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/AAGGtutorial/node10.html>. [Último acceso: 16 04 2020].
- [46] B. Hopkins y J. Skellam, «México Documents,» [En línea]. Available: <https://vdocuments.mx/a-new-method-for-determining-the-type-of-distribution-of-plant.html>. [Último acceso: 03 2020].