

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) 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.

**Un algoritmo PSO para el problema de suministro de agua potable ante un desastre en la
ciudad de Bucaramanga**

Cristian Miguel Yate Jauregui

Director:

Karin J. Aguilar Imitola

Universidad Santo Tomás Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Industrial

2020

Dedicatoria

A Dios, por sus bendiciones, por ser mi guía y fortaleza.

A mis abuelos, por su esfuerzo, cariño y apoyo por cumplir mis sueños.

A mi mamá, que desde el más allá sigo sintiendo su amor.

A Viviana Cortes, por ser mi compañera de chocoaventuras y permitirme soñar juntos.

Agradecimientos

A Dios por permitir la finalización de mis estudios y este proyecto.

A mis abuelos por el constante apoyo durante toda la carrera.

A la Msc Karin Aguilar por su paciencia, dedicación, tiempo y todo el apoyo para la culminación de este proyecto.

A el Msc Javier Hernández Cáceres más que un docente, un amigo al cual le agradezco sus enseñanzas.

Contenido

Introducción	14
1. Generalidades del problema	17
1.1. Definición del problema.....	17
1.1.1. Descripción del problema.	17
1.2. Formulación del problema	19
1.3. Justificación.....	19
2. Objetivos.....	21
2.1. Objetivo general.	21
2.2. Objetivos específicos.....	22
2.3. Metodología	22
3. Marco referencial.....	24
3.1. Marco teórico	24
3.1.1. Logística humanitaria.....	24
3.1.2. Actores involucrados en logística humanitaria.	25
3.1.3. Optimización combinatoria.....	26
3.1.4. Complejidad computacional.	27
3.1.5. Métodos de solución para un Problema de Rutas de Vehículos.	29
3.1.6. Problema de ruteo de vehículos.	35
3.1.7. Modelo matemático para ruteo de vehículos.	36

3.1.8.	Algoritmo optimización por enjambre de partículas PSO.	37
3.2.	Marco conceptual	39
3.2.1.	Desastres.	39
3.2.2.	Logística post desastre.	40
4.	Revisión de la literatura.....	41
5.	Modelo matemático para el problema de distribución de agua en situación de desastre en la ciudad de Bucaramanga	47
5.1.	Conjuntos	47
5.2.	Índices	48
5.3.	Parámetros.....	48
5.4.	Variables.....	48
5.5.	Función Objetivo.....	49
5.6.	Restricciones	50
6.	Descripción del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO)	50
6.1.	Representación de la solución	54
6.1.1.	Codificación de la ruta.....	54
6.1.2.	Dedicación de la ruta.	57
7.	Red de Distribución.....	58
7.1.	Análisis del mapa	58
7.1.1.	Amenazas naturales.	59

7.1.2.	Comunas.	59
7.1.3.	Albergues.	62
7.1.4.	Camiones cisterna.	67
7.1.5.	Hidrantes.	69
8.	Resultados.....	72
8.3.	Vehículo 2	78
9.	Conclusiones.....	83
10.	Recomendaciones	84
	Referencias Bibliográficas	86

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Descripción de modelo de logística humanitaria de los actores involucrados para la gestión. Adaptado Mimi Suriani et al. (2016).....	26
<i>Figura 2.</i> Árbol de búsqueda de las soluciones parciales, adaptado de “Estudio comparativo de diversos métodos de solución del problema del agente viajero (PAV)”. Adaptado de Castañeda Roldán Carolina Yolanda, 2000.....	30
<i>Figura 3.</i> Movimiento de una partícula a través del espacio. Adatado de “PSO: Optimización por enjambres de partículas” por Sancho Caparrini F (2019).....	38
<i>Figura 4.</i> Etapas de la Optimización por Enjambre de Partículas. Adatado de “Diseño de un modelo para la solución del problema de ruteo de vehículos refrigerantes y de tipo general para la entrega de productos perecederos”. Adaptado de Helman E Hernández Riaño et al.	53
<i>Figura 5.</i> Señalización de las amenazas naturales cercanas a Bucaramanga. “Adaptado de un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos postdesastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga” de A. R. Barrera Navarro Y A. P. Hernandez Gomez (2016).	59
<i>Figura 6.</i> Señalización geográfica de las comunas en Bucaramanga. Adaptado “Un Algoritmo Mimético Para El Problema De Localización-Ruteo Con Ventanas De Tiempo Para La Atención De Desastres Sísmicos En La Ciudad De Bucaramanga” de M. A. Barreto Robles Y P. N. Niño Niño (2016).....	60
<i>Figura 7.</i> Icono usado para definir los albergues en el mapa político de Bucaramanga.	62
<i>Figura 8.</i> 125 albergues ubicados en el mapa de Bucaramanga.....	63
<i>Figura 9.</i> Ubicación de los albergues por comuna con mayor vulnerabilidad.	63
<i>Figura 10.</i> Jerarquía en necesidad de agua. Adaptado de Abraham Maslow.....	65

<i>Figura 11.</i> Hidrantes Del Área Metropolitana De Bucaramanga. Información Obtenida Del Acueducto Metropolitano De Bucaramanga AMB (2020).....	70
<i>Figura 12.</i> Hidrantes tipo Milán utilizados en el caso de estudio. Información Obtenida Del Acueducto Metropolitano De Bucaramanga AMB (2020).....	71
<i>Figura 13.</i> Escala de Mercalli para la simulación de escenario en caso de estudio.	72
<i>Figura 14.</i> Ubicación de los albergue e hidrantes en la simulación. Imagen obtenida del algoritmo PSO.	73
<i>Figura 15.</i> Ruta optima programa para el vehículo 0. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	74
<i>Figura 16.</i> Demanda de agua para cada cliente del vehículo 0. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	76
<i>Figura 17.</i> Ruta optima programa para el vehículo 1. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	77
<i>Figura 18.</i> Demanda de agua para cada cliente del vehículo 1. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	78
<i>Figura 19.</i> Ruta optima programa para el vehículo 2. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	79
<i>Figura 20.</i> Demanda de agua para cada cliente del vehículo 2. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	80
<i>Figura 21.</i> Ruta optima programa para el vehículo 3. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	81
<i>Figura 22.</i> Demanda de agua para cada cliente del vehículo 3. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.	82

Figura 23. Porcentaje de albergues visitados. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google. 83

Lista de tablas

Tabla 1. <i>El Resumen de los actores de la logística humanitaria.</i>	25
Tabla 2. <i>Ejemplo de Codificación.</i>	54
Tabla 3. <i>Rutas establecidas por el ejemplo.</i>	55
Tabla 4. <i>Ejemplo de conversión de las soluciones a una partícula.</i>	56
Tabla 5. <i>ROV de una partícula a una codificación de permutación.</i>	57
Tabla 6. <i>Amenazas naturales presentes en las comunas de la ciudad de Bucaramanga.</i>	61
Tabla 7. <i>Nombre del albergue, capacidad de personas que pueden ayudar y demanda de agua necesaria.</i>	65
Tabla 8. <i>Características de los camiones tipo cisterna del Cuerpo Oficial de Bomberos Bucaramanga y Cuerpo de Bomberos voluntarios de Floridablanca.</i>	68
Tabla 9. <i>Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo 0.</i>	75
Tabla 10. <i>Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo 1.</i>	77
Tabla 11. <i>Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo 2.</i>	79
Tabla 12. <i>Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo 3.</i>	81

Resumen

Al momento de la catástrofe, existe la posibilidad de que lugares puedan ser aislados y tengan dificultades para recibir los artículos de socorro debido a destrucción de vías de acceso. Por lo tanto, la presente investigación propone un modelo de programación de suministros de agua establecido para la ayuda en las áreas vulnerables en desastres y con pocos recursos, con el fin de reducir el tiempo promedio de respuesta en la distribución agua potable para damnificados. Se adopta por un algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) para resolver el modelo teniendo en cuenta la dificultad del problema se ruteo (VRP) con el que se busca suplir la operación de ayuda humanitaria.

Palabras clave: Logística humanitaria, Alivio, Después del desastre, PSO, VRP.

Abstract

At the time of the disaster, there is a possibility that sites may be isolated and have difficulty receiving relief items due to destruction of access roads. Therefore, this research proposes a water supply programming model established to help vulnerable areas in disasters and with few resources, in order to reduce the average response time in the distribution of drinking water for victims. It is adopted by a particle swarm optimization algorithm (PSO) to solve the model taking into account the difficulty of the routing problem (VRP) with which it seeks to supply the humanitarian aid operation.

Key words: Humanitarian logistics, Relief, Post-disaster, PSO, VRP.

Introducción

Desafortunadamente los países andinos cuentan con una larga lista de ocurrencia debido a su geografía (la cordillera de los Andes) y a sus acontecimientos históricos. Colombia es el país con mayor tasa de desastres en América Latina, según el Departamento Nacional de Planeación (DNP). Solo en los últimos años en el país se han presentado más de 21.594 emergencias solo por eventos de origen natural. Se han visto casos desafortunados e impactantes que han llenado de tristeza e impotencia el corazón de la nación. Los casos más impactantes han sido:

- **Avalancha de Armero (1985):** Lo más duró de afrontar en esta tragedia fue que estaba anunciada. Casi un año antes del fatídico 13 de noviembre de 1985, geólogos habían alertado sobre una posible avalancha por la actividad que se presentaba en el nevado del Ruiz. Cuando aún el país no salía del asombro por la toma del Palacio de Justicia, el volcán Nevado del Ruiz expulsó gases y materiales que derritieron una capa de nieve que produjo una avalancha que siguiendo el cauce del río Lagunilla llegó al segundo municipio de Tolima: Armero. La localidad de 40.000 habitantes quedó cubierta por el lodo y demás materiales que arrastró del volcán, en la peor tragedia natural en la historia del país. Aproximadamente 25.000 habitantes que dormían esa noche quedaron sepultados. El resto de la población del casco urbano, aproximadamente 15.000, quedaron damnificados [1].

- **El terremoto de Cúcuta de 1875 o Terremoto de los Andes:** ocurrió el 18 de mayo de 1875 a las 11:15:11 a. m. y tuvo de magnitud Mb 7,3. Su epicentro fue la ciudad de Cúcuta, sin embargo, también afectó a los municipios del Área Metropolitana de Cúcuta, así como al vecino estado venezolano de Táchira [2].

En este día la ciudad de Cúcuta (así como los municipios metropolitanos de Villa del Rosario, Los Patios, San Cayetano y El Zulia) y los vecinos pueblos venezolanos de San Antonio del Táchira y Capacho fueron destruidas totalmente por este terremoto. Además, causó graves daños en algunas poblaciones colombianas como Ocaña y Pamplona e igualmente poblaciones venezolanas como San Cristóbal, La Mulera, Rubio, Michelena, La Grita, Colón, entre otras, y fue sentido en Bogotá y Caracas.

Sobre el número de víctimas hay algunas exageraciones, algunos dicen que hubo unos 3.000, otros dicen que la lista de muertos en solo Cúcuta era de 900 a 1.000. Sin embargo el número de cadáveres sacados de las ruinas y contados fueron: 253, hombres: 208, mujeres total: 461, más no se contabilizaron los muertos de las poblaciones vecinas en un radio de 80 km, que quedaron sepultados bajo los escombros de las casas, poblaciones como la Villa del Rosario, San Luis, Arboledas, Salazar de Las Palmas, Gramalote, Bochalema; y San Faustino en Colombia y de San Antonio, Capacho, San Cristóbal, La Mulera, Rubio, Michelena, La Grita, Colón en Venezuela cayeron las casas y hasta a más de 100 km de distancia como en Chinácota y más allá de Mérida hubo grandes daños además fue sentido a gran distancia como en Bogotá y Caracas, donde fue sentido como un sismo de mediana intensidad que alarmó a sus pobladores [3].

- **Tragedia en el Playón (1979):** Las aguas del río Playón, sobrepasan los 10 metros de altura de su nivel normal, arrasaron con el municipio el Playon. Gigantescos troncos sembraron pánico, terror y muerte. El drama que se vivió allí es uno de los más impresionantes que hayan sucedido en Santander en los últimos decenios. Se estima que el número de muertos pasaría de 500. Cadáveres y aullidos de perros, dentro de un dantesco espectáculo [4].

- **La Explosión de Cali (1956):** En el centro de Cali, provocado por la explosión repentina de seis camiones militares acompañados por el ejército que llevaban 1.053 cajas de dinamita

provenientes de Buenaventura cargados con 42 toneladas de explosivo plástico gelatinoso, que se iban a emplear en la construcción de carreteras en el departamento de Cundinamarca. En 1956, Cali contaba con 400 000 habitantes, de los cuales 4 000 fallecieron a causa de la explosión, y otros 12 000 más quedaron heridos [5].

Por consiguiente, en todo momento se ha considerado optar medidas que limiten estos fenómenos (terremotos, erupciones volcánicas, sismos, deslizamientos, inundaciones, etc) [6]; El concepto de Logística Humanitaria nace con el fin de promover a nivel nacional y territorial ayudas con el fin de mitigar el efecto de las catástrofes. Su preparación para respuestas y la recuperación frente a desastres se coordinan para definir diseños de guías, lineamientos y estándares para este proceso [7].

Las organizaciones y entidades gubernamentales constantemente buscan reducir los impactos negativos de los desastres [8]. Mediante el uso de herramientas de optimización y desarrollo de metodologías, se pueden llegar a tomar medidas que puede mejorar la eficiencia en las fases de prevención, respuesta y reconstrucción. actualmente no existe rutas de suministro de agua definida para albergar refugios o centros de atención en Bucaramanga, de esta manera es importante el problema de ruteo de vehículos para distribución de recursos vitales como lo es el agua y optimar la supervivencia de las personas afectadas.

En esta investigación se propone el diseño de un algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) o en español Optimización por Enjambre de Partículas que permita la programación de ruteo de vehículos para llevar a cabo la distribución de agua sujeto a la disponibilidad y capacidad de la oferta y la demanda, minimizando el tiempo de acción después de un desastre natural.

En esta investigación se propone el diseño de un algoritmo PSO (*Particle Swarm Optimization*) o en español Optimización por Enjambre de Partículas que pondrá a prueba el suministro de agua potable en posibles escenarios con diferentes calamidades en la ciudad de Bucaramanga, sujetos a la disponibilidad, capacidad y el tipo de emergencia que se genere.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 1 se presenta la justificación, definición del problema, formulación del problema y los objetivos de la presente investigación; la sección 2 presenta el marco referencial donde se presentan los conceptos y la terminología del proyecto; la sección 3 muestra la formulación del modelo matemático, la sección

4 presenta el diseño del algoritmo; la sección 5 define el estudio de caso de la investigación; la sección 6 muestra los resultados computacionales obtenidos por medio del prototipo de software mediante el modelamiento de un escenario; las secciones 7 y 8 presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas por medio de la investigación.

1. Generalidades del problema

1.1. Definición del problema

1.1.1. Descripción del problema. En las últimas décadas hemos sido testigos a nivel mundial y regional de cambios en el medio ambiente como fenómenos naturales. Ante estas nuevas atmósferas, aumento de desastres, especialmente en nuestro país, es más que oportuna la necesidad de analizar la capacidad metodológica y la gestión de los procesos de valoración, planeación y ejecución de recursos humanitarios [9]. Por ejemplo, Según el Departamento Nacional de Planeación, Santander es la sexta región del país con más víctimas por desastres. Entre los años 2006 y 2014 hubo 1.581 emergencias en el Departamento. Con 195 muertes y 420.405 personas

afectadas, la mayoría de ellas por eventos hidrometeorológicos, siendo la principal causa las inundaciones y los deslizamientos [10].

En situación de post-desastre, el agua se convierte en el bien más importante para la población afectada. La escasez y la contaminación de este recurso tiene consecuencias muy graves sobre la salud pública, así mismo su distribución se debe dar prioridad en las áreas donde han aumentado los riesgos de salud. Debido al entorno impredecible, dentro de las actividades de gestión de desastre es necesario el desarrollo de herramientas flexibles y robustas que permitan tomar decisiones ágiles y correctas para la distribución del agua [11].

La responsabilidad en primera instancia para coordinar y suministrar ayudas humanitarias a víctimas se expide sobre en el Estado Colombiano [12], quien contemplan planes de acción para eventos de emergencia con ayuda de organizaciones como La Unidad Nacional de Gestión de Riesgo (UNGRD), la ONU, entre otras quien son entidades externas. De este modo Bucaramanga necesita mejorar sus planes para el problema de suministro de agua potable ante un desastre en la ciudad y obtener sistema de respuesta mejorado que facilite la toma de decisiones por medio de herramientas cuantitativas.

Por lo anterior, esta investigación aborda el problema de definir las rutas adecuadas para la distribución óptima en la entrega de agua potable ante una emergencia en la ciudad de Bucaramanga, profundizando el problema de ruteo de vehículos con demanda aleatoria (RDVRP), el cual busca disminuir las distancias recorridas con la finalidad de suplir un número inesperado de afectados.

El RDVRP al ser un problema de tipo NP-Hard, es decir, computacionalmente difícil de resolver, es abordado mediante técnicas heurísticas y metaheurísticas, razón por la cual se tomará un algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO); con el propósito de encontrar una solución

adecuada al problema de distribución en la entrega de agua potable ante un desastre en la ciudad de Bucaramanga.

1.2. Formulación del problema

¿Cuáles son las rutas más adecuadas para el suministro de agua potable ante un desastre en Bucaramanga, generadas mediante el algoritmo PSO?

1.3. Justificación

Según UNICEF (2015), el agua, el saneamiento y la higiene son fundamentales para la supervivencia en las etapas iniciales de una emergencia. "Las personas en emergencias son más susceptibles a las enfermedades y la muerte por enfermedades que a menudo son causadas por la falta de saneamiento, el suministro inadecuado de agua segura y la mala higiene" [13].

Es una necesidad vital proporcionar a cualquier comunidad una cantidad adecuada de agua limpia para estimular el trabajo productivo y ayudar a mejorar la higiene personal, la preparación de alimentos y la atención médica entre los beneficiarios. Proporcionar a los refugiados la cantidad necesaria de agua potable con una alta calidad fomenta el mínimo riesgo para la salud humana [14].

Un diagnóstico consolidado por el Ordenamiento territorial del municipio de Bucaramanga y el Plan Municipal de la Gestión de Riesgos de Desastres PMGRD define que las amenazas de origen natural para el sector urbano del municipio son por sismicidad, por inundación y por deslizamientos. También reconocen que la ciudadanía se encuentra vulnerable debido a que la necesidad de tener una vivienda económica obliga a un porcentaje de la población edificar en zona de amplificación sísmica, causando aumento de número de víctimas y pérdidas económicas [15].

El Nido Sísmico de Bucaramanga, está ubicado a 150 km de profundidad y a 50 km al sur de Bucaramanga en el Cañón del Chicamocha, donde chocan la placa tectónica de Nazca (presenta un

pacífico desplazamiento de 60 a 70 mm al año), la placa Continental de Suramérica (que se desplaza de 15 a 20 mm al año) y la placa del Caribe (con desplazamiento de 20 a 25 mm al año), En el Municipio de Bucaramanga se destacan cuatro fallas reales y una inferida las cuales se distribuyen a lo largo del territorio.

El escenario de riesgo por erosión y remoción en masa de la meseta de Bucaramanga es un fenómeno antiguo y construcción en aquellos lugares ha acelerado tanto el problema, que ha llegado convertirse en una grave amenaza para los habitantes de los sectores de la ciudad. Es causada por la acción directa e indirecta de las aguas lluvias y por la presencia de aguas subterráneas, las cuales favorecen y aceleran el proceso de meteorización, el cual reduce la resistencia de las rocas, ocasionando su desintegración y descomposición.

Las principales zonas que pueden identificarse como de deslizamientos son las siguientes:

- Zona en cercanías a la Quebrada La Flora en su parte Baja.
- Dos puntos existentes en la parte media de la Quebrada El Cacique.
- Dos grandes zonas en inmediaciones de la cabecera de la Quebrada La Aurora.
- Una pequeña zona en la parte media de la Quebrada La Aurora.

Escenarios emergentes por inundaciones han estado asociadas primordialmente, a factores físicos, urbanísticos y de uso del suelo, como el desborde de caños y canales, obstrucción de redes de alcantarillado, Las zonas de inundación encontradas en el área de influencia del municipio de Bucaramanga, son:

- La ribera oriental del Río de Oro, entre la Quebrada La Picha.
- Las riberas, tanto norte como sur, de la Quebrada La Rosita en su parte baja, es decir entre la afluencia de la Quebrada La Joya y su desembocadura en el Río de Oro.

- La ribera norte de la Quebrada La Iglesia.

En las zonas de inundación anteriormente descritas se encuentran barrios y asentamientos humanos susceptibles, también se encuentran asentadas industrias que han ocupado las áreas de protección o aislamiento de las riberas (Rondas de protección hídrica).

En un desastre, es muy difícil prevenir “¿cuándo?”, “¿dónde?” y “¿cuántas son las víctimas?”. Los planes de logística humanitaria tienen un papel importante para reducir y mitigar el impacto a las poblaciones afectadas. Así mismo las acciones para respuesta ante una amenaza expone la necesidad de definir rutas de acceso de recursos como el agua, atiendan a las personas afectadas, disminuyendo el riesgo. Por este motivo, el proyecto busca la implementación de un algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), este método permite optimizar un problema a partir de cuantiosas soluciones posibles, denotadas como "partículas", moviendo éstas por toda la zona de búsqueda según reglas matemáticas. De igual modo mejorando el sistema en logística humanitaria, específicamente en la optimización de rutas para suministrar agua potable y responder de manera oportuna en sectores de emergencia donde los desastres naturales o eventos originados por el ser humano se han generado.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general.

Desarrollar un algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) para el diseño de rutas de suministro de agua potable ante un desastre en la ciudad de Bucaramanga.

2.2. Objetivos específicos.

- Revisar en la literatura la aplicación del modelo de Optimización por Enjambre de Partículas en la gestión de desastres para la solución del problema de ruteo para en la distribución de recursos en catástrofes.
- Construir un modelo matemático para el problema de distribución de agua potable.
- Diseñar un algoritmo enjambre de partículas para la solución del problema de distribución de agua.
- Diseñar la red de transporte para el problema de distribución de agua potable en la fase de post-desastres en Bucaramanga.
- Implementar el algoritmo PSO diseñado en herramientas informáticas de localización.
- Realizar un artículo de carácter publicable donde se documenten los resultados del proyecto.

2.3. Metodología

La metodología que sigue el presente trabajo de investigación se fundamenta una metaheurística que imita el comportamiento de las partículas en la naturaleza llamado enjambre de partículas, se realiza con el fin de disminuir la distancia recorrida por una flota de camiones cisterna de capacidades diferentes para minimizar el tiempo del transporte con ayuda humanitaria, desde el punto de agua (hidrante) hasta los nodos de demanda que se van a establecer en el estudio.

Para la ejecución de este proyecto se llevarán a cabo las siguientes etapas:

Fase 1: Revisión de la literatura.

- Se elige la bibliografía útil sobre algoritmos con enfoque de enjambre de partículas para el problema de ruteo de transporte en situaciones de desastre y el transporte de agua potable a zonas

de desastre a partir de bases de datos con temas multidisciplinarios como Web of Science, Elsevier, Scopues, entre otros.

Fase 2: Formulación de modelo matemático.

- Identificar los parámetros, variables de la función objetivo y las restricciones del problema.
- Establecer los criterios que deben cumplir las rutas.

Fase 3: Diseño del algoritmo PSO.

- Comprender las bases y fundamentos teóricos de los componentes del método de solución PSO y diseñar el algoritmo de solución al problema.

- Diseñar el algoritmo PSO para el problema de suministro de agua potable ante un desastre en la ciudad de Bucaramanga.

- Programar el modelo formulado en la fase anterior, en el software matemático Python.

- Construcción de la red que demuestre los hidrantes con los que cuenta la ciudad para definir los puntos de abastecimiento.

Fase 4: Red de distribución.

- En la segunda fase se establecen los datos necesarios para llevar a cabo la red de transporte, y se realizan las siguientes actividades:

Análisis del mapa: Mediante el uso de herramientas de georreferenciación (My maps de Google) se representa el origen de recorrido (hidrantes) donde el camión cisterna hace su carga del insumo y el destino final (albergues).

Estudio de demanda: Se establece ca cantidad de agua que necesita cada persona y se calcula la capacidad que necesita cada albergue.

Fase 5: Resultados.

- Se ejecuta el programa y se determina si genera resultados válidos y se modela en My maps de Google para comprobar si los resultados son óptimos.
- Concluir acerca de los resultados obtenidos utilizando el algoritmo por enjambre de partículas.

3. Marco referencial

3.1. Marco teórico

3.1.1. Logística humanitaria. La logística humanitaria abarca el proceso de movilización de personas, recursos, habilidades y conocimientos para ayudar a la víctima del desastre. En el proceso humanitario, la logística es el centro de toda la actividad de movilización, ya que sirvió de puente entre la preparación y respuesta ante desastres, la adquisición y la distribución y la sede y el campo. También puede ser una de las partes más caras en la operación de alivio y la efectividad de la operación siempre está siendo monitoreada con el fin de mejorar la operación y minimizar el costo operativo con el máximo de operación del resultado [15]. Por consiguiente, ha tomado un gran impulso como área de estudio, esto a causa del aumento en la frecuencia de desastres naturales a nivel global. Dentro de esta área existe un problema en particular tratado en la literatura, el cual se encuentra relacionado con las ayudas recibidas luego del acontecimiento de un desastre.

Es un área emergente que exige herramientas para respaldar las decisiones adoptadas en condiciones adversas. Aunque algunos estudios proporcionan una visión de varios esfuerzos de recuperación ante desastres, el diseño de modelos para la distribución de ayuda de emergencia teniendo en cuenta varios objetivos no se ha abordado en la literatura hasta hace poco.

Estas obras dedicadas a modelos cuantitativos para la distribución de ayuda humanitaria subrayan que el desarrollo de modelos para computar los atributos más difíciles y relevantes que se ocupan de varios criterios al mismo tiempo es un problema difícil que merece atención. [16]

3.1.2. Actores involucrados en logística humanitaria. Los actores de la logística humanitaria se refieren a las personas u organizaciones que participan en la contribución al proceso logístico humanitario. pueden clasificarse como gobiernos, militares, agencias de ayuda, donantes, organizaciones no gubernamentales (ONG) y empresas del sector privado. Todos los actores tienen responsabilidades y tareas importantes para asegurar que el plan de logística humanitaria sea exitoso y con el costo mínimo. En la Tabla 1, se muestra un resumen de la función de cada responsable de la logística humanitaria y en la Figura 1 muestra el modelo de relaciones humanitarias entre los actores de logística humanitaria.

Tabla 1. *El Resumen de los actores de la logística humanitaria.*

RESPONSABLE	ROL
GOBIERNO	Los activadores de la logística humanitaria, ya que tienen el poder de autorizar operaciones y movilizar recursos
FUERZAS MILITARES	Un responsable muy importante ya que las fuerzas armadas son llamados a proporcionar asistencia primaria, por ejemplo: instalación hospitalaria y de campamento, telecomunicaciones y la reparación de rutas.
DONANTES	Los que dan exclusivamente medios financieros para financiar operaciones de ayuda.
ONG	Dar los apoyos a la operación humanitaria en función de su papel; donantes, coleccionistas o proveedores. Donantes-dar financiero en efectivo para apoyar la operación; colector-recoger el financiero de los clientes, empleados y proveedores para apoyar la operación; proveedor-una empresa que ofrece sus bienes y servicios de forma gratuita.

Nota: Adaptado de “Humanitarian logistics and its challenges: The literature review” por Mimi Suriani et al. (2016).

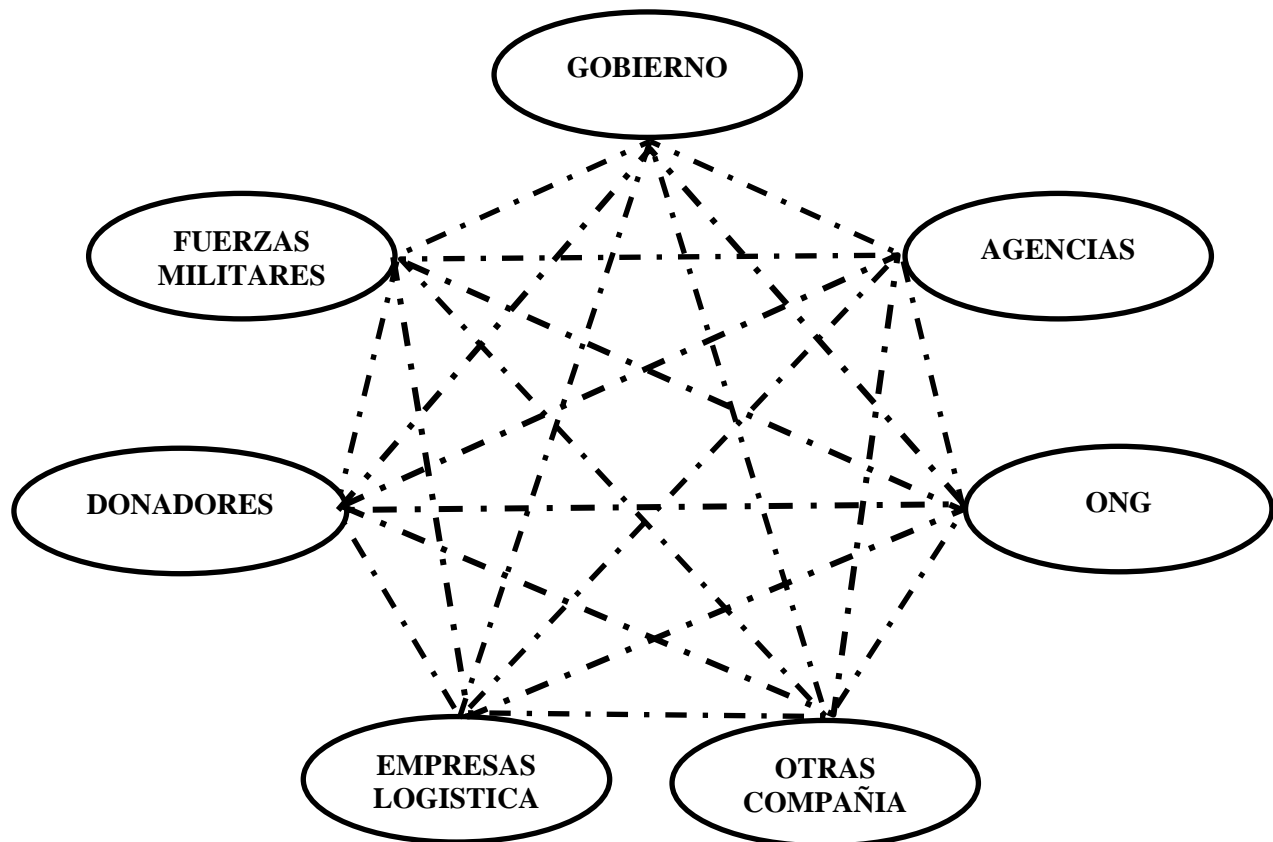


Figura 1. Descripción de modelo de logística humanitaria de los actores involucrados para la gestión. Adaptado Mimi Suriani et al. (2016).

3.1.3. Optimización combinatoria. La optimización combinatoria es una rama de la matemática relacionada con la investigación de operaciones, teoría de algoritmos, investigación de operaciones; en la cual se explota en ámbito de solución de problemas que se creen ser difíciles en general. Los algoritmos de optimización combinatoria se clasifican de acuerdo con su complejidad computacional y permiten verificar si una opción de solución discreta es óptima.

Mediante el estudio de la teoría de la complejidad computacional es posible comprender la importancia de la optimización combinatoria. Los algoritmos de optimización combinatoria se

relacionan comúnmente con problemas NP-hard. Dichos problemas en general no son resueltos eficientemente, sin embargo, varias aproximaciones de la teoría de la complejidad sugieren que ciertas instancias (ej. "pequeñas" instancias) de estos problemas pueden ser resueltas eficientemente. Dichas instancias a menudo tienen ramificaciones prácticas muy importantes [17].

Problema de optimización combinatoria. Un modelo de optimización combinatoria puede definirse de la siguiente manera: [18].

- Un conjunto de variable $X = \{x_1, \dots, x_n\}$.
- Un dominio de variables (D_1, \dots, D_n) .
- Restricción entre variables.

El conjunto de todas las posibles asignaciones faciales es $S = \{s = (X_1, V_1), \dots, (X_n, V_n)\}$

Una función objetivo f para ser minimizada o maximizada. Donde $f: D \rightarrow R^*$

Donde $X_1 \in D_1$ s satisface todas las restricciones.

Así que resolver un problema de optimización combinatoria consiste en encontrar una solución $(s^* \in S)$ tal que, $f(s^*) \leq f(s)$ si se minimiza o $f(s^*) < f(s)$ si se maximiza.

En estos problemas las variables son agrupadas en conglomerados que representan objetos pertenecientes a una red de datos compleja.

3.1.4. 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. Así,

un cálculo difícil requerirá más recursos que uno de menor dificultad. 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. A estos recursos se les puede añadir otros, tales como el número de procesadores necesarios para resolver el problema en paralelo. Si un cálculo requiere más tiempo que otro decimos que es más complejo y lo llamamos complejidad temporal. Por otro lado, si un cálculo requiere más espacio de almacenamiento que otro decimos que es más complejo, en este caso hablamos de una complejidad espacial. Es claro que el tiempo que se requiere para efectuar un cálculo en un computador moderno es menor que el requerido para hacer el mismo cálculo con las máquinas de las décadas pasadas, y seguramente que el tiempo en una máquina de la próxima generación será mucho menor [19].

De esta manera los problemas pueden ser clasificados en problema P y NP-Hard.

Problemas NP. La clase de complejidad P es el conjunto de problemas de decisión que pueden ser resueltos por una máquina determinista en tiempo polinomial. Esta clase corresponden a la idea intuitiva de los problemas que se puede resolver de modo efectivo en los peores casos [20]. “Un problema p es **NP** completo si $p \in NP$ y todos los problemas de clase **NP** pueden ser reducidos a un problema p en un tiempo polinomial, esto implica que son problemas dentro de la clase **NP** difíciles de resolver”.

Problemas NP-Hard. Al demostrar que un problema de optimización combinatoria en problemas de decisión pertenece a la clase NP completa, entonces es NP-Hard. La complejidad computacional determina si todos los problemas no tratables (Problemas NP) podrán llegar a ser tratables (Problemas P). A diferencia de los anteriores los NP-Hard son complejos de resolver [21].

Dentro de los problemas NP-Hard se encuentran los problemas de optimización combinatoria para programación de recursos. Debido a la complejidad, los métodos de optimización exactos no pueden dar ninguna solución óptima dentro de un rango de tiempo, de modo que de unos años para acá se han desarrollado procedimientos que buscan buenas soluciones en tiempo razonable, también llamados métodos aproximados, entre estos se encuentran las heurísticas y metaheurísticas [21].

3.1.5. Métodos de solución para un Problema de Rutas de Vehículos (VPR). Debido a la complejidad computacional de los modelos de optimización, existen diferentes métodos para dar solución a este tipo de problemas. Los métodos se pueden clasificar en: métodos exactos y métodos aproximados.

Métodos exactos. A través de estos se encuentra la solución óptima para cualquier instancia de cualquier problema en un tiempo determinado” [22], no obstante, tiene desventajas cuando se trata de un problema de optimización combinatoria de la clase NP-Hard, el tiempo empleado para dar solución aumenta exponencialmente en relación con la dimensión del problema.

En el caso más general, se asume que la solución a un problema consiste en un vector (a_1, a_2, \dots) de longitud finita pero indeterminada, satisfaciendo ciertas restricciones. Cada a_i es un miembro de un conjunto A_i linealmente ordenado. Así la búsqueda exhaustiva debe considerar los elementos, $A_1 * A_2 * \dots * A_i$ para $i = 0, 1, 2, \dots$, como solución potencial. Primero se inicia con el vector nulo $()$ como la solución parcial, y las restricciones indican cuál de los miembros de A_1 son candidatos para a_1 ; llamado este subconjunto S_1 . Se escoge el menor elemento de S_1 como a_1 , y se tiene ahora la solución parcial (a_1) . En general, las diversas condiciones que describen las soluciones nos indican cual subconjunto S_k de A_k constituye candidatos para la extensión de la solución parcial $(a_1, a_2, \dots, a_{k-1})$ para $(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k)$. Si la solución parcial

$(a_1, a_2, \dots, a_{k-1})$ no admite posibilidades para a_k , entonces $S_k = \emptyset$, y así se regresa hasta el nodo padre y se hace una nueva selección para a_{k-2} , y así sucesivamente [23].

El subconjunto de $A_1 * A_2 * \dots * A_i$ para $i = 0, 1, 2, \dots$, que es buscado es representado como un árbol de búsqueda como sigue. La raíz del árbol (el nivel 0) es el vector nulo. Sus hijos son la selección para a_1 ; y en general, los nodos como el k -ésimo nivel son las selecciones para a_k , dando las selecciones hechas por como indicado por los ancestros de estos nodos. En el árbol presentado en la figura 1 recorrer los nodos hacia atrás como se indica con las líneas punteadas [23].

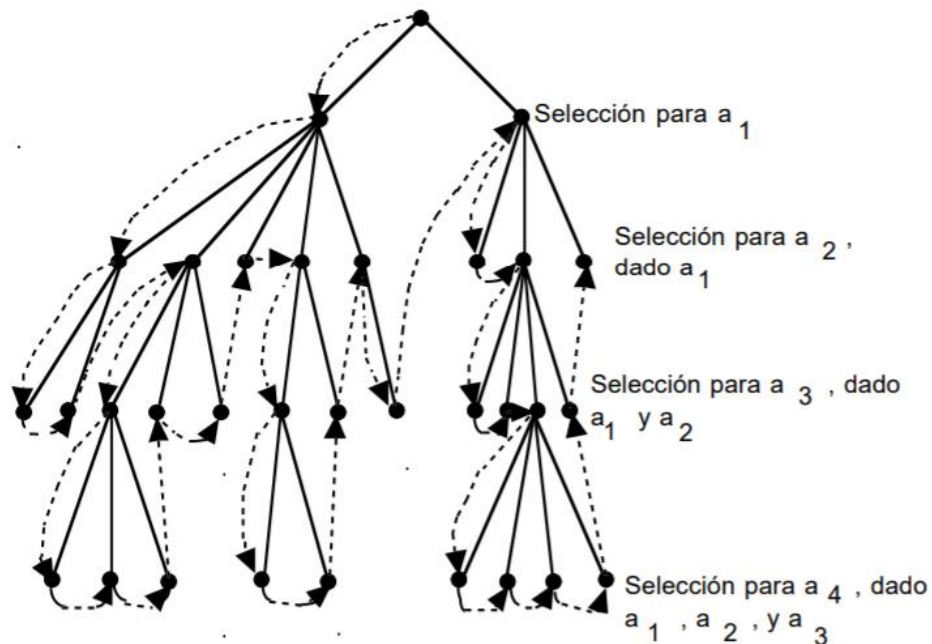


Figura 2. Árbol de búsqueda de las soluciones parciales, adaptado de “Estudio comparativo de diversos métodos de solución del problema del agente viajero (PAV)”. Adaptado de Castañeda Roldán Carolina Yolanda, 2000.

Métodos Aproximados. La dificultad para encontrar una solución aprobada dentro de un tiempo computacional moderado, se han gestionado métodos de solución atractivos que actúan sobre un espacio de búsqueda limitado y generan procedimientos de buena calidad en un tiempo compatible.

Los presentes métodos se pueden clasificar en: heurísticas, metaheurísticas y búsqueda local.

Heurísticas. Un método heurístico es un sistema que saca mayor provecho a un problema, por medio de un conjunto de reglas obteniendo la solución mas cercana a la óptima. Los métodos heurísticos se usan cuando no es posible o no es computacionalmente factible obtener el óptimo.

Este término deriva de la palabra griega heuriskein que significa encontrar o descubrir y se usa en el ámbito de la optimización para describir una clase de algoritmos de resolución de problemas, dio inicio a su desarrollo entre los años 1960 y 1990. Según el libro *The Vehicle Routing Problem* realizado por Paolo Toth y Daniele Vigo en el 2002, las heurísticas se pueden clasificar en 3 amplias categorías.

- **Heurísticas constructivas:** Los métodos de construcción de rutas estuvieron entre los primeros heurísticos para el CVRP y todavía forman el núcleo de muchas implementaciones de software para diversas aplicaciones de ruteo. Estos algoritmos suelen iniciarse a partir de una solución vacía y compilar rutas de forma iterativa insertando uno o varios clientes en cada iteración, hasta que se enruten todos los clientes. Los algoritmos de construcción se subdividen en secuencial y en paralelo, dependiendo del número de rutas elegibles para la inserción de un cliente. Los métodos secuenciales expanden solo una ruta a la vez, mientras que los métodos paralelos consideran más de una ruta simultáneamente. Los algoritmos de construcción de rutas están completamente especificados por sus tres ingredientes principales, a saber, un criterio de inicialización, un criterio de selección que especifica qué clientes se elige para la inserción en la iteración actual y un criterio de inserción para decidir Dónde ubicar a los clientes elegidos en las rutas actuales.

- **Heurística de dos fases:** Los métodos de dos fases se basan en la descomposición del proceso de solución de VRP en los dos subproblemas separados:

Clustering: determine una partición de los clientes en subconjuntos, cada uno correspondiente a una ruta.

Enrutamiento: Determine la secuencia de clientes en cada ruta.

En un cluster – first – route -second método, los clientes se agrupan primero en clústeres y, a continuación, las rutas se determinan mediante la secuenciación adecuada de los clientes dentro de cada clúster. Se han propuesto diferentes técnicas para la fase de clustering, mientras que la fase de ruteo equivale a resolver un TSP.

- Heurística de mejora: Los algoritmos de búsqueda local se utilizan a menudo para mejorar las soluciones iniciales generadas por otras heurísticas. A partir de una solución dada, un método de búsqueda local aplica modificaciones simples, como intercambios de arco o movimientos de clientes, para obtener soluciones vecinas de un costo posiblemente mejor. Si se encuentra una solución de mejora, se convierte en la solución actual y el proceso se IULA; de lo contrario, se ha identificado un mínimo local.

Aunque hemos mencionado el caso de la resolución de un problema difícil, existen otras razones para utilizar métodos heurísticos, entre las que podemos destacar:

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

- El método heurístico se utiliza como parte de un procedimiento global que garantiza el óptimo de un problema. Existen dos posibilidades:

El método heurístico proporciona una buena solución inicial de partida y el método heurístico participa en un paso intermedio del procedimiento, como por ejemplo las reglas de selección de la variable a entrar en la base en el método Simplex [24].

Métodos de búsqueda local. Los algoritmos de búsqueda local utilizan problemas que pretenden encontrar una solución óptima entre un número de soluciones candidatas. Estos algoritmos se mueven de una solución a otra en el espacio de las posibles soluciones (el espacio de búsqueda) mediante la aplicación de cambios locales, hasta que se encuentra la solución considerada óptima o transcurrido un plazo establecido.

La mayoría de los problemas pueden ser formulados en términos de espacio de búsqueda y de destino de varias maneras diferentes [25].

El algoritmo de búsqueda local comienza a partir de una solución candidata, moviéndose, iterativamente, a una solución vecina. Esto solo es posible si se define una relación de vecindad en el espacio de búsqueda. Por ejemplo, el vecino de una solución dada por un conjunto de vértices podría ser otra solución que difiere de la anterior en un nodo. Esto es, si tenemos una solución dada por el conjunto (1 – 3 – 4 – 5), un posible vecino sería el conjunto (1 – 2 – 4 – 5). El mismo problema puede tener múltiples vecinos definidos en él. La optimización local con vecinos que implican cambios hasta k componentes de la solución se refiere a menudo como k -opt [25].

Por lo general, cada solución candidata tiene más de una solución vecina, la elección de cada una se hace tomando solo la información de las soluciones vecinas de la actual, de ahí el nombre de búsqueda local. Cuando la elección de la solución vecina se hace tomando el criterio de

maximización local, la metaheurística toma el nombre de hill climbing. En el caso de que no haya configuraciones de mejora presentes en los vecinos, la búsqueda local se queda atascada en un punto óptimo a nivel local. Este problema de óptimos locales se puede arreglar mediante el reinicio (búsqueda local repetida con diferentes condiciones iniciales), o sistemas más complejos basados en: iteraciones, como la búsqueda local iterada; en memoria, como la optimización de la búsqueda reactiva; simulación de fenómenos físicos, como recocido simulado. La convergencia de la búsqueda local puede llevarse a cabo en un tiempo limitado. Una opción común es terminar cuando no se mejore en un número dado de pasos la mejor solución encontrada por el algoritmo. La búsqueda local es un algoritmo que puede devolver una solución válida incluso si se interrumpe en cualquier momento antes de que termine. Los algoritmos de búsqueda local son algoritmos normalmente de aproximación o incompletos, pues la búsqueda se puede detener, aunque la mejor solución encontrada por el algoritmo no sea la óptima. Esto puede suceder incluso si la convergencia es debida a la imposibilidad de mejorar la solución, como en el caso de que la solución óptima esté lejos de la zona de las soluciones consideradas por el algoritmo. Para problemas específicos, es posible idear vecinos muy grandes, posiblemente de tamaño exponencial. Si la mejor solución dentro de la zona se puede encontrar de manera eficiente, tales algoritmos se denominan, a grande escala, algoritmos de búsqueda vecinales [25].

Algoritmos metaheurísticos. Esta metodología explora de forma eficiente y efectiva el espacio de búsqueda a través del movimiento evitando quedar atrapado en óptimos locales, es decir son una forma inteligente de explorar los espacios de búsqueda. El término metaheurística introducido por Glover, es una guía y cambia otras heurísticas dando soluciones más desarrolladas que las encontradas por el óptimo local, estas a su vez son más fáciles de implementar y necesitan información especial del problema a resolver [26].

3.1.6. Problema de ruteo de vehículos. En la industria y en el sector de servicios, el costo del transporte representa una parte importante del valor final de la mercadería o del servicio brindado. Problemas de Ruteo de Vehículos es el nombre genérico dado a una gran familia de problemas referentes a la distribución de mercadería o personal, búsqueda de información o prestación de servicios, a un conjunto de clientes mediante una flota de vehículos. Los vehículos realizan sus movimientos a través de una red de rutas partiendo de puntos fijos, llamados depósitos. Cada tramo de esta red, que puede ser de una sola mano o de ambas, tiene asociado un costo o tiempo de viaje que puede depender de muchos factores, como por ejemplo del tipo de vehículo o del periodo durante el cual el tramo es recorrido [27].

Algunas de las características más usuales del problema de ruteo de vehículos son:

Cantidad y capacidad de vehículos disponibles. La flota de vehículos puede ser homogénea (vehículos de igual capacidad) o heterogénea. En algunos casos, los clientes tienen restricciones respecto al tamaño del vehículo que los abastece. Por ejemplo, si las rutas de acceso para llegar al cliente no permiten superar cierto peso del vehículo o si no se dispone de un lugar de maniobras suficientemente grande.

Entidad de depósitos. La empresa de distribución puede tener varios puntos de abastecimiento. Cada uno de ellos tiene asociado un posible subconjunto de clientes (o todos) a los cuales abastecer.

Punto de partida y finalización de las rutas. En general, los vehículos tienen que retornar al depósito del cual salieron. En algunas aplicaciones esta exigencia no existe, por ejemplo, si el chofer del vehículo regresa a su casa después de finalizado el reparto sin la necesidad de pasar por el punto del cual partió. Tal es el caso a la salida del colegio, el chofer después de distribuir a los chicos en sus casas no regresa al colegio.

Costo de traslado. Entre un par de clientes, el costo de traslado puede ser fijo, depender de la distancia, del tamaño del camión, etc. [27].

Los objetivos típicos que pueden ser considerados en los problemas de ruteo de vehículos son:

- Minimizar el tiempo total de transporte.
- Minimizar la suma de los tiempos de espera de los clientes.
- Minimizar el número de vehículos utilizados.

3.1.7. Modelo matemático para ruteo de vehículos. El problema de ruteo de vehículos consiste en hallar una serie de rutas de tal manera que se satisfaga la demanda de una cantidad determinada de n clientes distribuidos en una zona geográfica. [28] La suma de las distancias recorridas por los vehículos debe ser la mínima. Cada vehículo parte de un depósito para visitar a los n clientes y debe regresar nuevamente a él, se considera una flota homogénea de vehículos, es decir, todos los vehículos tienen la misma capacidad.

El problema de Ruteo de Vehículo consiste en minimizar cierta función objetivo (f):

$$\min f = \min \sum_{i \in v} \sum_{j \in v} C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Donde $V = \{0, \dots, n\}$ representa el conjunto de vértices en un grafo que finalmente representa a los clientes a visitar. La variable X_{ij} , es una variable binaria que toma el valor de 1 si en la ruta se incluyen los sitios i y j , y cero en caso contrario; el parámetro C_{ij} representan y costo de ir desde el sitio i hasta el sitio j .

Además, se deben cumplir las siguientes restricciones:

$$\sum_{i \in v} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in v \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{i \in v} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in v \setminus \{0\} \quad (3)$$

Las ecuaciones 2 y 3 imponen que exactamente un arco entra y sale de cada vértice asociado con un cliente, respectivamente. Junto a 2 y 3 se cumple otra restricción que se tiene frente al número de vehículos que salen y regresan al depósito:

$$\sum_{i \in v} X_{i0} = K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in v} X_{0j} = K \quad (5)$$

Donde K es el número de vehículos que salen y entran de depósito.

Debido a que los vehículos tienen capacidad finita y cada ruta está constituida por un grupo de clientes que el vehículo visita solo una vez, entonces se necesitan el siguiente conjunto de restricciones.

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{ij} \geq r(s) \quad \forall s \in V, \{0\}, S \neq \emptyset \quad (6)$$

Ésta se denomina restricción de corte-capacidad El número $r(s)$ es el número mínimo de vehículos que se requieren para atender el conjunto de clientes (s).

3.1.8. Algoritmo optimización por enjambre de partículas PSO. En 1995 Kennedy y Eberhart desarrollaron el primer algoritmo de enjambre de partículas para simular el vuelo sincrónico de las aves. Esta propuesta resultó ser un buen algoritmo de optimización para funciones matemáticas no-lineales continuas [29]. Básicamente, PSO trabaja con un conjunto de soluciones candidatas denominado enjambre. Cada miembro del enjambre es una partícula, y esta posee un vector de solución denominado posición. Cada partícula conoce la mejor posición encontrada por el enjambre o mejor global. Si se definen subconjuntos de partículas del enjambre, cada uno de estos se denomina vecindad. Para este caso, cada partícula conoce la mejor posición de su propio vecindario o mejor local. Una vecindad define como las partículas interactúan entre ellas, y

determina como la información se propaga en el enjambre afectando la convergencia del algoritmo [30].

Cada partícula (individuo) tiene una posición, \vec{p} (que en 2 dimensiones vendrá determinado por un vector de la forma (x, y)), en el espacio de búsqueda y una velocidad, \vec{v} (que en 2 dimensiones vendrá determinado por un vector de la forma (v_x, v_y)), con la que se mueve a través del espacio. Además, como partículas de un mundo real físico, tienen una cantidad de inercia, que los mantiene en la misma dirección en la que se movían, así como una aceleración (cambio de velocidad), que depende principalmente de dos características:

- Cada partícula es atraída hacia la mejor localización que ella, personalmente, ha encontrado en su historia (mejor personal).
- Cada partícula es atraída hacia la mejor localización que ha sido encontrada por el conjunto de partículas en el espacio de búsqueda (mejor global).

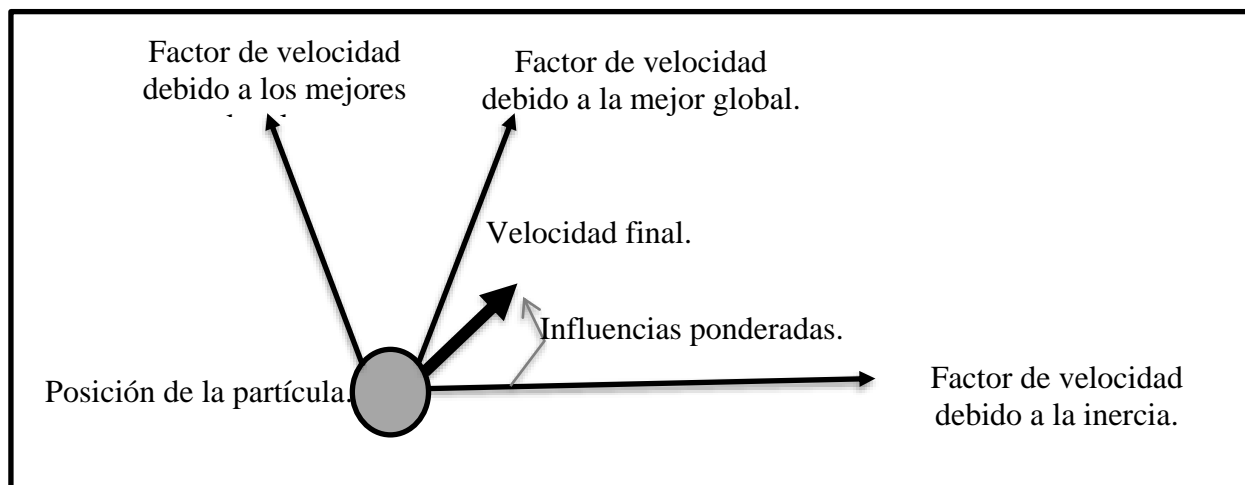


Figura 3. Movimiento de una partícula a través del espacio. Adatado de “PSO: Optimización por enjambres de partículas” por Sancho Caparrini F (2019).

La fuerza con que las partículas son empujadas en cada una de estas direcciones depende de dos parámetros que pueden ajustarse (atracción-al-mejor-personal y atracción-al-mejor-global), de forma que a medida que las partículas se alejan de estas localizaciones mejores, la fuerza de atracción es mayor. También se suele incluir un factor aleatorio que influye en cómo las partículas son empujadas hacia estas localizaciones [31].

3.2. Marco conceptual

3.2.1. Desastres. Los desastres se han presentado de manera recurrente en la realidad colombiana. Desde la conquista por parte de los españoles se encuentran antecedentes de historiadores que revelan como distintos factores naturales y humanos han afectado el normal desarrollo de vida del hombre.

Los desastres son definidos como fenómeno que nos afecta directamente a la persona y/o sectores productivos y que, provocando daños de consideración a la infraestructura física y de servicios, empeoran las condiciones de vida de diversos sectores de la población, alterando su actividad cotidiana.

Hasta principios de la década de los noventa, la práctica en el ámbito de los desastres fue dominada por las actividades relacionadas con la preparación y la respuesta humanitaria. Sin embargo, ante la evidencia del notable aumento en las pérdidas asociadas a los desastres, y el inevitable incremento en la movilización de recursos para la respuesta y la reconstrucción, se ha reconocido paulatinamente la importancia de promover actividades de prevención mitigación, entendidas, en general, como la reducción de riesgos [32].

Paulatinamente se ha llegado a la conclusión de que el riesgo mismo es el problema fundamental y que el desastre es un problema derivado. El riesgo y los factores de riesgo se han convertido en conceptos y nociones fundamentales en el estudio y la práctica en torno a la problemática de los desastres. Dicha transformación en las bases paradigmáticas del problema ha estado acompañada de un creciente énfasis en la relación que los riesgos y los desastres guardan con los procesos y la planificación del desarrollo y, en consecuencia, con la problemática ambiental y la sostenibilidad del desarrollo [33]. Riesgos y desastres ya se visualizan como componentes de la problemática del desarrollo y no como condiciones autónomas generadas por fuerzas exteriores a la sociedad [34].

La capital santandereana es una ciudad vulnerable frente a los desastres naturales. En el departamento se presentan diferentes tipos de fenómenos naturales o antrópicos como la remoción de masa, deslizamientos, inundaciones o temblores generados porque la Mesa de los Santos es el segundo nido sísmico del mundo después de Afganistán [35].

3.2.2. Logística post desastre.

Caracterización de las evaluaciones de daño. En general, las evaluaciones echas con posterioridad a cada desastre entregan las mismas conclusiones. Ellas se pueden resumir de la siguiente manera:

- Magnitud de los daños y de los efectos generales, siempre son atribuibles a razones humanas (fallas, imprevisión, etc.).
- Los daños y efectos pueden ser previstos con evaluaciones previas.
- Los daños pueden ser mitigados o evitados se establecen criterios adecuados.
- La coordinación durante el manejo de cada emergencia siempre puede ser mejorada.
- Los costos de los desastres son cada vez mayores a lo largo del tiempo.

- Los costos de mitigación son cada vez más altos cuando son incorporados previamente.

Planes de mitigación antes y después de un desastre. La manera más adecuada de disminuir los efectos de un desastre consiste en la elaboración de una serie de medidas destinadas a disminuir los daños, antes que se produzca una emergencia.

Una vez pasado el fenómeno deben realizarse evaluaciones posteriores con la finalidad de tomar las medidas correctivas a futuro. No se debe olvidar la regla básica de los desastres: el después.

4. Revisión de la literatura

Para resaltar los límites del estudio, hay que responder a dos preguntas: ¿Qué es un desastre? ¿Y qué constituye operaciones de desastre?

Según la definición de las Naciones Unidas, desastre se delimita como “un evento catastrófico repentino que causa una seria interrupción del funcionamiento de una sociedad que causa pérdidas humanas, materiales, económicas y / o ambientales generalizadas que exceden la capacidad de la sociedad afectada. para lidiar con el uso de su propio nivel de recursos” [14] y se pueden clasificar según su origen en dos categorías: desastres naturales o desastres causados por el hombre. Por otra parte, Nezh Altay y Walter G. Green III [36] constituyen las operaciones de desastres como el conjunto de actividades que se realizan antes, durante y después de un desastre con el objetivo de prevenir la pérdida de vidas humanas, reduciendo su impacto en la economía, y regresando a un estado de normalidad como operaciones de desastre.

Gracias al desarrollo de acontecimientos, los estudios sobre la prevención anticipada de las consecuencias ante catástrofes son primordiales, pero contienen falencias debido al comportamiento imprevisto de la naturaleza o las guerras.

Para hacer frente a estas complejas situaciones de desastre, se han realizado diversos tipos de estudios en el campo de la ingeniería industrial, investigación de operaciones, ciencias de la administración y ciencias de la computación, logística humanitaria, entre otros [36].

Se explica "respuesta de emergencia" como respuesta a eventos catastróficos y de desastre, no considerando la respuesta diaria de los departamentos de ambulancia, policía o bomberos a las llamadas rutinarias de emergencia [37].

Existe un acuerdo general de que existe una clara demarcación entre lo que se denomina "emergencias rutinarias" [38] o "emergencias cotidianas" [39] y emergencias, desastres y catástrofes más graves. Se considera que las emergencias, los desastres y las catástrofes importantes son un continuo de eventos que pueden denominarse genéricamente desastres. Un evento rutinario se maneja típicamente con los recursos de una sola agencia gubernamental, o recursos parciales de varios, usando procedimientos estándar, y con mínima dislocación.

Es fundamental entender que una situación se convierte en un desastre, cuando alguien autorizado por un ente gubernamental, confirma al pueblo alerta de catástrofe. Un ejemplo son las declaraciones de Estados en emergencia y desastre; Los actos políticos y jurídicos con requisitos y autoridades específicos (véanse las disposiciones del Manual de Logística para la Atención de Emergencias como ejemplo *Unidad Nacional para Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD – Colombia, 2013*) [40]. Los enfoques jurídicos de las definiciones de desastres se centran en la identificación de eventos específicos que causan desastres, de la misma forma que lo hace la IFRC (Federación Internacional de Sociedades de la Cruz Roja y de la Medialuna Roja), y en calificar la reacción gubernamental basada en las autoridades del titular de la oficina que invocan una respuesta.

Owusu-Kwateng et al. [41] desarrollaron un marco que se centra en todos los actores en un desastre para el análisis de las operaciones logísticas de socorro incorporadas con la efectividad de la gestión del inventario para evaluar el desempeño de la logística de socorro en un desastre en Ghana.

Consideramos los dos grandes tipos de actividades que las organizaciones de ayuda humanitaria y las ONG [42] participan. El primer tipo son las actividades de socorro, “actividades a corto plazo”: estas actividades se centran en proporcionar bienes y servicios a las víctimas de emergencias a gran escala para minimizar los riesgos inmediatos para la salud humana y la supervivencia. Mientras que el segundo tipo es las actividades de desarrollo, “ayuda a largo plazo”: estas actividades se centran en proporcionar autosuficiencia y sustentabilidad a una comunidad afectada, incluyendo el establecimiento de transporte permanente y confiable, atención sanitaria, vivienda y alimentación [43].

Varios estudios han investigado la distribución de alivio. Este tipo de distribución proporciona alimentos, medicinas, refugios, fuerza de trabajo, saneamiento y otros recursos de socorro relacionados a las personas afectadas [44]. Un número de investigadores han estudiado la distribución de ayudas de socorro en general, donde se centran en la optimización del flujo de múltiples suministros a través de las redes de distribución. Por ejemplo:

Safeer et al. [45] revisaron los parámetros de modelado para las funciones objetivas y las limitaciones en la distribución logística humanitaria. Su investigación se centra en aumentar el suministro de ayuda de socorro.

Cuando se centraron en el transporte de equipos y numerosos suministros humanitarios [46] con el fin de ayudar y proporcionar alivio a las víctimas. Dado que las soluciones óptimas para una formulación de este tipo pueden lograrse solo en casos de tamaño muy pequeño, desarrollaron un

algoritmo genético eficiente para tratar situaciones realistas. Este algoritmo produce soluciones casi óptimas en tiempos de cómputo relativamente cortos y es lo suficientemente rápido como para ser utilizado de manera interactiva en un sistema de apoyo a las decisiones, proporcionando planes de transporte de alta calidad a los administradores de emergencias.

Oh y Haghani [47] , [48] definieron planes de programación detallados para transportar varios suministros desde múltiples puntos de suministro en una operación de alivio de desastres, con la suposición de que las cantidades de suministro son conocidas.

Barbarosoglu y arda [49] desarrollaron un modelo de programación estocástica de dos etapas basado en escenarios para la planificación del transporte en respuesta a desastres. Elaboraron una formulación de flujo de red multimodal multi-Commodity para describir el flujo de material en una red de transporte urbano.

Özdamar et al. [50] abordaron un problema logístico de emergencia para distribuir múltiples productos a los centros de distribución cerca de las zonas afectadas. En el contexto de la logística de emergencia, el suministro está disponible en cantidades limitadas. La demanda de productos básicos se conoce con certeza en la fecha actual, pero se puede pronosticar para fechas futuras. A diferencia de los entornos comerciales, los vehículos no tienen que regresar a los depósitos, ya que la próxima vez que se vuelva a generar el plan, un nodo que recibe productos puede convertirse en un depósito o un depósito anterior puede no tener ningún suministro. Como resultado, no hay recorridos cerrados y los vehículos esperan en su última parada hasta que reciben el próximo pedido del centro de coordinación de logística. Por lo tanto, las órdenes de despacho para vehículos consisten en conjuntos de rutas "rotas" que se generan en respuesta a la oferta / demanda que depende del tiempo.

Falasca y Zobel [51] construyeron un modelo para adquisiciones en socorro humanitario basado en un proceso de decisión estocástica de dos etapas.

Bozorgi-Amiri et al. [52] elaboraron un modelo de programación no lineal entera mixta para diseñar una cadena de suministro para el alivio de desastres. El modelo aborda las incertidumbres en la demanda, el suministro y el transporte. Además, el modelo ayuda a los tomadores de decisiones a determinar la ubicación de los centros de distribución de socorro y la asignación de cada centro a través de la minimización de los costos de ubicación, adquisiciones, transporte, tenencia y escasez, así como la varianza del costo total.

Hay estudios muy limitados sobre la distribución de un solo producto, donde el tipo de suministro de alivio es definitivo. Por ejemplo, se [53] analizaron la distribución de suministros médicos para ser utilizados para la gestión de desastres bajo una amplia variedad de posibles tipos de desastres y magnitudes. Otros autores han estudiado el transporte y la distribución de la ayuda alimentaria [54], [55], [56], [57], [58].

Loo et al. [59] revisaron las tecnologías del agua, incluidas las tecnologías de membrana adecuadas para su uso en emergencias para el abastecimiento de agua potable e [60] implementa un protocolo sobre cómo producir mapas hidrogeológicos con fines humanitarios utilizando datos de teledetección y sistema de información geográfica para obtener aguas subterráneas limpias.

Es esencial que el agua se suministre a la población afectada de una manera eficiente y eficaz y lo antes posible. Los modelos de cobertura son muy exitosos en este sentido; tienen muchas aplicaciones en situaciones de emergencia. Por ejemplo, Rajagopalan et al. [61] desarrollaron un conjunto de varios períodos que cubría el modelo de ubicación para la reubicación dinámica de ambulancias para determinar el número mínimo de ambulancias y sus ubicaciones.

Considerando el suministro de ayuda humanitaria, [62] diseñaron un enfoque de recorrido de cobertura para la ubicación de los centros de distribución por satélite. Además, [63] propusieron un modelo que se puede utilizar para la programación de vehículos que entregarán suministros de los centros de distribución locales a las zonas afectadas por desastres utilizando la distribución de última milla.

El modelo se considera como un modelo de programación entera mixta que incorpora las capacidades del vehículo y las restricciones de tiempo de entrega para entregar los suministros requeridos a las áreas afectadas. El autor señala que buscar un algoritmo más rápido para resolver el modelo puede ayudar a resolver el problema de distribución de la última milla, ya que el problema aumenta en complejidad junto con un aumento en el número de nodos y rutas.

En esta revisión basada en la respuesta inmediata en desastres y logística humanitaria para la programación de suministro de agua en emergencia, se encontró investigaciones que proponen problemas de optimización, basados en geografía donde se han aplicado problemas para la programación tareas basadas en logística de socorro y la toma de decisiones para una respuesta eficaz, eficiente y a tiempo, además el desarrollo de algoritmos realizados con el objetivo de distribuir socorro a damnificados, además la elaboración de diferentes modelos de apoyo de la toma de decisiones correspondiente a las personas encargadas de gestionar el sistema de apoyo y respuesta ante la presencia de una catástrofe.

5. Modelo matemático para el problema de distribución de agua en situación de desastre en la ciudad de Bucaramanga

El problema de enrutamiento del vehículo (VRP) o el problema de enrutamiento del vehículo capacitado (CVRP) a menudo se describe como el problema en el que los vehículos basados en un depósito central deben visitar clientes dispersos geográficamente para cumplir con las demandas conocidas de los clientes. Dejando $G = (V, E)$ ser un gráfico donde $V = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ es el conjunto de vértices (i_1 se refiere al depósito y los clientes están indexados i_2, \dots, i_n) y $E = \{(i_l, i_m): i_l, i_m \in V\}$ el conjunto de bordes. Cada cliente debe ser asignado a uno de los k vehículos y el tamaño total de las entregas para los clientes asignados a cada vehículo no debe exceder la capacidad del vehículo (C_k). Los vehículos son heterogéneos, la capacidad de todos los vehículos es diferentes. La demanda y el tiempo de servicio están asociados con cada nodo de cliente. El problema es construir un conjunto de rutas factibles para cada vehículo. Una ruta es una secuencia de ubicaciones que un vehículo debe visitar junto con la indicación del servicio que presta.

5.1. Conjuntos

$I =$ Conjunto de todos los clientes.

$J =$ Conjunto de todos los puntos de suministros.

$V =$ Conjunto de todos los vertices.

$K =$ Conjunto de todos los vehiculos.

5.2. Índices

i = Índice de nodos de demanda. $i(1, 2, \dots, n)$.

j = Índice de nodos de suministros de agua. $j(1, 2, \dots, n)$.

k = Índice de vehiculos cisterna.

5.3. Parámetros

D_{ij} = Distancia desde el punto de suministro de agua j a los nodo de demanda i .

D_{il} = Distancia desde el nodo de demanda i al nodo de demanda l ; ($\forall l, l \in I, i \neq l$).

C_k = Capacidad en volimen del vehiculo cisterna k .

d_i = Demanda en litros de agua que requiere el cliente i .

T_k = Tiempo limite para suplir la demanda pero el vehiculo k .

T_{jik} = Tiempo de viaje para ir del puesto de agua j al nodo i por el vehiculo k .

T_{ilk} = Tiempo de viaje para ir del nodo i al nodo l por el vehiculo k ; ($\forall l, l \in I, i \neq l$).

W_k = Tiempo de operacion de carga y descarga para el vehiculo k ; ($W_{jk} + W_{ik}$).

W_{jk} = Tiempo de op de carga en el punto de suministro de agua j con el vehiculo k .

W_{ik} = Tiempo de operacion de descarga en el nodo de demanda i con el vehiculo k .

5.4. Variables

$X_{ijk} \begin{cases} 1. \text{ Si el nodo } i \text{ procede al nodo } j \text{ en la ruta de vehiculo } k; (\forall i, j \in I \cup J). \\ 0. \text{ En caso contrario.} \end{cases}$

$$Y_{ij} \begin{cases} 1. \text{ Si el cliente } i \text{ es asignado al punto de suministro de agua } j. \\ 0. \text{ En caso contrario.} \end{cases}$$

$$Y_{ik} \begin{cases} 1. \text{ Si el cliente } i \text{ es visitado por el vehiculo } k. \\ 0. \text{ En caso contrario.} \end{cases}$$

$$Z_{jk} \begin{cases} 1. \text{ Si el vehiculo } k \text{ es usado por el nodo } j. \\ 0. \text{ En caso contrario.} \end{cases}$$

5.5. Función Objetivo

Tiempo total de vehículo k:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (T_{ijk} + T_{ilk}) \cdot X_{ijk}; \quad \forall k \in K \quad (7)$$

Tiempo de operación del vehículo k:

$$\sum (W_{jk} \cdot Z_{jk} + W_{ik} \cdot Y_{ik}); \quad \forall i, j \quad (8)$$

Variable de penalización:

$$\sigma = 1 + 0.1 \cdot [\sum (T_{ijk} + T_{ilk}) \cdot X_{ijk} - T_k] \quad (9)$$

Si $\sum(\text{Timepo de operacion total}) \geq T_k$; de lo contrario, $\sigma = 1$.

F.O. = Tiempo mínimo de operación total:

$$[\sum \sum [(T_{jik} + T_{ilk}) \cdot X_{ijk}] + \sum (W_{jk} \cdot Z_{jk} + W_k \cdot Y_{ik})] * \sigma \quad (10)$$

La función objetivo (10) busca minimizar el tiempo de operación total, se compone por 3 partes: el tiempo total cuando el vehículo k hace el recorrido para cubrir la demanda (7), en él se realiza la sumatoria del tiempo del vehículo k en ir desde el puesto de suministro de agua j hasta los nodos de demanda, teniendo en cuenta si el nodo de demanda i necesita suministro del puesto j en la ruta del vehículo. (8) es el tiempo de operación del vehículo k al momento de cargar y descargar el recurso, cuenta con dos variables asegurando que el nodo i procede al puesto de suministro j en la ruta del vehículo k y que el nodo j utilice el vehículo k.

5.6. Restricciones

$$d_i \cdot Y_{ik} \leq C_k; \quad \forall K \quad (11)$$

$$Y_{ij} = 1; \quad i \in I \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ijk} - \sum_{i=0}^n X_{ijk} = 0 \quad (13)$$

$$X_{ijk} = 1 \quad j \in J \quad (14)$$

$$\sum \sum X_{ijk} \leq 1 \quad k \in K \quad (15)$$

$$d_i \leq \sum_{k=1}^k \sum_j^n (X_{ijk} + Y_{ik}) \quad (16)$$

La restricción (11) define la capacidad máxima en volumen que puede transportar el vehículo. (12) asegura que a cada cliente le sea asignado un suministro. (13) hace referencia a la ecuación de continuidad de flujo a través de dos selecciones. (14) asegura que cada cliente le sea asignado una sola ruta. (15) cada ruta puede ser servida a lo sumo una vez. (16) certifica que la demanda de agua sea de satisfacción al cliente.

Las restricciones asociadas a las variables la cuales son binarias pueden tomar valores ya sea de cero (0) o uno (1), esta idea tan simple puede convertirse en una ayuda fundamental tanto para la modelación, como para la resolución de los problemas.

6. Descripción del algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO)

El éxito de la optimización por enjambre de partículas se debe a su concepto simple y su capacidad para encontrar una propuesta de forma rápida y coherente. Puesto que es más sencillo quedar atrapado en la óptima local entretanto se optimizan los problemas complejos de optimización global [70]. El PSO se basa en la imitación del comportamiento de las sociedades animales que no

tienen un líder o un alfa en su grupo y está diseñado para la optimización global emulando la búsqueda de aves y la educación de los peces [71]. El proceso del algoritmo PSO en la búsqueda de valores óptimos sigue el trabajo de esta sociedad animal.

El PSO es un algoritmo estocástico que trata los procesos cuya evolución es aleatoria y que basa su resultado en probabilidades que cambian con el tiempo basado en la población que comienza con un grupo inicial de partículas generadas aleatoriamente.

Cada solución a un problema se llama partícula y la población se llama enjambre [72]. Cada partícula tiene dos propiedades de posición y velocidad para un problema de búsqueda en un $|D|$ -espacio dimensional donde $D = \{1, 2, \dots, d\}$ es el conjunto de dimensiones. Una partícula $i \in V$ en PSO representa una solución $X_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^d]$ que está asociado con un vector de velocidad $V_i = [v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^d]$, donde $d \in D$.

$$v_i^d(t+1) = w \cdot v_i^d(t) + c_1 \cdot rand1_i^d \cdot (pbest_i^d(t) - x_i^d(t)) + c_2 \cdot rand2_i^d \cdot (gbest_i^d(t) - x_i^d(t)) \quad (17)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + v_i^d(t+1) \quad (18)$$

La ecuación (17) se utiliza para calcular la nueva velocidad de la partícula de acuerdo con la velocidad previa inmediata de la partícula, las distancias de su posición actual desde su mejor ubicación y experiencia del grupo. Luego la partícula vuela a una nueva posición de acuerdo con (18). Donde $pbest_i = (pbest_i^1, pbest_i^2, \dots, pbest_i^D)$ es la mejor posición previa que produce el mejor valor de condición física para la i -ésima partícula en $|D|$ -espacio dimensional y $gbest = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_D)$ es la mejor partícula global encontrada por todas las partículas hasta ahora.

Ambos $rand1_i^d$ y $rand2_i^d$ son dos números uniformes aleatorios generados independientemente dentro del rango de $[0,1]$ y la naturaleza de exploración estocástica de PSO se

debe a estos números aleatorios; c_1 y c_2 son dos factores de aprendizaje que representan la confianza de la partícula en sí misma y en el enjambre. El parámetro w , llamado peso de inercia, se utiliza para equilibrar las capacidades de búsqueda global y local de partículas y también para equilibrar las capacidades de exploración y explotación, una disminución lineal de w sobre el proceso de búsqueda es una buena opción [73].

Para reducir este peso sobre las iteraciones, se actualiza de acuerdo con la siguiente ecuación (19):

$$W_t = W_{max} - \left(\frac{W_{max} * W_{min}}{t_{max}} \right) \cdot t \quad (19)$$

Donde W_{max} y W_{min} son los valores máximos y mínimos que puede tomar el peso de inercia, t_{max} es el número máximo de iteraciones y t es iteración actual [74].

Las velocidades de las partículas están limitadas en intervalo $[V_{max}, V_{min}]$.

Las ecuaciones (20) y (21) se utilizan para inicializar la velocidad máxima y mínima en la dimensión de solución, es decir, $V_{max,d}$ y $V_{min,d}$ respectivamente:

$$V_{max,d} = \sigma (X_{max,d} - X_{min,d}) \quad (20)$$

$$V_{min,d} = \sigma (X_{min,d} - X_{max,d}) \quad (21)$$

$V_{max,d}$ y $V_{min,d}$ son las posiciones mínima y máxima de la partícula en la dimensión d y σ es un factor constante tomado de $[0,1]$. Si el valor resultante para la velocidad es menor que V_{min} , el vector de velocidad se establece en V_{min} y si el valor resultante es mayor que V_{max} , se establece en V_{max} . Después de actualizar la velocidad, el rendimiento de cada partícula se mide de acuerdo con la función de aptitud. El algoritmo PSO terminará después de un número máximo de iteraciones o cuando alcanza un tiempo máximo de CPU [75].

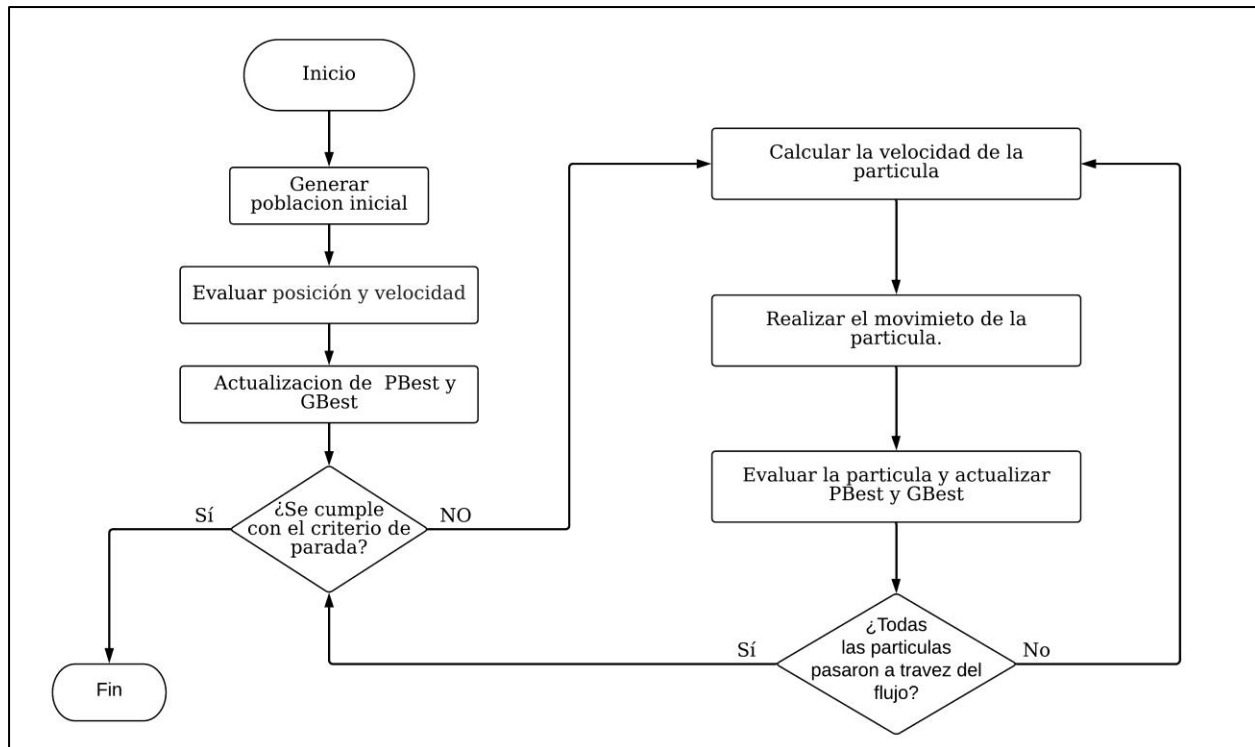


Figura 4. Etapas de la Optimización por Enjambre de Partículas. Adatado de “Diseño de un modelo para la solución del problema de ruteo de vehículos refrigerantes y de tipo general para la entrega de productos perecederos”. Adaptado de Helman E Hernández Riaño et al.

En la Figura 4 se puede observar las etapas de PSO: en la primera etapa el enjambre inicia buscando a un cliente o partícula de manera aleatoria; en la segunda etapa se evalúan el valor de la posición y la velocidad de cada partícula; en la tercera etapa identifica la mejor solución PBest (Mejor solución personal) y la mejor GBest (Mejor solución Global); en la cuarta etapa establece si todas las partículas interactúan a través del flujo, sí cumple con el criterio establecido da por terminado el proceso, si no, calcula la velocidad de la partícula, revisa el movimiento de la partícula en el espacio, evalúa y actualiza la mejor solución personal y global, hasta que cumpla el criterio de parada y finalice el proceso.

6.1. Representación de la solución

El problema enrutamiento del vehículo (CVPR) se describe como un grupo de vehículos con deposito con el objetivo de llegar a clientes con necesidades ubicados en diferentes sectores, tenido como base el conjunto de vértice.

A cada cliente de le asigna un vehículo y la demanda del cliente no debe superar la capacidad del vehículo.

Para que el diseño PSO sea exitoso en la ejecución del problema de ruteo de vehículos es clave la correspondencia adecuada entra las VRP y las partículas en PSO.

El método de decodificación es el procedimiento para convertir la representación de la solución específica del problema.

6.1.1. Codificación de la ruta. Las partículas se almacenan a través de la secuencia específica de nodos. Para un problema de 6 (i) clientes y 3 (k) vehículos de capacidad uniforme 20, las partículas comienzan con el almacenamiento a través de la secuencia específica de nodos (tabla 2).

Tabla 2. *Ejemplo de Codificación.*

Solución y_i	2	3	4	5	1	6
Demanda	10	5	20	15	5	2

Nota: Codificación de algoritmo PSO. Adaptado “Particle swarm optimization-based approach for optical finite impulse response filter design” por Z. Ying, Z. Guangjie y Y. Feihong (2003).

Como referencia de la tabla 2, la solución inicial debe ser codificada con la intención de sobreponer el algoritmo PSO. La partícula inicial se genera aleatoriamente.

La asignación de rutas se establece de izquierda a derecha (tabla 3). Cada ruta debe tener punto de partida y punto de llegada; si la demanda del cliente es menor a la capacidad del vehículo, este será añadido, de lo contrario se asignará a otro vehículo.

Entonces para el vehículo 1, inicia de y_{i1} es decir el nodo 2 donde el cliente tiene demanda de 10, seguido del cliente 3 con demanda de 5 y el cliente 1 con demanda de 5, dando un total de carga de 20, llenando el vehículo por completo. Por consiguiente, al asignar el cliente 4 la restricción de capacidad no se cumple por lo que no se le asigna.

El vehículo 2 solo tiene la capacidad necesaria para transportar la demanda del cliente 4, es decir 20. El vehículo 3 recoge la capacidad de la demanda del cliente 5 y la del cliente 6 sumando un total de carga de 17 sobrándole 3 en la capacidad del vehículo.

Tabla 3. *Rutas establecidas por el ejemplo.*

	RUTAS	$\sum_i d_i$
1	<i>deposito</i> → 2 → 3 → 1 → <i>deposito</i>	20
2	<i>deposito</i> → 4 → <i>deposito</i>	20
3	<i>deposito</i> → 5 → 6 → <i>deposito</i>	17

Nota: solución inicial generada es una permutación de rutas. Adaptado “Particle swarm optimization-based approach for optical finite impulse response filter design” por Z. Ying, Z. Guangjie y Y. Feihong (2003).

La solución inicial generada es una permutación de rutas y debe convertirse en el valor de solución de las partículas. En la ecuación 22 se ejecuta la conversión.

$$x_{ij} = x_{min} + \frac{x_{max} - x_{min}}{n * [y_{ij} - 1 + rand()]}$$
 (22)

Donde:

y_{ij} = Representa al cliente.

n = Representa el número de albergue en la longitud de la solución.

$rand()$ = Es el numero distribuido uniformemente en $[0, 1]$.

x_{max} y x_{min} = Representan los valores que limitan el posicionamiento de la partícula.

Al decodificar la solución, también se tienen en cuenta las demandas. Cada partícula se decodifica desde la izquierda, formando una ruta para cada vehículo, satisfaciendo la restricción de capacidad. El algoritmo describe el procedimiento de decodificación de la representación de la solución.

En el siguiente ejemplo (tabla 4) se explica la transformación de la permutación (solución codificada) a su solución en un espacio PSO utilizando la ecuación 22, para 6 clientes cuyo $y_{ij} = (1,2,3,4,5,6)$ siendo la codificación de la permutación de una solución. Cada y_{ij} se convierte en un valor de posición de la partícula x_{ij} , los valores de frontera x_{max} y x_{min} se escogen arbitrariamente.

$n = 6$; Número de clientes en la ruta.

$x_{min} = 1$ Número seleccionado arbitrariamente.

$x_{max} = 15$ Número seleccionado arbitrariamente.

Tabla 4. *Ejemplo de conversión de las soluciones a una partícula.*

Clientes	1	2	3	4	5	6
Permutación	4	5	2	3	1	6
Valor de posición x_{ij}	4.82	8.44	6.93	2.91	1.23	9.95

Nota: Transformación de la permutación. Adaptado “Particle swarm optimization-based approach for optical finite impulse response filter design” por Z. Ying, Z. Guangjie y Y. Feihong (2003).

6.1.2. Dedicación de la ruta. Luego de que los valores de posición continua de partículas x_{ij} se convierte de nuevo a la permutación y_{ij} , este simboliza los valores verdaderos de la partícula en la solución del VPR utilizado el método Ranked Order Value (ROV) o en español Valor de orden clasificado.

El ROV utiliza el valor de posición más pequeño (SPV) de una partícula y asigna un valor de rango más pequeño n . Así mismo la posición del siguiente SPV ocupa el siguiente entero y lo asigna como n . El SPV es $x_{ij} = 4.82$, al y_{ij} se le asigna el valor de rango 1, luego el siguiente SPV es $x_{i3} = 6.93$, x_{i3} se le asigna al valor 2. Repitiendo lo mismo, el ROV Y_i se obtiene como $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. ROV de una partícula a una codificación de permutación.

Cliente	1	2	3	4	5	6
Valor de posición X_i	0.8	8.5	6.9	2.9	1.23	10
ROV	3	5	4	2	1	6

Nota: Valor de orden clasificado (ROV). Adaptado “Particle swarm optimization-based approach for optical finite impulse response filter design” por Z. Ying, Z. Guangjie y Y. Feihong (2003).

Al finalizar el procedimiento de decodificación, su siguiente paso es considerar la demanda de los clientes para generar su respectiva ruta teniendo en cuenta la capacidad de su respectivo vehículo.

La variación del peso de inercia se logra a partir de la siguiente formula:

$$w = w_{max} + \frac{w_{max} - w_{min}}{K} * k \quad (23)$$

Donde K es el número de interacciones y k es la interacción actual.

En la etapa experimental existen gran cantidad de investigaciones en el cual han propuesto datos específicos para los parámetros, en el peso inercial lo toman como 0.4 y las constantes de aceleración se establecen como c_1 y $c_2 = 2$ como proponente Ying et al [76].

7. Red de Distribución

Para dar validez al modelo PSO en la solución de distribución de agua en situación de desastre, se generó un escenario ubicando los albergues y los hidrantes de toda la ciudad de Bucaramanga distribuidos por comunas, creando las rutas de distribución de agua y por consiguiente la emulación de una calamidad natural en la ciudad con el objetivo de evaluar la respuesta generada por el algoritmo.

7.1. Análisis del mapa

En la red de distribución se utilizó el sistema de información geográfico del API de Google Maps, ya que es una herramienta de geolocalización por internet, cuenta con sentidos de circulación vial y se puede representar la solución de los escenarios. La información incluida en My Maps de Google sobre la zona de amenazas naturales, albergues, comunas, fue desarrollada gracias a las previas investigaciones de Aguilar et al [64], Barrera y Gómez [65], Barreto y Niño [66], Contreras y Martínez [67].

Se establecieron las ubicaciones de las amenazas naturales (figura 5), comunas (figura 6), albergues (figura 8) y los hidrantes tipo Milán (figura 11) sobre el mapa de la división política de Bucaramanga. Esta red puede ser considerada en el siguiente enlace: [Transporte de agua en Bucaramanga - My Maps de Google.](#)

7.1.1. Amenazas naturales. El caso está centrado en la ciudad de Bucaramanga donde habitan 581.130 personas, ubicada sobre la rama oriental de la cordillera de los Andes. La ciudad tiene grandes amenazas naturales ubicadas alrededor de su zona. Hablamos de amenazas naturales tales como derrumbes, deslizamientos, reptaciones, erosiones laminares, caída de rocas y remoción de masa en diferentes niveles, como se muestra en la figura 5.

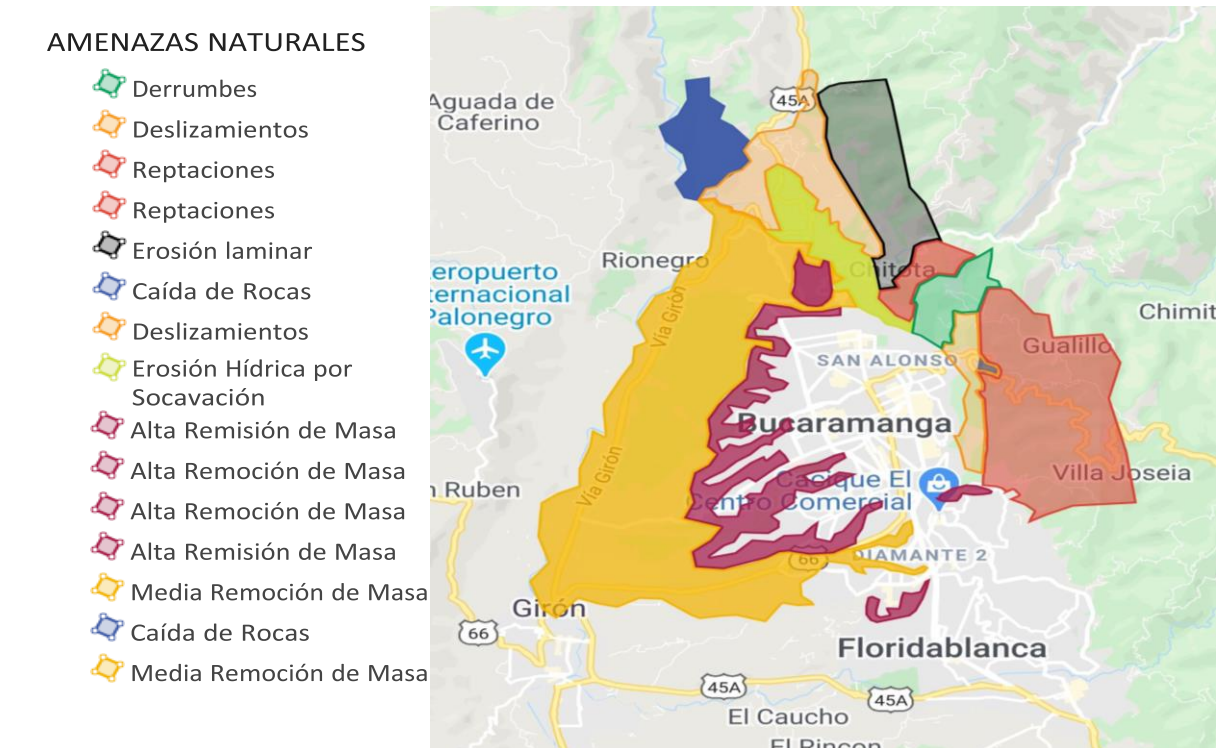


















Figura 5. Señalización de las amenazas naturales cercanas a Bucaramanga. “Adaptado de un algoritmo evolutivo para el problema de distribución de recursos postdesastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga” de A. R. Barrera Navarro Y A. P. Hernandez Gomez (2016).

7.1.2. Comunas. La capital del departamento de Santander esta geográficamente dividida por 17 comunas, distribuidas de la siguiente manera (figura 6) Norte (1); Nororiental (2); San Francisco (3); García Rovira (4); La Concordia (5); La Ciudadela (6); Suroccidente (7); La Pedregosa (8); Sur (9); Cabecera Del Llano (10); Morrórico (11); Centro (12); Oriental (13); Provenza (14); Mutis (15); Lagos Del Cacique (16); Occidental (17).

Comunas

-  Comuna 1 Norte
-  Comuna 2 Nororiental
-  Comuna 3 San Francisco
-  Comuna 5 Garcia Rovira
-  Comuna 6 La Concordia
-  Comuna 7 La Ciudadela
-  Comuna 8 Suroccidente
-  Comuna 9 La Pedregosa
-  Comuna 11 Sur
-  Comuna 12 Cabecera Del Llano
-  Comuna 14 Morrórico
-  Comuna 15 Centro
-  Comuna 13 Oriental
-  Comuna 10 Provenza
-  Comuna 17 Mutis
-  Comuna 16 Lagos Del Cacique
-  Comuna 4 Occidental

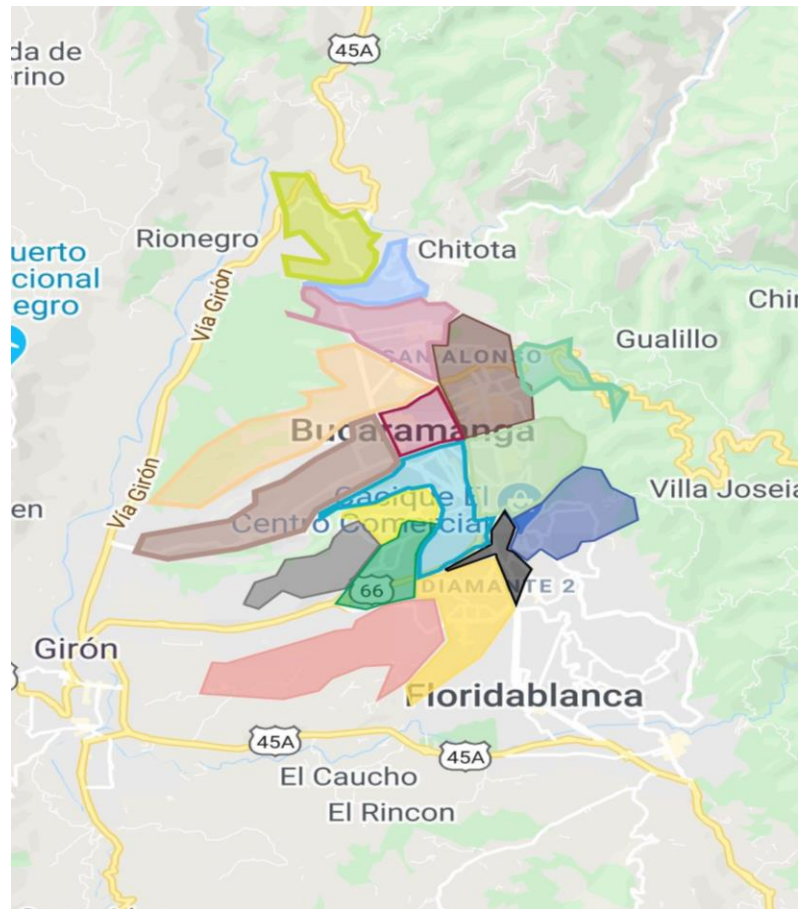


Figura 6. Señalización geográfica de las comunas en Bucaramanga. Adaptado “Un Algoritmo Mímético Para El Problema De Localización-Ruteo Con Ventanas De Tiempo Para La Atención De Desastres Sísmicos En La Ciudad De Bucaramanga” de M. A. Barreto Robles Y P. N. Niño Niño (2016)

Gracias a la simulación echa por Google My Maps se puede observar con claridad cuales amenazas naturales que están presentes en cada zona o comuna de la ciudad. Así mismo este sistema favorece al filtrado de las comunas que se van a utilizar en el caso de estudio debido al riesgo que puede haber en cualquier momento.

Como se muestra en la tabla 6, las comunas con más niveles de amenaza que podrían afectar a gran cantidad de la población son: Norte, Nororiental, García Rovira, Suroccidente, Sur, Morrórico, Lagos del Cacique, Occidental.

Tabla 6. Amenazas naturales presentes en las comunas de la ciudad de Bucaramanga.

		AMENAZAS NATURALES						
COMUNAS		Derrumbes	Deslizamientos	Reptaciones	Caída de Rocas	Erosión Hídrica por Socavación	Alta Remisión de Masa	Media Remoción de Masa
	NORTE	*	*			*	*	*
	NORORIENTAL					*	*	*
	SAN FRANCISCO					*	*	
	GARCIA ROVIRA						*	*
	LA CONCORDIA						*	
	LA CIUDEDELA						*	
	SUROCCIDENTE						*	*
	LA PEDREGOSA							
	SUR						*	*
	CABECERA DEL LLANO		*	*				
	MORRORICO		*	*	*			
	CENTRO							
	ORIENTAL					*		
	PROVENZA						*	*
	MUTIS						*	*
	LAGOS DEL CACIQUE			*			*	
OCCIDENTAL						*	*	

Nota: Amenazas Naturales Encontradas En La Simulación. Adaptado “Un Algoritmo Mimético Para El Problema De Localización-Ruteo Con Ventanas De Tiempo Para La Atención De Desastres Sísmicos En La Ciudad De Bucaramanga” De M. A. Barreto Robles Y P. N. Niño Niño (2016).

7.1.3. Albergues. Los puntos de encuentro son elementales ya que son lugares de concentración de personas que evacúan de su recinto en caso de emergencia. Los albergues propuestos son de carácter temporal y brindan protección a personas afectadas. La mayoría de estos lugares ofrecen espacios cubiertos garantizando la seguridad y la salud permitiendo al mismo tiempo el apoyo de hidratación y alimentación. Frecuentemente están ubicados en campos deportivos, parques, colegios, entre otros.

A continuación, en la figura 7 se modela el icono para representar los refugios en el mapa y en la figura 8 se puede identificar los albergues ubicados en la ciudad. a causa de que solo se tiene en cuenta las comunas con mayor amenaza, se definieron los albergues ubicados allí como se muestra en la figura 9.



Figura 7. Icono usado para definir los albergues en el mapa político de Bucaramanga.

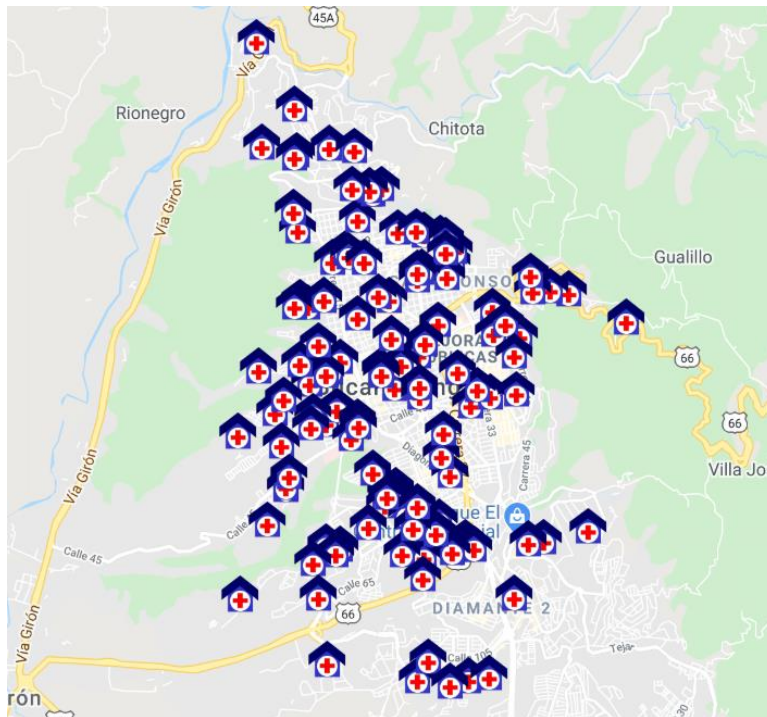


Figura 8. 125 albergues ubicados en el mapa de Bucaramanga.

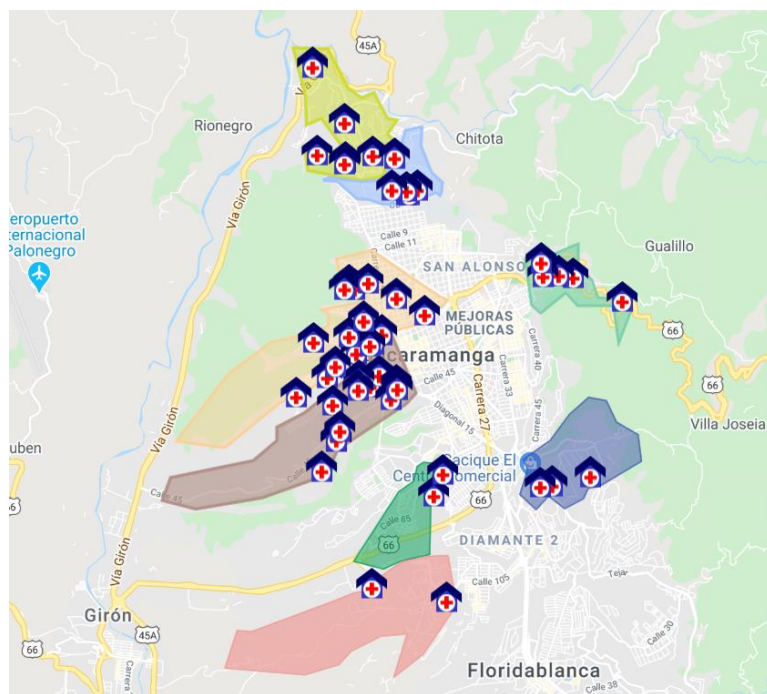


Figura 9. Ubicación de los albergues por comuna con mayor vulnerabilidad.

Dentro del tema de los albergues se debe tener en cuenta la capacidad de damnificados que se atenderán por sede, por esta razón se utiliza la demanda media de personas albergadas. Esta demanda media depende de la capacidad total de los albergados y el porcentaje real de personas que llegaran a cada uno de los albergues establecidos.

Para determinar este porcentaje real se estipuló una hipótesis aclarando que cuando suceda un sismo de gran magnitud, una avalancha o una inundación, no todas las construcciones se van a ser inhabitables, por esta razón los alberges no estarán llenos al máximo y se tendrá en cuenta un porcentaje del 30% como parámetro del albergados reales. Entonces, el número real de personas albergadas (n) es la capacidad total de personas del refugio (c) por el % real de albergados, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$n = \text{Numero real de personas albergadas.}$$

$$c = \text{Capacidad maxima del albergue.}$$

$$n = c * \% \text{ real de albergados} \quad (24)$$

Para el problema es necesario establecer la demanda de agua requerida por cada albergue. La cantidad de agua para mantener la vida y la salud en caso de emergencia varía según el tipo de desastre, el estado físico de la persona o el clima [68]. El suministro de agua en puntos públicos debe ser la suficiente para permitirle al individuo su supervivencia como se muestra en la figura 10. Por esta razón se propone distribuir una cantidad de 15 litros por persona con el fin de que pueda beber y cocinar.

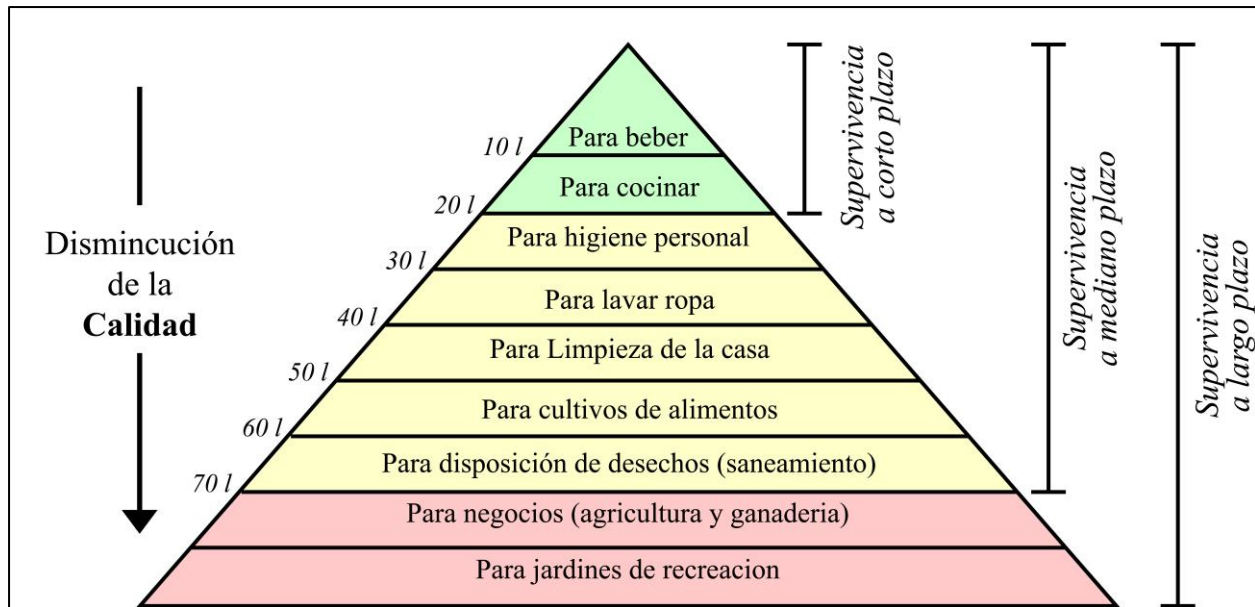


Figura 10. Jerarquía en necesidad de agua. Adaptado de Abraham Maslow.

Para realizar el análisis se tomaron datos referentes a la capacidad total de los albergues plateados por Barrera y Gómez [65]. En la tabla 6 se muestra los albergues ubicados en las comunas escogidas para la investigación, seguidamente de la capacidad real de albergados que se pueden atender y por último la demanda total de agua en galones por albergue.

Tabla 7. Nombre del albergue, capacidad de personas que pueden ayudar y demanda de agua necesaria.

Nombre	Comuna	30% De La Capacidad Del Albergue (Personas)	Demanda De Agua (Galón)
Instituto Educativo Campo Hermoso Sede A	Garcia Rovira	96	379
Institución Educativa Camacho Carreño	Garcia Rovira	85	336
Parque García Rovira	Garcia Rovira	39	155
Parque Romero	Garcia Rovira	128	508
Instituto Educativo Campo Hermoso Sede B	Garcia Rovira	10	39
Jardín Infantil Campo Hermoso			
Institución Educativa Nuestra Señora De Fátima Bienestar Social De La Policía	Garcia Rovira	157	622

Tabla 7. (Continuación).

Instituto Técnico Nacional De Comercio Sede B	Garcia Rovira	20	77
Institución Educativa Andrés Páez De Sotomayor	Garcia Rovira	91	361
Institución Educativa De Audición Y Del Lenguaje Centrabilitar	Garcia Rovira	42	168
Polideportivo Campo Hermoso	Garcia Rovira	308	1220
Institución Educativa Nuestra Señora Del Pilar Sede D	Garcia Rovira	33	130
Institución Educativa Club Unión Sede E Centro De Atención Al Prescolar	Garcia Rovira	44	172
Colegio Caldas	Lagos Del Cacique	414	1641
Colegio Gimnasio San Sebastián	Lagos Del Cacique	266	1052
Estadio De Atletismo La Flora	Lagos Del Cacique	436	1726
Institución Educativa Oriente Miraflores Sede E	Morrórico	11	42
Institución Educativa Oriente Miraflores Sede D	Morrórico	15	61
Institución Educativa Oriente Miraflores Sede C	Morrórico	31	122
Institución Educativa Oriente Miraflores Sede B	Morrórico	26	105
Institución Educativa Oriente Miraflores Sede A	Morrórico	35	139
Institución Educativa Promoción Social Del Norte Sede A	Nororiental	60	239
Institución Educativa Promoción Social Del Norte Sede B	Nororiental	44	175
Institución Educativa Promoción Social Del Norte Sede C	Nororiental	20	81
Institución Educativa Promoción Social Del Norte Sede D	Nororiental	37	147
Institución Educativa La Juventud Sede A	Nororiental	72	286
Institución Educativa La Juventud Sede B	Nororiental	42	166
Institución Educativa Técnico Rafael García Herreros	Norte	96	382
Colegio Café Madrid	Norte	100	395
Institución Educativa Maiporé	Norte	84	333
Institución Educativa Santo Ángel	Norte	95	377
Polideportivo Del Norte	Norte	247	978
Institución Educativa Gustavo Cote Uribe	Norte	75	297
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela Sede A	Occidental	287	1138
Colegio Francisco De Paula Santander	Occidental	77	307
Colegio De La Santísima Trinidad Bucaramanga	Occidental	30	120
Colegio Americano De Bucaramanga	Occidental	28	112
Institución Educativa Jorge Eliecer Gaitán Sede A	Occidental	62	245
Institución Educativa Maiporé Sede B	Occidental	74	292
Institución Educativa Maiporé Sede C	Occidental	43	170

Tabla 7. (Continuación).

Institución Educativa Politécnico Sede B República De Ecuador	Occidental	16	64
Institución Educativa Politécnico Sede C Margarita Diaz Otero	Occidental	47	187
Institución Educativa Nuestra Señora Del Pilar Sede F	Occidental	23	90
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela Sede B	Occidental	44	174
Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela Sede C	Occidental	23	90
Institución Educativa San Francisco De Asís Sede B	Occidental	13	51
Centro Educativo Protección Del Niño	Occidental	10	38
Institución Educativa Francisco De Paula Santander Sede C - San Juan Bosco	Occidental	38	149
Institución Educativa Francisco De Paula Santander Sede B - Cristóbal Colón	Occidental	18	70
Colegio Bilingüe Divino Niño	Sur	105	415
Institución Educativa La Medalla Milagrosa	Sur	57	227
Institución Educativa Nuestra Señora Del Pilar Sede B	Suroccidente	28	112
Institución Educativa Para Problemas De Aprendizaje	Suroccidente	39	156

Nota: Información básica de los albergues de Bucaramanga. Adaptado de “Un algoritmo matemático para el problema de localización-ruteo con ventanas de tiempo para la atención de desastres sísmicos en la ciudad de Bucaramanga”, por M. Barreto y P Niño; 2016.

7.1.4. Camiones cisterna. Los camiones cisterna pueden ser un método rápido de transporte de agua a los albergues que los requiera durante la fase inicial de una emergencia. Para suministrar el servicio con camiones cisterna se requiere una flota de vehículos y a su vez necesita mantenimiento frecuente, combustible, conductores y una administración apropiada. El éxito del suministro con estos camiones es que su alternativa costosa, obliga mayor esfuerzo de vigilancia en la calidad del agua.

Tipo de camiones cisterna. El agua se puede transportar en diversos tipos de contenedores, algunos de ellos específicamente

diseñados para esa tarea y otros fabricados para cumplir con una necesidad urgente. En el caso de Bucaramanga la única entidad que cuenta con 2 camiones cisterna (tabla 7) para el transporte de agua es el Cuerpo Oficial de Bomberos de Bucaramanga además cuenta con más de 70 años de experiencia ayudando a la comunidad. Por otro lado, debido que la demanda de agua es mayor a la capacidad de camiones se pide ayuda al Cuerpo de Bomberos voluntarios de Floridablanca ya que también cuenta con bastante experiencia en el campo y también posee 2 camiones tipo cisterna (tabla 7) para el traslado de agua.

Tabla 8. *Características de los camiones tipo cisterna del Cuerpo Oficial de Bomberos Bucaramanga y Cuerpo de Bomberos voluntarios de Floridablanca.*

	Id del vehículo	Nombre	Capacidad (Galones)	Tipo de Bomba	Presión de Descarga (PSI)
Bucaramanga	2	M26	4300	Bomba contra incendios	400
	1	M18	3600	Estándar	220
Floridablanca	3	Vehículos cisterna contra	3038	Bomba contra incendios	400
	0	Vehículo tipo cisterna	5700	Bomba contra incendios	400

Nota: Información obtenida del Cuerpo Oficial de Bomberos Bucaramanga.

Puntos de entrega. La forma más simple para entregar el agua de los camiones es permitirles a las personas recogerla directamente del vehículo, pero su desventaja es que el método es lento y reduce el número de viajes que el vehículo puede hacer por día. La entrega de agua embotellada puede ser una opción a corto plazo, pero es costoso e ineficiente, además las botellas de agua vacías producen un impacto negativo en el ambiente.

Por lo cual el uso de camiones cisterna es mucho más eficiente si el agua puede ser descargada en los tanques de almacenamiento. Un tanque de almacenamiento conectado a grifos comunales ubicados en los albergues es un método más común para su uso.

7.1.5. Hidrantes. Bucaramanga cuenta con 1.728 hidrantes, y se dividen en 3 tipos, tipo Milán, tipo tráfico y tipo piso, la información de la ubicación hidrantes la suministró el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) bajo el sistema de referencia MAGNA – SIRGAS (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) debido a que el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) estableció la adopción de MAGNA-SIRGAS como sistema de referencia oficial del país ya que garantiza la compatibilidad de las coordenadas colombianas con las técnicas espaciales de posicionamiento [69]. Los datos de las ubicaciones de los hidrantes entregado por el AMB están bajo el tipo de coordenada Gauss Krüger. Para proyectar los hidrantes en My Maps de Google se debe convertir la coordenada tipo elipsoidal (figura 11).

Después de tener los hidrantes ubicados, se quitaron los hidrantes que pertenecían a Girón y Floridablanca. Se determino que solo se iban a utilizar los hidrantes tipo Milán, ya que este tipo de hidrante que posee mayor presión (200 psi) para el llenado del vehículo tipo cisterna, y también se excluyeron los hidrantes ubicados en zona de amenaza, debido a que en situación de desastre la tubería interna de agua se bloquea por motivos de seguridad impidiendo el flujo de agua por la zona, por esta razón se utilizan 274 hidrantes para la ciudad (figura 12).

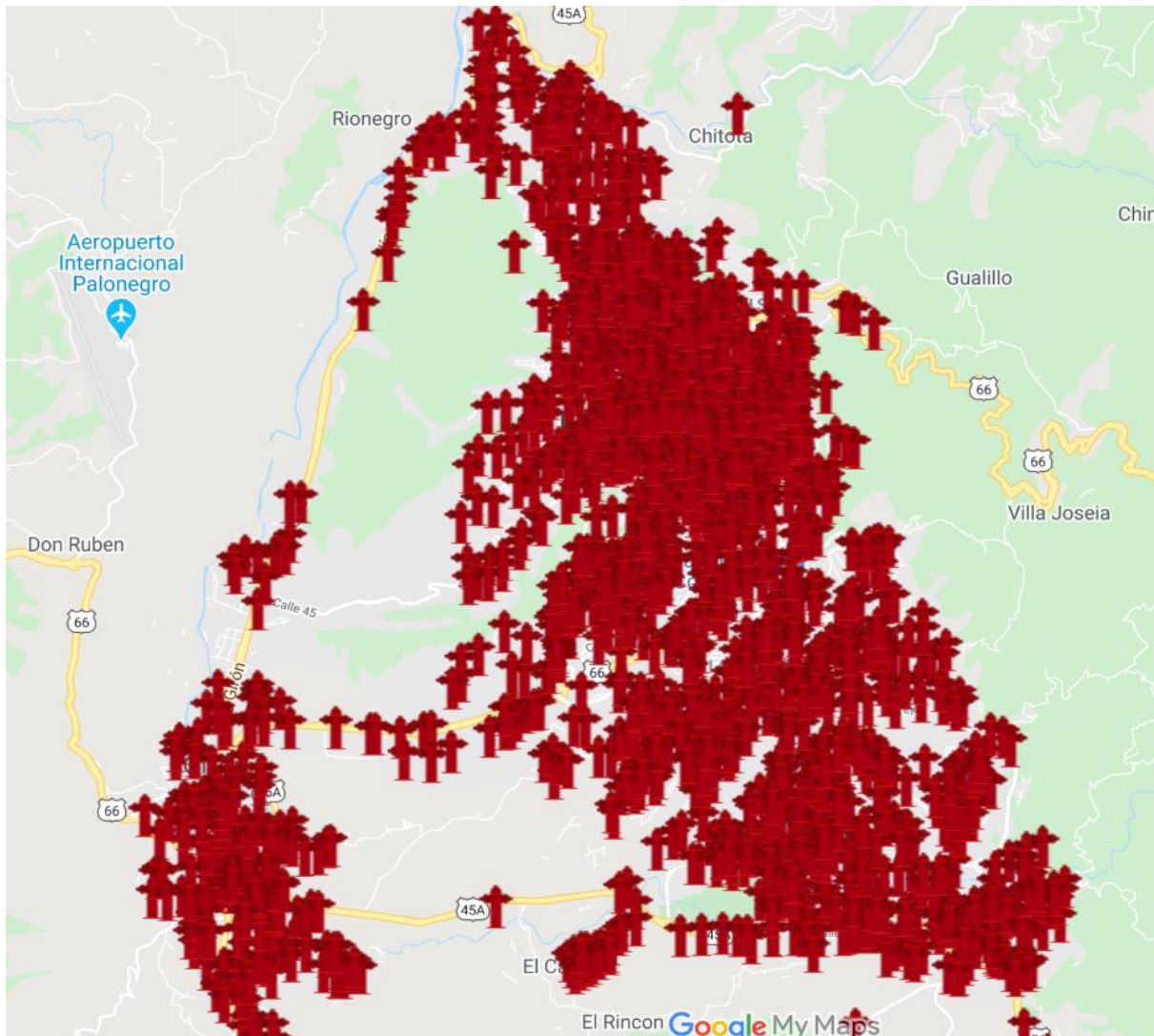


Figura 11. Hidrantes Del Área Metropolitana De Bucaramanga. Información Obtenida Del Acueducto Metropolitano De Bucaramanga AMB (2020).

7.2. Generación de escenarios

Se establece una simulación de escenario para evaluar la reacción ante un terremoto a través de los efectos y daños causados a distintas estructuras en diferentes lugares de la ciudad el simulacro del terremoto se considera bajo la escala de Mercalli de intensidad VIII (figura 13).

I- Muy débil	I- Muy fuerte
II- Débil	II- Destructivo
III- Leve	III- Muy destructivo
IV- Moderado	IV- Desastroso
V- Poco fuerte	V- Muy desastroso
VI- Fuerte	VI- Catastrófico

Figura 13. Escala de Mercalli para la simulación de escenario en caso de estudio.

Al momento de tener el escenario de un terremoto de nivel VIII escala Mercalli y haber iniciado el análisis de datos mediante el algoritmo PSO, este arroja las mejores rutas para que los camiones cisterna suministren agua los albergues propuesto en el mejor tiempo posible.

8. Resultados

La simulación cuenta con 49 albergues o centros de ayuda ubicados en espacios libres de peligro como zonas verdes y centros educativos (figura 14). A continuación, se hará la descripción del recorrido de cada vehículo en la ciudad de Bucaramanga, con la ruta más óptima y por ende el mejor tiempo.

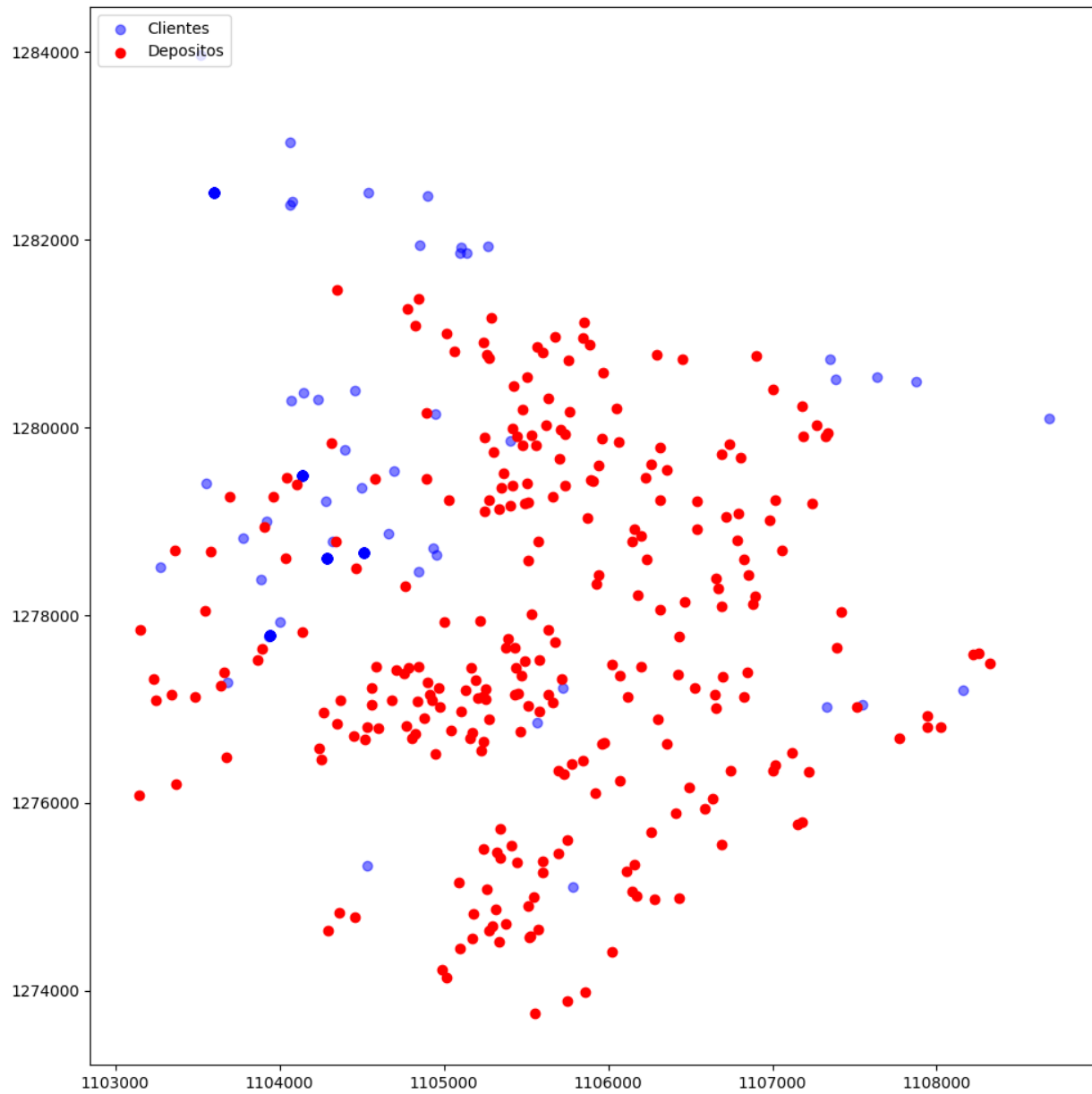


Figura 14. Ubicación de los albergue e hidrantes en la simulación. Imagen obtenida del algoritmo PSO.

8.1. Vehículo 0

La ruta para el vehículo 0 (figura 15), consta de un recorrido por 11 albergue, suministrando alrededor de 4222 galones de agua para 1065 personas que se encuentren vulnerables. Como se

muestra en la tabla 9, el tiempo de recorrido da un total de 2 hora y 31 min recorriendo una distancia de 53 km en la ciudad. En la tabla 14 se muestra los kilómetros que hay para ir de un punto al otro y cuánto tiempo demora el vehículo 0 de punto a punto. En el siguiente enlace se puede mostrar el [recorrido del vehículo 0 en My maps de Google.](#)

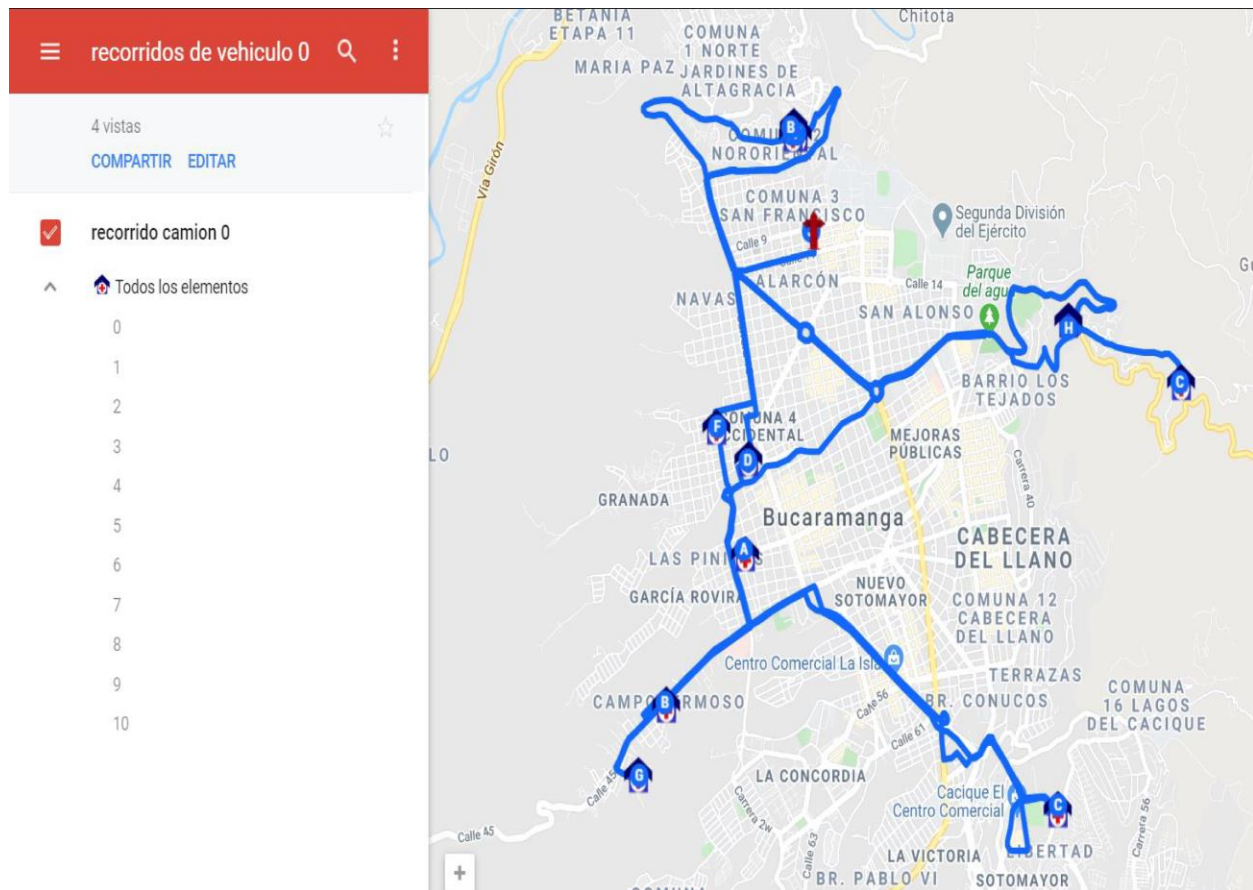


Figura 15. Ruta optima programa para el vehículo 0. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Tabla 9. *Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo 0.*

Vehículo 0		
Recorrido	Distancia (km)	Tiempo (min)
hidrante - 0	3,39	11
0 - 1	2,15	6
1 - 2	5,63	14
2 - 3	5,5	14
3 - 4	4,25	11
4 - 5	4,2	11
5 - 6	3,44	9
6 - 7	8,32	23
7 - 8	7,06	21
8 - 9	0,048	1
9 - 10	9,4	27

Nota: Simulación de los tiempos del vehículo 0. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Como se muestra en la figura 16, los albergues que más recibieron agua Fueron: el Colegio Caldas con demanda de 1641 galones para 414 persona y el Polideportivo de Campo Hermoso con 1220 galones el cual ayudan a 308 personas, además también son los albergue que más personas pueden socorrer en esta ruta. El albergue más pequeño ayudado es el Centro Educativo Protección Del Niño, suministrándole 38 galones de agua que ayudan a 10 personas.

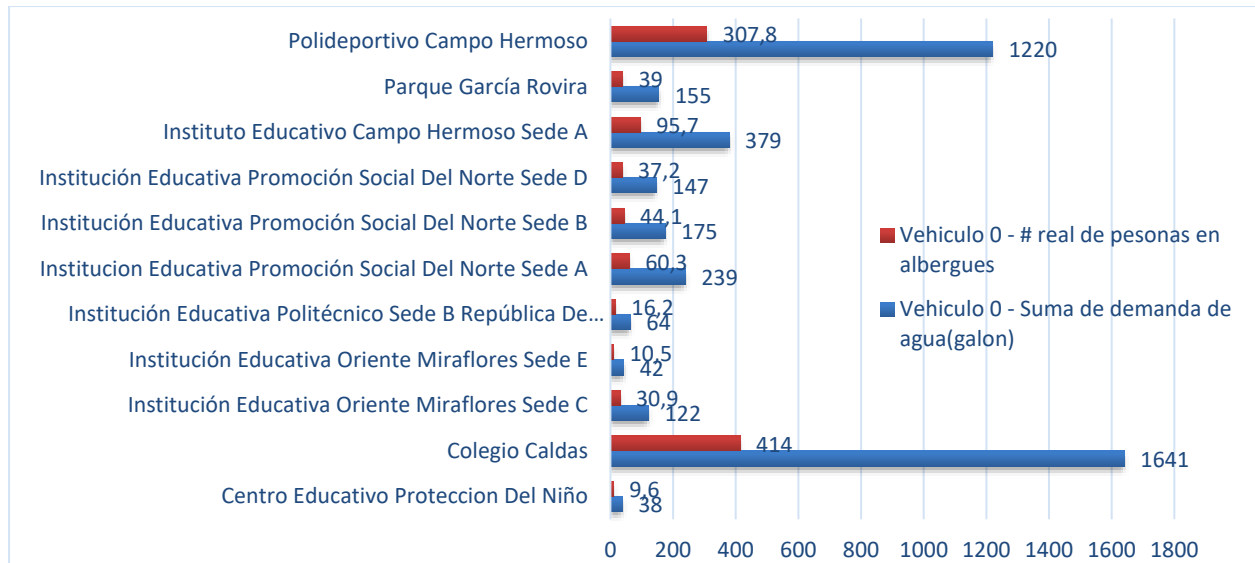


Figura 16. Demanda de agua para cada cliente del vehículo 0. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

8.2. Vehículo 1

La ruta para el vehículo 1 (figura 17), consta de un recorrido para suministrar a 6 albergues con alrededor de 4027 galones de agua para 1016 personas que se encuentren vulnerables. Como se muestra en la tabla 10, el tiempo de recorrido da un total de 1 hora y 48 min recorriendo una distancia de 41 km en la ciudad. En la tabla se muestra los kilómetros que hay para ir de un punto al otro y cuánto tiempo demora el vehículo 1 de punto a punto. En el siguiente enlace se puede mostrar el [recorrido del vehículo 1 en My maps de Google](#).

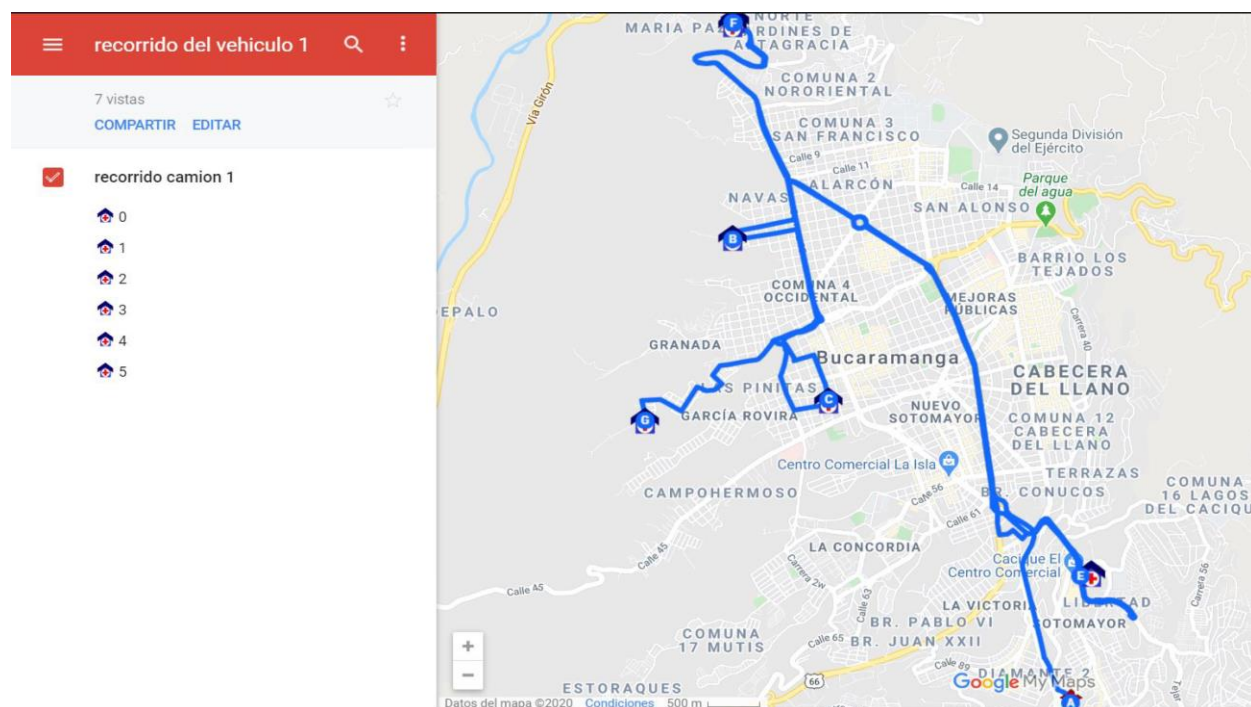


Figura 17. Ruta optima programa para el vehículo 1. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Tabla 10. Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo 1.

Vehículo 1		
Recorrido	Distancia (km)	Tiempo (min)
hidrante - 0	7,39	17
0 - 1	2,92	10
1 - 2	5,76	15
2 - 3	9,73	26
3 - 4	8,38	20
4 - 5	6,62	17

Nota: Simulación de los tiempos del vehículo 1 en Google Maps. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Como se muestra en la figura 18, los albergues que más recibieron agua fueron: el Estadio de Atletismo la Flora con demanda de 1726 galones para 436 persona y el Polideportivo del Norte con

978 galones el cual ayudan a 247 personas, además también son los albergue que más individuos pueden socorrer en esta ruta. El albergue más pequeño ayudado es Institución Educativa Francisco de Paula Santander Sede C, suministrándole 149 galones de agua que ayudan a 38 personas.

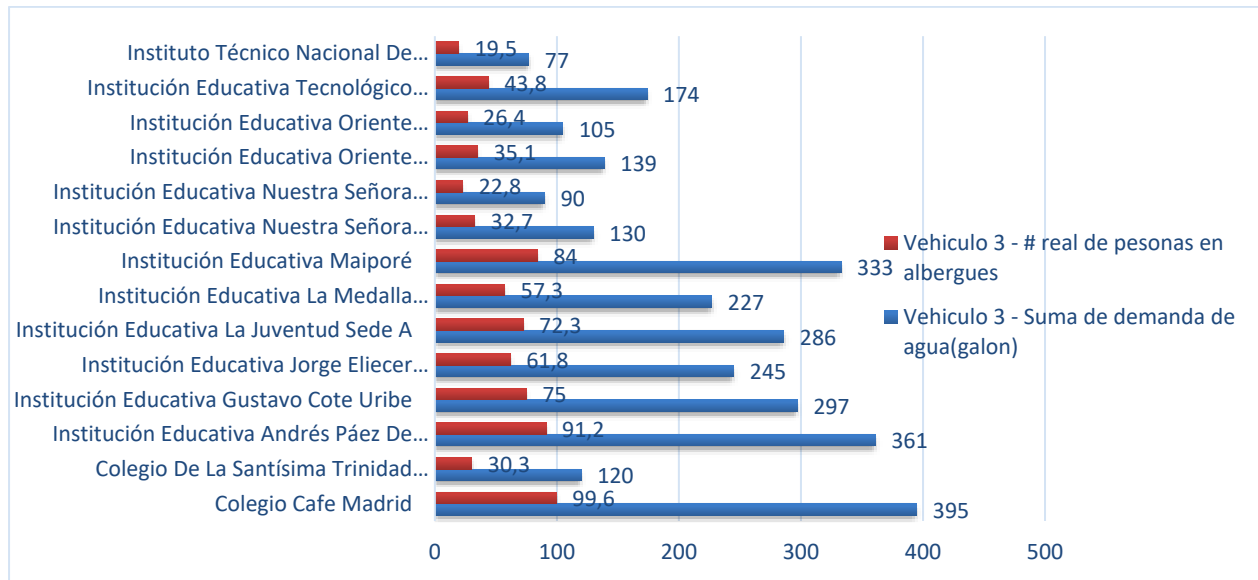


Figura 18. Demanda de agua para cada cliente del vehículo 1. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

8.3. Vehículo 2

La ruta para el vehículo 2 (figura 19), consta de un recorrido para suministrar a 18 albergues con alrededor de 5213 galones de agua para 1315 personas que se encuentren vulnerables. Como se muestra en la tabla 11, el tiempo de recorrido da un total de 3 hora y 28 min recorriendo una distancia de 72 km en la ciudad. En la tabla se muestra los kilómetros que hay para ir de un punto al otro y cuánto tiempo demora el vehículo 2 de punto a punto. En el siguiente enlace se puede mostrar el [recorrido del vehículo 2 en My maps de Google.](#)

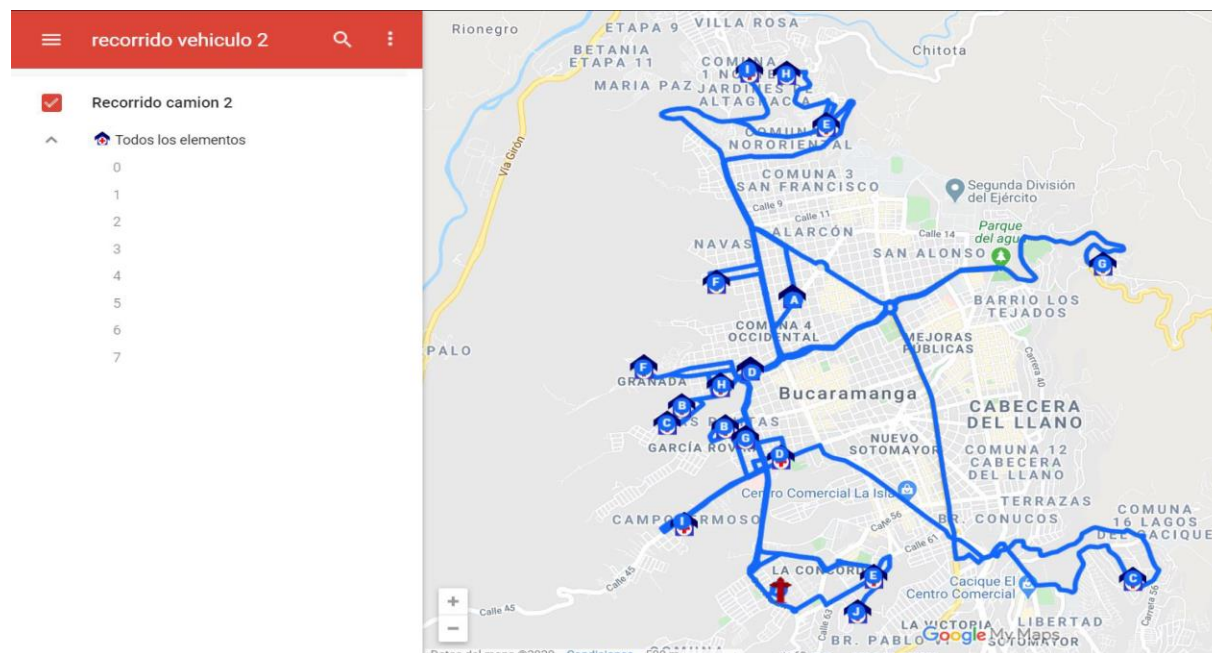


Figura 19. Ruta óptima programa para el vehículo 2. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Tabla 11. Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo 2.

Vehículo 2		
recorrido	distancia (Km)	tiempo (min)
hidrante - 0	3,32	8
0 - 1	0,393	1
1 - 2	2,72	9
2 - 3	3,43	10
3 - 4	4,34	12
4 - 5	6,57	19
5 - 6	9,14	25
6 - 7	3,13	8
7 - 8	4,44	13
8 - 9	1,85	5
9 - 10	6,41	18
10 - 11	7,08	18
11 - 12	4,74	12
12 - 13	3,64	10
13 - 14	2,72	8
14 - 15	1,51	5
15 - 16	2,88	8
16 - 17	4,24	12

Nota: Simulación de los tiempos del vehículo 2 en Google Maps. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Como se muestra en la figura 20, los albergues que más recibieron agua fueron: la Institución Educativa Tecnológico Salesiano Eloy Valenzuela Sede A con demanda de 1138 galones para 287 persona y el Colegio Gimnasio San Sebastián con 1052 galones el cual ayudan a 266 personas, además también son los albergue que más individuos pueden socorrer en esta ruta. El albergue más pequeño ayudado es Instituto Educativo Campo Hermoso Sede B Jardín Infantil Campo Hermoso, suministrándole 39 galones de agua que ayudan a 10 personas.

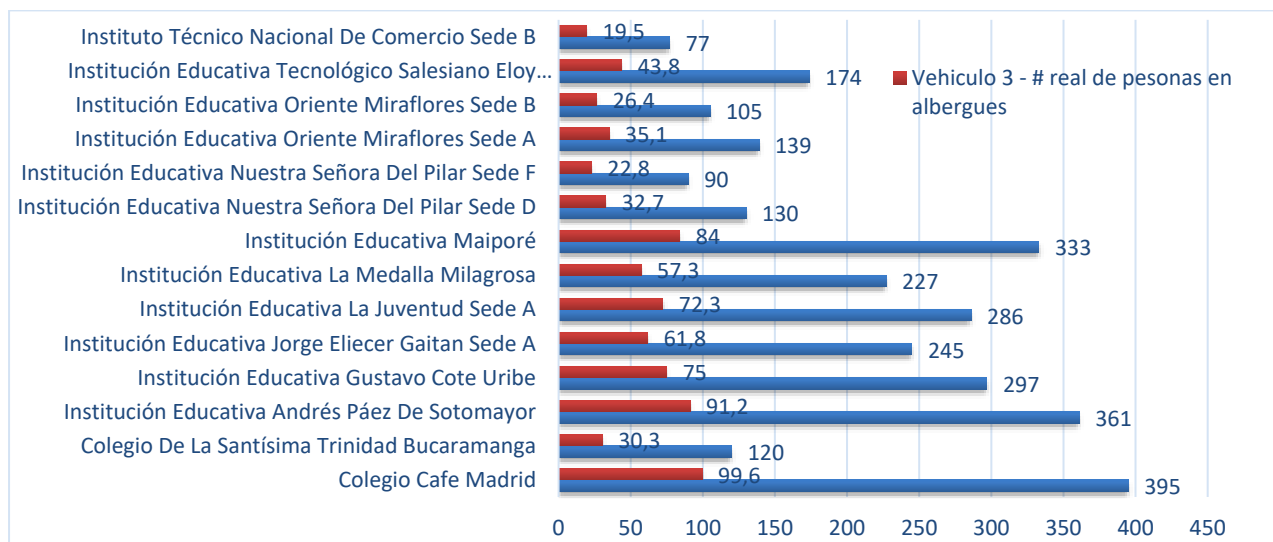


Figura 20. Demanda de agua para cada cliente del vehículo 2. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

8.4. Vehículo 3

La ruta para el vehículo 3 (figura 21), consta de un recorrido para suministrar a 14 albergues con alrededor de 2979 galones de agua para 752 personas que se encuentren vulnerables. Como se muestra en la tabla 12, el tiempo de recorrido da un total de 3hora y 12 min recorriendo una distancia de 71 km en la ciudad. En la tabla se muestra los kilómetros que hay para ir de un punto al otro y cuánto tiempo demora el vehículo 3 de punto a punto. En el siguiente enlace se puede mostrar el [recorrido del vehículo 3 en My maps de Google.](#)

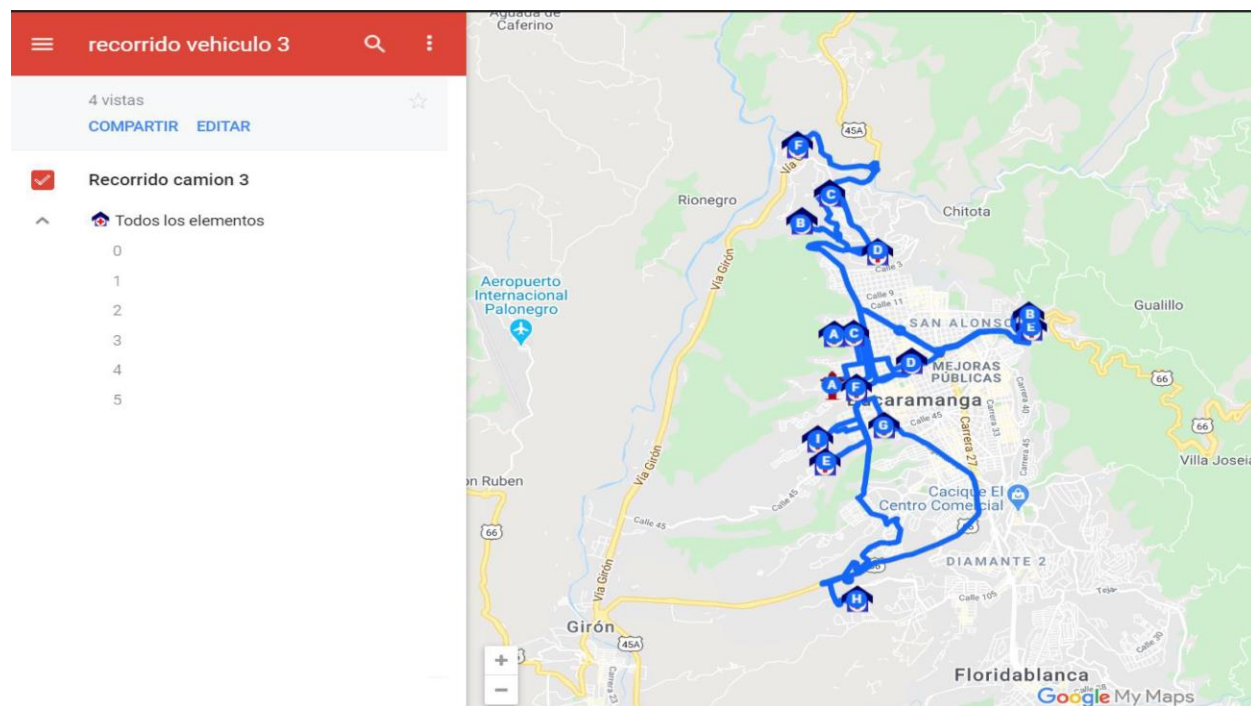


Figura 21. Ruta optima programa para el vehículo 3. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Tabla 12. Distancia recorrida en kilómetros y tiempo en minutos de recorrido para el vehículo3.

Vehículo 3		
recorrido	distancia (Km)	tiempo (min)
hidante - 0	5,47	16
0 - 1	1,99	6
1 - 2	2,22	6
2 - 3	7,09	21
3 - 4	10,5	24
4 - 5	9,52	24
5 - 6	6,96	14
6 - 7	7,28	17
7 - 8	3,16	10
8 - 9	5,13	15
9 - 10	4,46	12
10 - 11	1,63	7
11 - 12	3,15	8
12 - 13	2,24	7

Nota: Simulación de los tiempos del vehículo 3 en Google Maps. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

Como se muestra en la figura 21, los albergues que más recibieron agua fueron: Colegio Cafe Madrid con demanda de 395 galones para 100 persona y el Institución Educativa Andrés Páez De Sotomayor con 361 galones el cual ayudan a 91 personas, además también son los albergue que más individuos pueden socorrer en esta ruta. El albergue más pequeño ayudado es el Instituto Técnico Nacional De Comercio Sede B, suministrándole 77 galones de agua que ayudan a 20 personas.

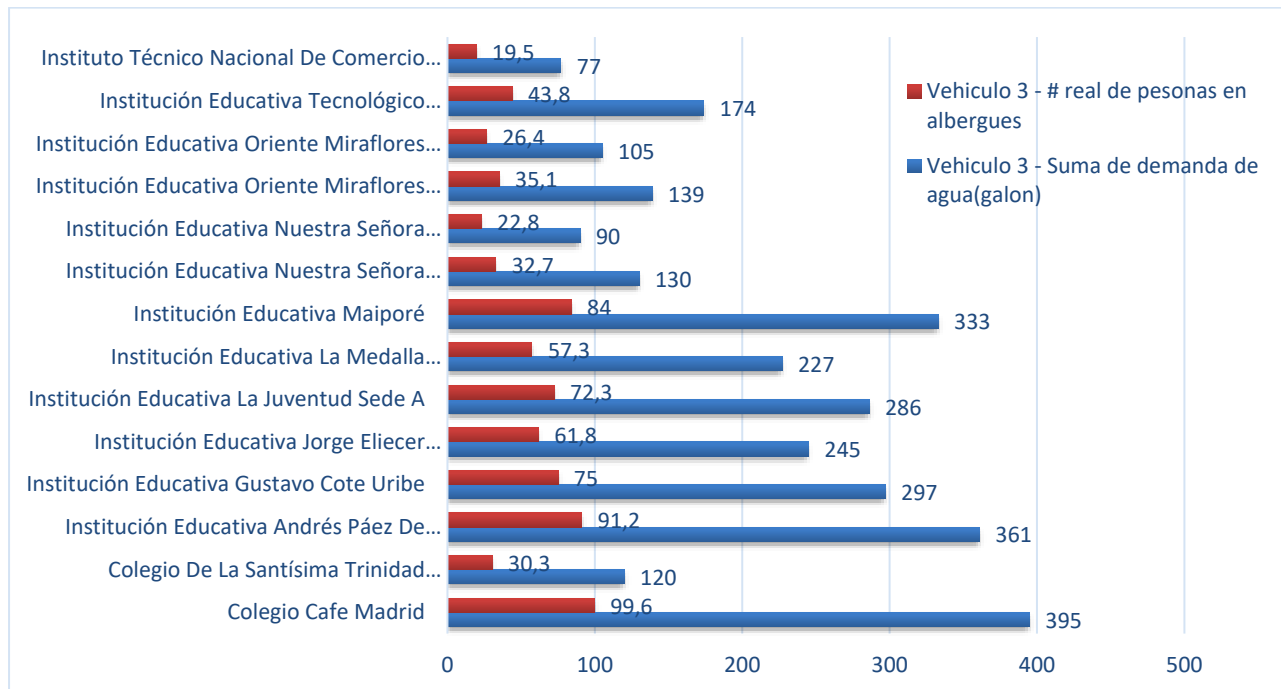


Figura 22. Demanda de agua para cada cliente del vehículo 3. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

En la figura 23 se muestra el porcentaje de los albergues visitados por los 4 camiones cisterna donde el vehículo 0 visita el 22.4% de los refugios, el vehículo 1 visita el 12,2 % de los albergues, el vehículo 2 registro 36.7% de los albergues y el vehículo 3 cumple con 28.6%.

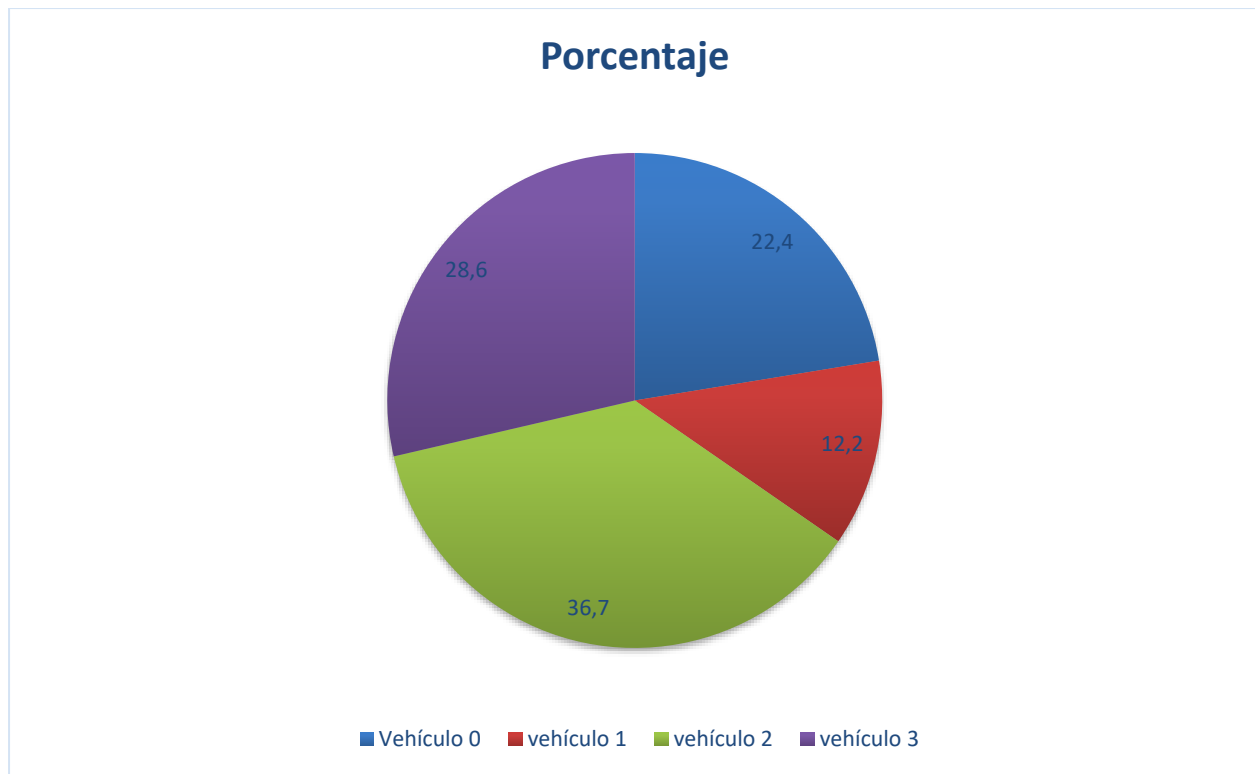


Figura 23. Porcentaje de albergues visitados. Información obtenida por la simulación del modelo PSO en My Maps de Google.

9. Conclusiones

Gracias a las bases de datos multidisciplinarios como Web of Science, Elsevier, Scopus, entre otros, se pudo realizar la revisión de la literatura de manera completa, encontrando la evolución del tema a través del tiempo gracias a las investigaciones de diferentes autores, además por medio de otros estudios realizados se puede concluir que el PSO ES la mejor manera de solucionar un problema de ruteo VRP.

Se pudo desarrollar un modelo matemático para el problema de vehículos capacitados (CVRP), asemejándose a la realidad, donde los vehículos recogen y distribuyen el agua alrededor de la ciudad, sin dejar por fuera a ningún cliente y en un tiempo óptimo, se establecieron los conjuntos,

los índices, los parámetros, y las variables, seguidamente se formuló la función objetivo y sus respectivas restricciones.

Se desarrollo un prototipo se software basado en la metodología de algoritmo PSO el cual busca optimizar el tiempo de respuesta ante una amenaza natural que perjudique el bienestar de las personas en la ciudad de Bucaramanga mediante la programación de suministro de agua que va dirigido a entes gubernamentales encargado de la gestión de riesgo y toma de decisiones.

Se diseño la red de transporte gracias My Maps de Google que fue una herramienta importante en la investigación ya que favoreció la construcción del escenario, albergue e hidrantes, al mismo tiempo, la simulación de las rutas establecidas por el algoritmo y permitió determinar las distancias de origen – destino del recorrido.

Se cumplieron en su totalidad los objetivos planteados en la presente investigación. Se desarrollo un algoritmo PSO que resuelve el problema de ruteo de vehículos para suministrar ayuda humanitaria utilizando el desarrollador PyCharm con un lenguaje de programación Python.

Por medio de la revisión literaria se pudo determinar la mejor manera de resolver el problema de ruteo VRP. Por ello se utilizó la optimización por enjambre de partículas, debido a la eficiencia en las soluciones no solo en producir las mejores rutas, sino también el promedio grupal.

10. Recomendaciones

Esta investigación se puede adaptar a cualquier ciudad de Colombia, teniendo en cuenta la cantidad de vehículos para el transporte de agua con sus respectivas capacidades y las ubicaciones reales de los albergue e hidrantes de las ciudades bajo el tipo de coordenada Gauss krügie y sistema de referencia MAGNA SIRGAS ya que el algoritmo está diseñado para leer este tipo de referencias.

La red de hidrantes de la ciudad de Bucaramanga esta comunicada en cuadrantes independientes, en caso de emergencia si no funciona el hidrante por problema de bloqueo de tuberías, sacar esta variable de la matriz hidrantes.

Tener en cuenta las zonas con mayor amenaza natural de la ciudad debido a que su porcentaje de vulnerabilidad es mayor.

En Bucaramanga solo se puede contar con 2 cisternas, en caso de una catástrofe mayor se debe solicitar ayuda a las entidades de socorro de los municipios vecinos, en el caso de esta investigación se optó por Floridablanca, pero también se puede contar con el municipio de Piedecuesta y Girón.

El presente proyecto servirá como base para futuras investigaciones con problemas de ruteo de vehículos utilizando optimización de enjambre de partículas ya que la Universidad Santo Tomas cuenta con pocos antecedentes de proyectos de grado que solucione estos problemas.

Referencias Bibliográficas

- [1] S. C. Villada, «Estas Son Las Cinco Tragedias Naturales Más Grandes En Colombia,» *El Colombiano*, 13 Noviembre 2015.
- [2] G. V. D, «Hoy Se Cumplen 140 Años Del Terremoto De Cucuta,» *Diario La Nacion*, 12 Octubre 2018.
- [3] Gobernación De Norte De Santander, «Terremoto De Cúcuta De 1875 (Andes),» Cucuta Norte De Santander , 2018.
- [4] Vanguardia Liberal, «Tragedia En El Playón,» *Vanguardia Liberal*, 1 Septiembre 2009.
- [5] O. Caleño, Compositor, *Una Madrugada Explosiva: Viajes A La Memoria, La Huella De Una Nación*. [Grabación De Sonido]. Ministerio De Cultura . 2012.
- [6] B. Bello Gutiérrez, N. M. Cruz Álvarez, M. Álvarez Saez, F. L. Chao Rojas Y V. García Gómez, *Medicina De Desastres*, La Habana: Ciencias Medicas, 2004.
- [7] Sistema Nacional De Gestion Del Riesgo De Desastres, *Manual De Logistica Paa Atencion De Emergencias*, Bogota, 2013.
- [8] P. Freeman, L. Martin Y G. Pflug, *Sistema Nacionales Para La Gestion De Riesgos De Desastre.*, Banco Interamericano De Desarrollo.
- [9] E. M. R. Gaviria, *Diseño Metodologico Para La Planificacion De La Atencion Y Prevencion De Desastres, Como Herramienta De Apoyo En La Gestion Del Desarrollo Municipal. Caso De Aplicación: Municipio De Amalfi, Antioquia., Medellin*, 2017.

- [10] É. J. M. García, «Santander, Sexta Región Con Más Víctimas Por Desastres,» *Vanguardia Liberal*, 31 Mayo 2015.
- [11] L. Ozdamar Y M. Ertem, «Models, Solutions And Enabling Technologies In Humanitarian Logistics.,» *European Journal Of Operational Research.*, P. 244, 2015.
- [12] Alcaldia De Bucaramanga Secretaria Del Interior Gestión Del Riesgo De Desastres Contiene, «Respuesta A La Proposición,» Bucaramanga, 2012.
- [13] United Nations International Children's Emergency Fund, «Www.Unicef.Org,» Unicef. [En Línea]. [Último Acceso: 4 Abril 2019].
- [14] United Nations , Glossary: Internationally Agreed Glossary Of Basic Terms Related To Disaster Management, Ginebra: Un International Decade For Natural Disaster Reduction, 1992.
- [15] Mimi Suriani Mat Daud, «Humanitarian Logistics And Its Challenges: The Literature Review,» *International Journal Of Supply Chain Management.*, Vol. 5, Nº 3, Pp. 107-110, 2016.
- [16] B. Vitoriano, M. T. Ortuño, G. Tirado Y J. Montero, «A Multi-Criteria Optimization Model For Humanitarian Aid Distribution.,» *Springer Us*, Vol. 51, Pp. 189-208, 2011.
- [17] P. Crescenzi, V. Kann, M. Halldórsson Y M. Karpinski, «A Compendium Of Np Optimization Problems,» [En Línea]. Available: [Http://Www.Nada.Kth.Se/~Viggo/Wwwcompendium/](http://Www.Nada.Kth.Se/~Viggo/Wwwcompendium/). [Último Acceso: 2019 04 14].

- [18] M. Gendreau Y J. Y. Potvin, «Metaheuristics In Combinatorial Optimization,» *Ann*, Vol. 1, N° 140, Pp. 189-213, 2005.
- [19] A. Cortéz, «Teoría De La Complejidad Computacional Y Teoría De,» *Revista De Investigacion De Sistemas E Informatica*, Vol. 1, N° 1, Pp. 102-105, 2004.
- [20] «Modelado Mediante Optimización Combinatoria,» 2006. [En Línea]. Available: <Http://Personales.Upv.Es/Jpgarcia/Linkedddocuments/Mcoioptimizacioncombinatoria.Pdf>. [Último Acceso: 2019 Abril 4].
- [21] W. Härmäläinen, «Class Np, Np-Complete, And Np-Hard Problems.»
- [22] J. F. Chicano García, *Metaheurísticas E Ingeniería Del Software*, 2007.
- [23] C. Y. Castañeda Roldán, «Algoritmos Exactos,» De *Estudio Comparativo De Diversos Métodos De Solución Del Problema Del Agente Viajero (Pav)*, Cholula, Puebla, México, Departamento De Ingeniería En Sistemas Computacionales. Escuela De Ingeniería, Universidad De Las Américas Puebla., 2000.
- [24] R. M. Cunquero, *Algoritmos Heurísticos En Optimización Combinatoria*, Valencia: Departament D'estadística I Investigació Operativa, Universitat De València.
- [25] A. Vidal Esmorís, *Algoritmos Heurísticos*, A Coruña, España: Universidad De Santiago De Compostela, 2016.
- [26] F. Glover, «Paths For Integer Programming,» *Comput. Oper. Res.*, Vol. 13, N° 5, Pp. 533-549, 1986.

- [27] P. Zabala, Problemas De Ruteo De Vehículos., Buenos Aires: Facultad De Ciencias Exactas Y Naturales. Universidad De Buenos Aires., 2006.
- [28] C. Contreras Y M. Diaz, Metodos Heuristicos Para La Solucion Del Probema De Ruteo De Vehiculos Con Capacidad (Cvrp), Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander, 2010.
- [29] J. Kennedy Y R. Eberhart, « Particle Swarm Optimization,» *Proceedings Of The 1995 Ieee International Conference On Neural Networks (Icnn'95)*, Vol. 4, Pp. 1942-1948, 1995.
- [30] V. Gonzalez Chamorro, B. Baran Y M. Villagra, «Optimización Por Enjambre De Partículas Para Satisfacción De Fórmulas Booleanas,» 2019.
- [31] F. S. Caparrini, «Dpto. De Ciencias De La Computación E Inteligencia Artificial,» Universidad De Sevilla, 18 Noviembre 2016. [En Línea]. Available: [Http://Www.Cs.Us.Es/~Fsancho/?E=70](http://www.cs.us.es/~fsancho/?E=70). [Último Acceso: 2019 Abril 11].
- [32] C. Clarke Y C. Pineda, Riesgo Y Desastres: Su Gestion Municipal En Centroamerica, Washington: Inter-American Development Bank, 2006.
- [33] F. Cany, Disaster And Development, Nueva York: Xford University Press, 1984.
- [34] A. Lavell, Draft Annotated Guidelines For Inter-Agency Collaboration In Programming For Disaster Reduction, Geneva : Draft Annotated Guidelines For Inter-Agency Collaboration In Programming For Disaster Reduction At Undp, 2000.

- [35] N. Serrano, «Pfm.Plataforma,» Universidad Pontificia Bolivariana, 24 Marzo 2015. [En Línea]. Available: <https://Plataformaupb.Com/Publicaciones/153-La-Vulnerabilidad-De-Santander>. [Último Acceso: 12 Abril 12].
- [36] N. Altay Y W. G. Green, «Or/Ms Research In Disaster Operations Management,» *Revista Europea De Investigación Operacional*, Vol. 175, Pp. 475-493, 2006.
- [37] W. G. Green Iii Y S. R. McGinnis , «Thoughts On The Higher Order Taxonomy Of Disasters,» Notes On The Science Of Extreme Situations Paper #7., 2002.
- [38] G. Hoetmer, «Emergency Management: Principles And Practice For Local Government,» International City Management Association, Washington, Dc., 1991.
- [39] H. I. Fischer, «A Proposed Disaster Scale,» Millersville University Of Pennsylvania, Millersville, Pa., 2003.
- [40] Unidad Nacional Para La Gestion Del Riesgo De Desastres (Ungrd), «Manual De Logistica Para La Atencion De Emergencias,» 2013. [En Línea]. Available: http://Portal.Gestiondelriesgo.Gov.Co/Documents/Manuales/Manual_De_Logistica_Para_La_Atencion_De_Emergencias_Ungrd.Pdf. [Último Acceso: 8 03 2019].
- [41] K. Owusu-Kwateng, M. Abdul Hamid Y B. Debrah, «Disaster Relief Logistics Operation: An,» *International Journal Of Emergency Services*, Vol. 6, N° 1, Pp. 4-13, 2017.
- [42] S. Y. C. Comité De Derechos Economicos, «Aplicación Del Impacto Internacional De Derechos Economicos, Sociales Y Culturales,» 2011 Diciembre 2. [En Línea]. Available: <https://View.Officeapps.Live.Com/Op/View.aspx?Src=Http%3a%2f%2fwww2.Ohchr.Or>

g%2fenglish%2fbodies%2fcscr%2fdocs%2fe.C.12.Est.Q.2.Add.1_Sp.Doc. [Último Acceso: 8 3 2019].

- [43] D. Byman, «Keeping The Peace,» Johns Hopkins University Press, Baltimore, Md., 2002.
- [44] A. Caunhye, X. Nie Y S. Pokharel, «Optimization Models In Emergency Logistics: A Literature Review,» *Socio Economic Planning Sciences*, Vol. 46, N° 1, Pp. 4-13, 2012.
- [45] M. Safeer, S. Nbuudayasankar, K. Balkumar Y K. Ganesh, «Analyzing Transportation And Distribution In Emergency Humanitarian Logistics,» *Procedia Engineering*, Vol. 97, Pp. 2248-2258, 2014.
- [46] D. Berkoune, J. Renaud, M. Rekik Y A. Ruiz, «Transportation In Disaster Response Operations,» *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 46, N° 1, Pp. 23-32, 2012.
- [47] A. Haghani, «Capacitated Maximum Covering Location Models: Formulations And Solution Procedures,» *Journal Of Advanced Transportation*, Vol. 30, N° 3, Pp. 101-136, 1996.
- [48] S. Oh Y A. Haghani, «Testing And Evaluation Of A Multi-Commodity Multi-Modal Network V,» *Journal Of Advanced Transportation*, Vol. 31, N° 3, Pp. 249-282, 1997.
- [49] G. Barbarosoglu Y Y. Arda, «Two-Stage Stochastic Programming Framework For Transportation Planning In Disaster Response,» *Journal Of The Operational Research Society*, Vol. 55, N° 1, Pp. 43-53, 2004.
- [50] L. Özdamar, E. Ekinici Y B. Küçükyazici, «Emergency Logistics Planning In Natural Disasters,» *Annals Of Operations Research*, Vol. 129, N° 1-4, Pp. 217-245, 2004.

- [51] M. Falasca Y C. Zobel, «A Two Stage Procurement Model For Humanitarian Relief Supply Chains,» *Journal Of Humanitarian Logistics And Supply Chain Management*, Vol. 2, N° 1, Pp. 151-169, 2011.
- [52] A. Bozorgi-Amiri, M. Abalameli, M. Alinaghia Y M. Heydari, «A Modified Particle Swarm Optimization For Disaster Relief Logistics Under Uncertain Environment,» *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 60, N° 1, Pp. 357-371, 2012.
- [53] H. Mete Y Z. Zabinsky, «Stochastic Optimization Of Medical Supply Location And Distribution In Disaster Management,» *International Journal Of Production Economics*, Vol. 126, N° 1, Pp. 76-84, 2010.
- [54] R. Knott, «Vehicle Scheduling For Emergency Relief Management: A Knowledge-Based Approach,» *Disasters*, Vol. 12, N° 4, Pp. 285-293, 1988.
- [55] V. Angelis, M. Mecoli, C. Nikoi Y G. Storchi, «Multiperiod Integrated Routing And Scheduling Of World Food Programme Cargo Planes In Angola,» *Computers & Operations Research*, Vol. 34, N° 6, Pp. 1601-1615, 2007.
- [56] M. Rancourt, F. Bellavance Y J. Goentzel, «Market Analysis And Transportation Procurement For Food Aid In Ethiopia,» *Socio-Economic Planning Sciences*, Vol. 35, N° 3, Pp. 198-219, 2014.
- [57] M. Rancourt, J. Cordeau, G. Laporte Y B. Watkins, «Tactical Network Planning For Food Aid Distribution In Kenya,» *Computers & Operations Research*, Vol. 56, Pp. 68-83, 2015.

- [58] J. Paul Y X. Wang, «Robust Optimization For United States Department Of Agriculture Food Aid Bid Allocations,» *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, Vol. 82, Pp. 129-146, 2015.
- [59] S. Loo, A. Fane, W. Krantz Y T. Lim, «Emergency Water Supply: A Review Of Potential,» *Water Research*, Vol. 46, N° 10, Pp. 3125-3151, 2012.
- [60] L. Wendt, S. Hilberg, J. Robl, A. Braun, E. Rogenhofer, D. Dirnberger, T. Strasser, P. Freder Y S. Lang, «Using Remote Sensing And Gis To Support Drinking Water Supply In Refugee/Idp Camps,» *Gi Forum*, Vol. 1, Pp. 449-458, 2015.
- [61] H. Rajagopalan, C. Saydam Y J. Xiao, «A Multiperiod Set Covering Location Model For Dynamic Redeployment Of Ambulances,» *Computers & Operations Research*, Vol. 48, N° 3, Pp. 814-826, 2008.
- [62] Z. Naji-Azimi , J. Renaud, A. Ruiz Y M. Ruiz, «A Covering Tour Approach To The Location Of,» *European Journal Of Operational*, Vol. 222, N° 3, Pp. 596-605, 2012.
- [63] B. Balcik, B. Beamon Y K. Smilowitz, «Last Mile Distribution In Humanitarian Relief,» *Journal Of Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, N° 2, Pp. 51-63, 2008.
- [64] K. J. Aguilar Imitola, Y. T. Perez Diaz Y H. Lamos Diaz, Un Algoritmo Memetico Para La Minimizacion Del Makespan En El Problema De Job Shop Scheduling, Bucaramanga: Uis. Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales, 2013.

- [65] A. R. Barrera Navarro Y A. P. Hernandez Gomez, Un Algoritmo Evolutivo Para El Problema De Distribucion De Recursos Postdesastres Sismicos En La Ciudad De Bucaramanga, Bucaramanga: Uis. Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales, 2016.
- [66] M. A. Barreto Robles Y P. N. Niño Niño, Un Algoritmo Memetico Para El Problema De Localizacion-Ruteo Con Ventanas De Tiempo Para La Atencion De Desastres Sismicos En La Ciudad De Bucaramanga, Bucaramanga: Uis. Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales, 2016.
- [67] M. A. Contreras Arevalo Y A. C. Martinez Galvis, Un Problema De Localizacion Multiobjetivo En La Fase De Preparacion Para Desastres Por Sismos En La Ciudad De Bucaramanga, Bucaramanga: Uis. Escuela De Estudios Industriales Y Empresariales, 2016.
- [68] Organización Mundial De La Salud, Organizacion Panamericana De La Salud, «Notas Técnicas Sobre Agua, Saneamiento E Higiene En Emergencias,» *Guías Técnicas Sobre Saneamiento, Agua Y Salud (Oms/Ops)*, 2009.
- [69] Nstituto Geográfico Agustín Codazzi - Igac, «Nstituto Geográfico Agustín Codazzi - Igac,» [En Línea]. Available: <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/magna-sirgas>. [Último Acceso: 26 Marzo 2020].
- [70] J. J. Liang, I. K. Qin, P. N. Suganthan Y S. Baskar, «Comprehensive Learning Particle Swarm Optimizer For Global Optimization Of Multimodal Functions,» *Ieee Transactions On Evolutionary Computation*, Vol. 10, N° 3, Pp. 281-295, 2006.

- [71] C. Y. Chen Y F. Ye, «Particle Swarm Optimization Algorithm And Its Application To Clustering Analysis,» *Networking, Sensing And Control, Ieee International Conference.*, 2012.
- [72] E. Figureueiredo, T. B. Ludermir Y C. Bastos-Filho, «Many Objective Particle Swarm Optimization,» *Information Sciences*, Vol. 374, Pp. 115-134, 2016.
- [73] Y. Shi Y R. C. Eberhart, «A Modified Particle Swarm Optimizer,» *Ieee International Conference On Evolutionary Computation Proceedings*, P. 69–73, 1998.
- [74] R. Poli, J. Kennedy Y T. Blackwell, «Particle Swarm Optimization,» *Swarm Intelligence*, Vol. 1, N° 1, Pp. 33-57, 2007.
- [75] J. Han, G. Zhang, Y. Hu Y J. Lu, «A Solution To Bi/Tri-Level Programming Problems Using Particle Swarm Optimization,» *Information Sciences*, Vols. %1 De %2370-371, Pp. 519-537, 2016.
- [76] Z. Ying, Z. Guangjie Y Y. Feihong, «Particle Swarm Optimization-Based Approach For Optical Finite Impulse Response Filter Design,» *Applied Optics*, Vol. 42, N° 8, Pp. 1503-1507, 2003.
- [77] Maskrey, «Los Desastres No Son Naturales,» 1993.
- [78] F. S. Hillier Y G. J. Lieberman, Introduccion A La Investigación De Operaciones, *Journal Of Chemical Information And Modeling*, 2013.

